

# Получение желаемого качества переходных процессов системы стабилизации двухколесного балансирующего робота на основе численной оптимизации

А.Ю. Ивойлов<sup>1</sup>, В. А. Жмудь<sup>1</sup>, В. Г. Трубин<sup>1</sup>, Г.Рот<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Новосибирский Государственный Технический Университет, Новосибирск, Россия

<sup>2</sup>Университет Зигена, Зиген, Германия

*Аннотация* – В статье решается задача обеспечения желаемого вида переходных процессов системы автоматической стабилизации двухколесного балансирующего робота. Для задания формы переходных процессов необходимо выбрать распределение корней желаемого полинома динамики. Эта задача осложняется тем, что система работает с реальным устройством, в котором присутствуют такие нелинейности как трение и люфт приводов, ограничение на управляющее воздействие и др. Как правило, для задания распределения корней используются общие требования, такие как максимальный уровень перерегулирования и максимальная длительность переходного процесса. Эти требования определяют сектор на комплексной плоскости, в котором следует располагать корни. Однако в дополнение к этому также требуется задать распределение корней внутри этого сектора. В статье показано, что распределение корней в соответствии с биномом Ньютона не дает приемлемого результата. В этом случае нет возможности скорректировать форму переходного процесса в сторону увеличения быстродействия или уменьшения перерегулирования. В статье предложен метод получения требуемой формы переходного процесса, основанный на численной оптимизации. В основе метода лежит изменение вида стоимостной функции, используемой для процедуры оптимизации.

*Ключевые слова* – система автоматического управления, регулятор, численная оптимизация, настройка коэффициентов регулятора, робот, микроконтроллер, желаемое уравнение динамики

## I. ВВЕДЕНИЕ

В данной статье рассматривается вопрос настройки коэффициентов регулятора системы автоматической стабилизации двухколесного балансирующего робота. При расчете коэффициентов регулятора аналитически необходимо задать желаемое распределение корней системы. Данное распределение может быть задано, исходя из общих требований к качеству переходных процессов в системе, таких как максимальный уровень перерегулирования и минимальная длительность, которые задают сектор на комплексной плоскости, внутри которого следует выбирать корни. При этом вопрос выбора распределения внутри этого сектора остается открытым. В условиях нелинейностей, характерных для реальных устройств, эта задача становится еще более сложной. Наряду с аналитическими методами расчета регуляторов существуют различные неаналитические, среди которых можно выделить методы эмпирической настройки и методы численной оптимизации [1–11]. В данной работе предлагается методика настройки коэффициентов регулятора системы управления, основанная на методе численной оптимизации, позволяющая получить переходные процессы в системе, соответствующие тем или иным требованиям, предъявляемым к ней.

## II. ОПИСАНИЕ УСТРОЙСТВА

На *Рис. 1.* представлен внешний вид двухколесного балансирующего робота. Это устройство представляет собой платформу, на которой размещены платы с управляющей и силовой электроникой. К платформе жестко крепятся статоры двигателей постоянного тока. Вал каждого двигателя соединен со своим колесом. Основной задачей системы стабилизации данного устройства является поддержание вертикального положения робота путем вращения колес.

Структурная схема робота приведена на *Рис. 2.* Исполнительными механизмами устройства являются два сервомотора *Lego NXT*. Данные устройства представляют собой двигатели постоянного тока со встроенными редуктором и квадратурным энкодером. Энкодеры имеют разрешение 180 импульсов на оборот, что позволяет оценивать относительный угол поворота вала двигателя с точностью не менее двух градусов. Управление каждым сервомотором осуществляется с помощью мостовой схемы, основанной на четырех полевых транзисторах и микросхемах драйверов транзисторов. Данная схема позволяет осуществлять управление вращением двигателя с возможностью реверса.

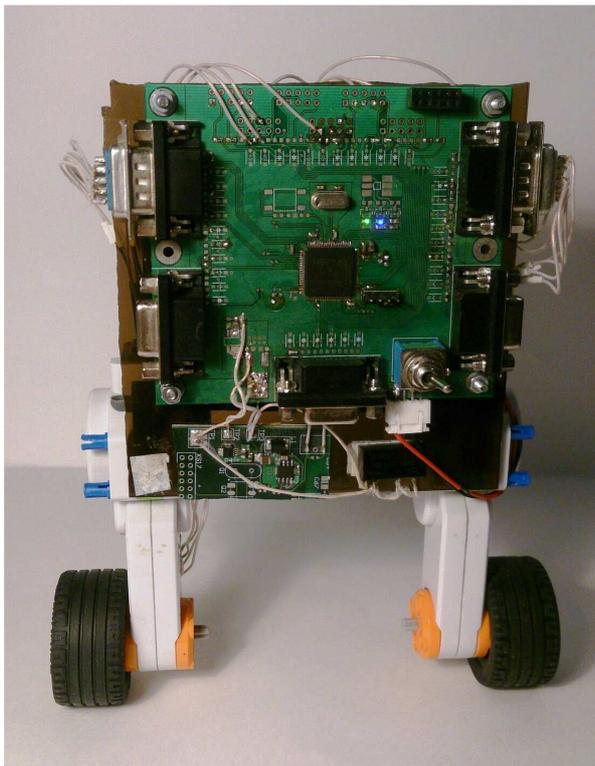


Рис. 1. Внешний вид устройства

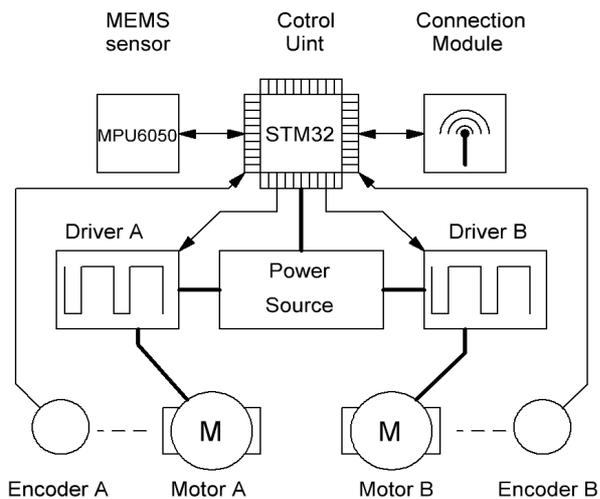


Рис. 2. Структурная схема робота

Для оценки угла отклонения робота от вертикали применяется измерительный модуль MPU6050, который содержит два трехосевых MEMS-датчика – акселерометр и гироскоп. На практике в системе стабилизации робота в настоящее время применяется только гироскоп [12]. Подробная информация об особенностях работы и применения модуля MPU6050 приведена в работах [13–14].

Ядром устройства является микроконтроллер STM32F205VET6 от STMicroelectronics. Управляющая программа микроконтроллера осуществляет сбор данных от датчиков системы и вычисляет управляющее воздействие системы стабилизации.

Помимо описанных блоков, устройство включает так же блоки проводной и беспроводной передачи данных. Питание устройства осуществляется от двух Li-Ion-аккумуляторов с суммарным напряжением 8,4 В.

### III. ОПИСАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Рассмотрим работу системы автоматической стабилизации двухколесного балансирующего робота. Структурная схема данной системы представлена на Рис. 3. Подробно обоснование выбора структуры системы и расчет ее регулятора приведены в статье [12]. Здесь же приведем лишь краткое описание принципа ее работы и итоговый вид уравнений. Выражения передаточных функций системы приведены ниже, а численные значения их параметров представлены в Таблице I.

$$W_\phi(p) = \frac{k_o p}{p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0}$$

$$W_a(p) = k_\alpha \frac{p^2 + b_0}{p^2}$$

$$W_k(p) = \frac{K_d p^2 + K_p p + K_i}{p}$$

$$W_H(p) = \frac{H_p p^2 + H_i p + H_{ii}}{p^2}$$

Выбор такой структуры системы обусловлен необходимостью компенсировать недостаток датчика угловой скорости (МЭМС-гироскопа), называемый дрейфом нуля. Выражается этот недостаток в постепенном нарастании ошибки оценки угла наклона, что на структурной схеме отображено сигналом ошибки датчика  $Err_g$  и интегратором. С течением времени это приводит к потере устойчивости системы, если в ней не предусмотрен механизм компенсации этой ошибки. Представленная система позволяет это сделать. Действительно, если вывести передаточную функцию выхода системы относительно сигнала ошибки, получим следующее выражение:

$$W_e = - \frac{k_o k_a K(p) B(p)}{(A(p) + k_o K(p)) p^3 + k_o k_a H(p) B(p)}$$

где:

$$A(p) = p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0$$

$$B(p) = p^2 + b_0$$

$$H(p) = H_p p^2 + H_i p + H_{ii}$$

$$K(p) = K_d p^2 + K_p p + K_i$$

По завершении переходных процессов это выражение примет следующий вид:

$$W_e = - \frac{k_o k_a K_i b_0}{k_o k_a H_{ii} b_0} = \frac{K_i}{H_{ii}}$$

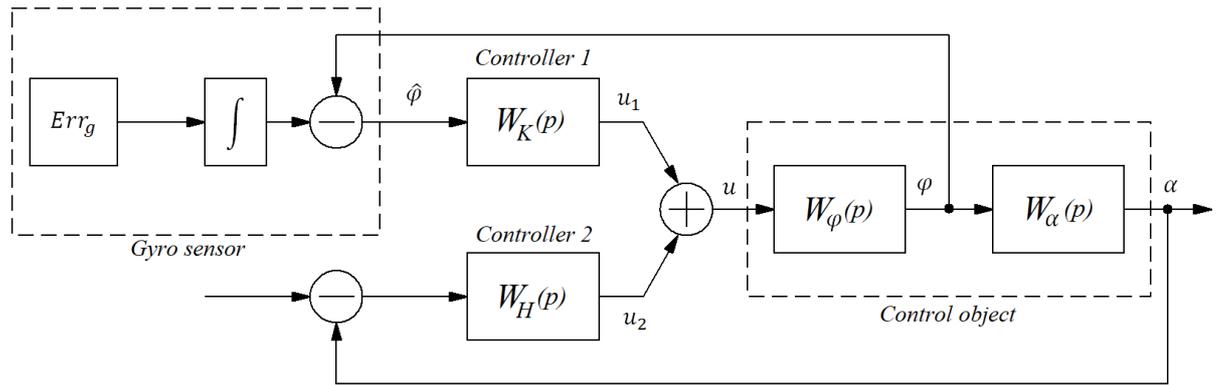


Рис 3. Структурная схема системы управления

Таблица 1  
Значения параметров передаточных функций

Параметр	Значение
$a_0$	-490
$a_1$	-52.3
$a_2$	9.9
$k_o$	-2.8
$b_0$	-49.5
$k_a$	-7.07

Следовательно, нарастающая с течением времени ошибка угла наклона компенсирована. Теоретически, при использовании идеального датчика угловой скорости для стабилизации системы было бы достаточно, если регулятор “Controller 2” был бы пропорциональным, а регулятор “Controller 1” имел бы тот же вид. Таким образом, порядок системы выше теоретического именно из-за необходимости компенсации дрейфа нуля гироскопа.

Выражения для расчета коэффициентов регуляторов системы приведены ниже.

$$a_2 + k_o K_d = a^*_5 \quad (1)$$

$$a_1 + k_o K_p + k_o k_a H_p = a^*_4 \quad (2)$$

$$a_0 + k_o K_i + k_o k_a H_i = a^*_3 \quad (3)$$

$$k_o k_a (H_{ii} + b_0 H_p) = a^*_2 \quad (4)$$

$$k_o k_a b_0 H_i = a^*_1 \quad (5)$$

$$k_o k_a b_0 H_{ii} = a^*_0 \quad (6)$$

Коэффициенты  $a^*_i$  представляют собой коэффициенты при степенях желаемого уравнения динамики системы:

$$A^*(p) = p^6 + \sum_{i=0}^5 a^*_i p^i \quad (7)$$

#### IV. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для расчета системы управления, описанной выше, необходимо выбрать распределение корней желаемого уравнения (7) и рассчитать значения

коэффициентов регуляторов. Однако в действительности выбор желаемого уравнения не является тривиальной задачей. Как правило, распределение корней этого уравнения выбирается исходя из общих ограничений к показателям качества процессов системы, таких как максимальный уровень перерегулирования и минимальное время переходного процесса. Эти параметры определяют сектор на комплексной плоскости, внутри которого следует располагать корни. Однако вопрос выбора распределения корней внутри этого сектора остается открытым. В литературе рекомендации по выбору желаемого уравнения практически не встречаются. Обоснование выбора распределения корней желаемого уравнения приведено, например, в работах [15–16]. На практике выбор желаемого распределения корней сопряжен с рядом трудностей, таких, как, например, присутствие нелинейностей в реальном объекте управления. При наличии таких нелинейностей, как ограничение на управляющее воздействие, сухое трение и механический зазор исполнительных механизмов, поведение системы может сильно отличаться от предсказываемого моделью, что осложняет выбор распределения корней. Часто в качестве желаемого выбирается распределение корней в виде бинома Ньютона, однако при этом получаемое качество процессов системы далеко от оптимального. При наличии же описанных выше нелинейностей реальный объект может стать неустойчивым, как показано в работе [12]. В рассматриваемой системе управления эмпирическим путем выбрано следующее распределение корней желаемого уравнения динамики:

$$p_1 = p_2 = -50; p_3 = p_4 = p_5 = p_6 = -1$$

что в соответствии с выражениями (1–6) дает значения коэффициентов регуляторов, которые представлены в Таблице 2. На Рис. 4–6 представлены графики переходных процессов системы при обработке начальных усло-

вий. Как видно из рисунков система компенсирует дрейф нуля гироскопа и обеспечивает устойчивость устройства. Однако переходные процессы в системе имеют достаточно высокую длительность.

Таблица 2

Коэффициенты регулятора исходной системы

Параметр	Значение
$K_i$	-4040
$K_p$	-1170
$K_d$	-33.6
$H_p$	-15.8
$H_i$	-10.3
$H_{ii}$	-2.55

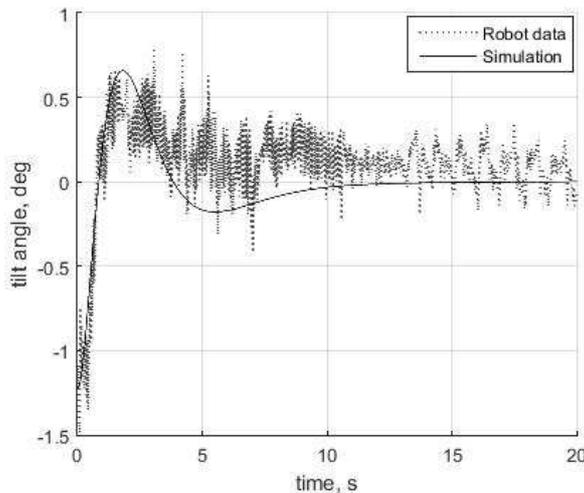


Рис. 4. Процесс угла наклона относительно вертикали в исходной системе

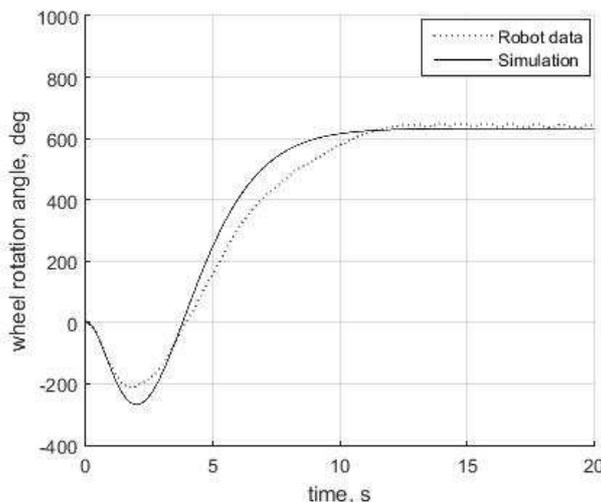


Рис. 5. Процесс угла поворота колеса исходной системы

Если, например, быстродействие системы является приоритетным требованием, то такие параметры системы могут быть неприемлемыми. В других случаях к системе могут предъявляться иные требования. Таким образом, задачу

исследования можно сформулировать следующим образом: необходимо предложить метод, позволяющий рассчитать коэффициенты регуляторов системы или настроить их, в соответствии с конкретными требованиями к системе. Решение этой задачи может быть достигнуто с одной стороны, обоснованным выбором желаемого уравнения динамики с последующим расчетом коэффициентов регулятора, с другой стороны – путем настройки рассчитанных заранее коэффициентов каким-либо способом.

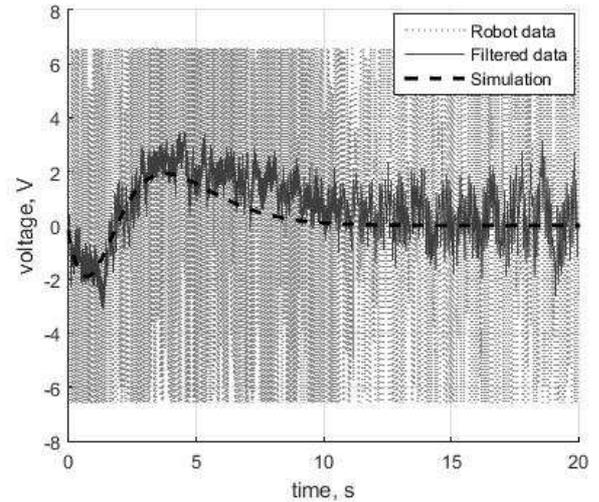


Рис. 6. Процесс напряжения в исходной системе

Для решения задачи любым из этих способов может быть применен метод численной оптимизации, как для выбора желаемого распределения корней, так и для настройки регулятора.

### V. О РАСПРЕДЕЛЕНИИ КОРНЕЙ

Рассмотрим систему, в которой задано распределение корней в виде бинома Ньютона. Рассчитаем коэффициенты регуляторов для различных значений корней. Результаты расчета приведены в Таблице 3. Проведем численное моделирование процессов в системе. В качестве примера будем исследовать реакцию системы на импульсное возмущающее воздействие:

$$M(t) = \begin{cases} 1, & t \leq 0.01c \\ 0, & t > 0.01c \end{cases} \quad (8)$$

Таблица 3

Коэффициенты по биному Ньютона

Значение	$p_i = -3$	$p_i = -5$	$p_i = -8$
$K_i$	-378	-1200	-5250
$K_p$	-75.8	-223	-843
$K_d$	-2.89	-7.18	-13.6
$H_p$	-1.25	-9.89	-68.1
$H_i$	-1.49	-19.1	-201
$H_{ii}$	-0.744	-15.9	-268

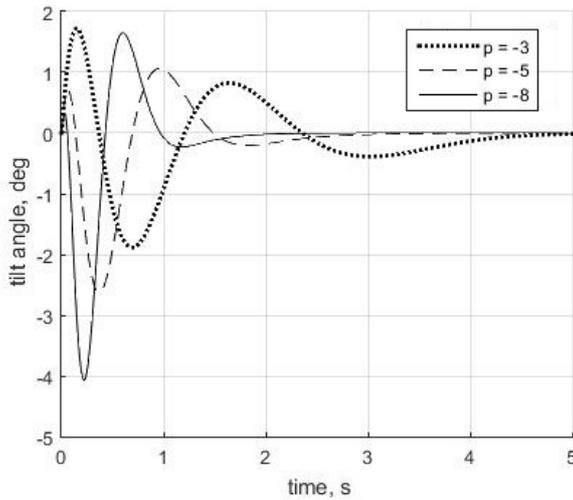


Рис. 7. Моделирование системы для случая бинорма Ньютона

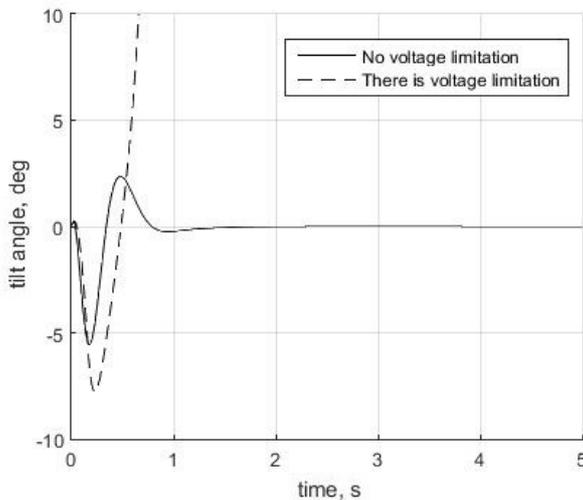


Рис. 8. Поведение системы при  $p_i = -10$  с ограничением и без ограничения управления

Такой вид воздействия соответствует действию возмущений на реальное устройство (удары, или «толчки»). Результаты моделирования представлены на Рис. 7. Отметим, что при меньших и больших значениях корней желаемого уравнения система, получаемая при моделировании, становится неустойчивой. При этом если убрать ограничение на управляющее воздействие, система, рассчитанная для больших значений корней, становится устойчивой, что отображает Рис. 8. В этом проявляется свойство данного вида нелинейности. Далее применим рассчитанные значения коэффициентов в реальном устройстве. На Рис. 9 и 10 представлен отклик робота на возмущающее воздействие и обработка им ненулевых начальных условий. Из рисунков видно, что хотя в целом тенденция процессов корректная (быстродействие увеличивается по мере увеличения значения корней системы) качество процессов в реальном устройстве не соответствует тому, что прогнозируется моделированием. Единственной приемлемой с оговорками системой можно

считать лишь систему, соответствующую значению корня  $p_i = -5$ . Таким образом, можно сделать следующие выводы:

- Распределение корней в виде бинорма Ньютона позволяет управлять лишь общим усилением системы, но не соотношением колебательности и быстродействия при заданном усилении.
- При малом значении общего усиления системы ( $p_i = -3$ ) в процессах реального устройства присутствуют значительные по величине автоколебания, устойчивость системы к возмущениям при этом невысока.
- При большом значении общего усиления системы начинает сказываться влияние ограничения на управляющее воздействие: в системе также появляются автоколебания, хотя и сохраняется высокая устойчивость.

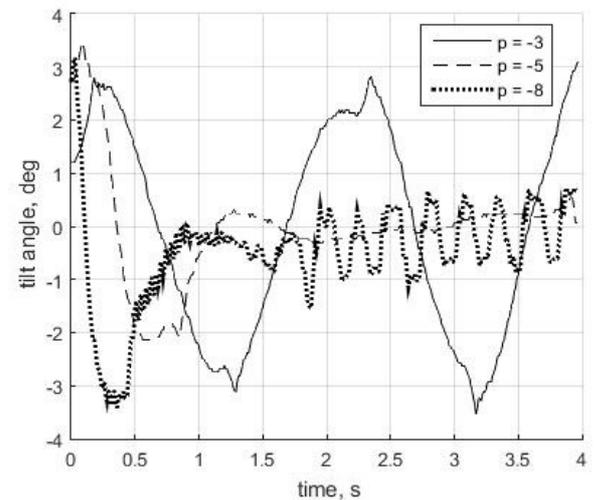


Рис. 9. Процессы в реальной системе с распределением корней по бинорму Ньютона: отработка начальных условий

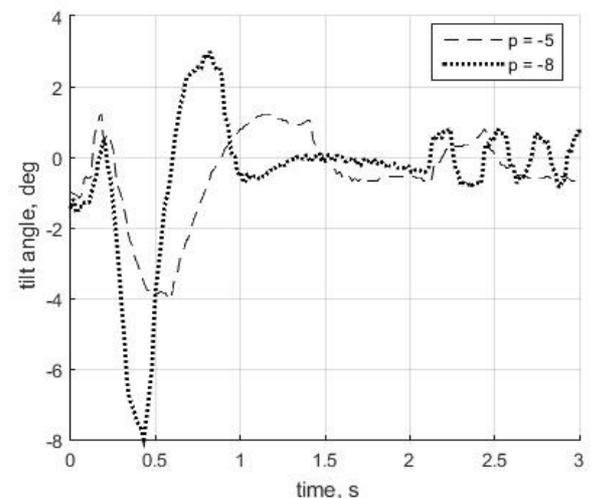


Рис. 10. Процессы в реальной системе с распределением корней по бинорму Ньютона: отработка возмущения

Таким образом, необходимо выбирать распределение корней более тщательно для получения лучшего качества процессов.

## VI. МЕТОД НАСТРОЙКИ КОЭФФИЦИЕНТОВ РЕГУЛЯТОРА

Альтернативой выбору распределения корней желаемого уравнения системы является настройка существующих значений коэффициентов регуляторов для получения приемлемого качества процессов в системе. Для настройки коэффициентов регулятора системы воспользуемся методом численной оптимизации в программе *VisSim*. Отметим, что в данном случае не требуется определить глобальный оптимум системы, необходимо лишь получить процессы приемлемого качества. В ходе моделирования так же будем исследовать отклик системы на возмущающее воздействие вида (8). Настройку коэффициентов регулятора будем выполнять в два этапа:

1. Определяем первые 4 коэффициента регулятора, полагая оставшиеся 2 коэффициента равными нулю. При этом датчик угловой скорости считаем идеальным (сигнал ошибки гироскопа равен нулю).
2. Определяем 2 оставшихся коэффициента регулятора с учетом наличия ошибки измерения угла наклона гироскопом.

### А. Этап 1

Для расчета значений коэффициентов регулятора, с которых начнется процедура оптимизации, воспользуемся упрощенной структурной схемой системы, представленной на рис. 11. Передаточная функция угла наклона работа относительно входа в данной системе имеет следующий вид:

$$\overline{W}_\varphi(p) = \frac{k_o(K_d p^2 + K_p p + K_i)}{p^3 + (a_2 + k_o K_d)p^2 + (a_1 + k_o K_p)p + (a_0 + k_o K_i)}$$

Выражения для расчета коэффициентов регулятора имеют следующий вид:

$$a_2 + k_o K_d = a^*_2$$

$$a_1 + k_o K_p = a^*_1$$

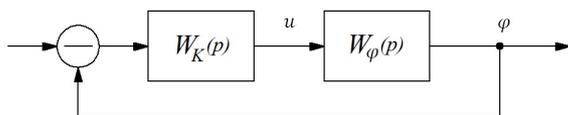


Рис. 11. Упрощенная система

$$a_0 + k_o K_i = a^*_0$$

где  $a^*_i$  коэффициенты при степенях полинома желаемого уравнения динамики. В качестве стартовых значений для процедуры оптимизации можно использовать распределение, соответствующее биному Ньютона. При этом значение пропорционального коэффициента регулятора “*Controller 2*” примем следующее:

$$H_p = \frac{K_d}{2}$$

Для проведения процедуры оптимизации необходимо задать стоимостную функцию системы. Минимизация значения этой функции есть цель оптимизации. Выберем вид стоимостной функции, описанный в работе [17]:

$$f(t) = \int |e(t)|^M t^N dt$$

где  $e(t)$  – ошибка системы,  $M$  и  $N$  целые показатели степени. Поскольку на более поздних стадиях переходного процесса ошибка системы вносит больший вклад в значение стоимостной функции, данный вид функции может применяться для получения более эффективных по быстрдействию процессов. Задавая различные значения показателей степеней  $M$  и  $N$ , можно изменять вид получаемых процессов в сторону большего быстрдействия или меньшей колебательности. В качестве ошибки системы  $e(t)$  выберем текущее значение угла наклона работа, поскольку обеспечение нулевого значения этого угла и есть цель работы системы стабилизации. При проведении оптимизации будем задавать различные значения показателей степеней  $M$  и  $N$ . Проведем численную оптимизацию системы программе *VisSim* в соответствии со схемой моделирования, представленной на Рис. 12. Результаты оптимизации представлены на Рис. 13–14. Значения коэффициентов регулятора, полученные при различных значениях параметров  $N$  и  $M$ , а также их начальные значения, приведены в Таблице 4.

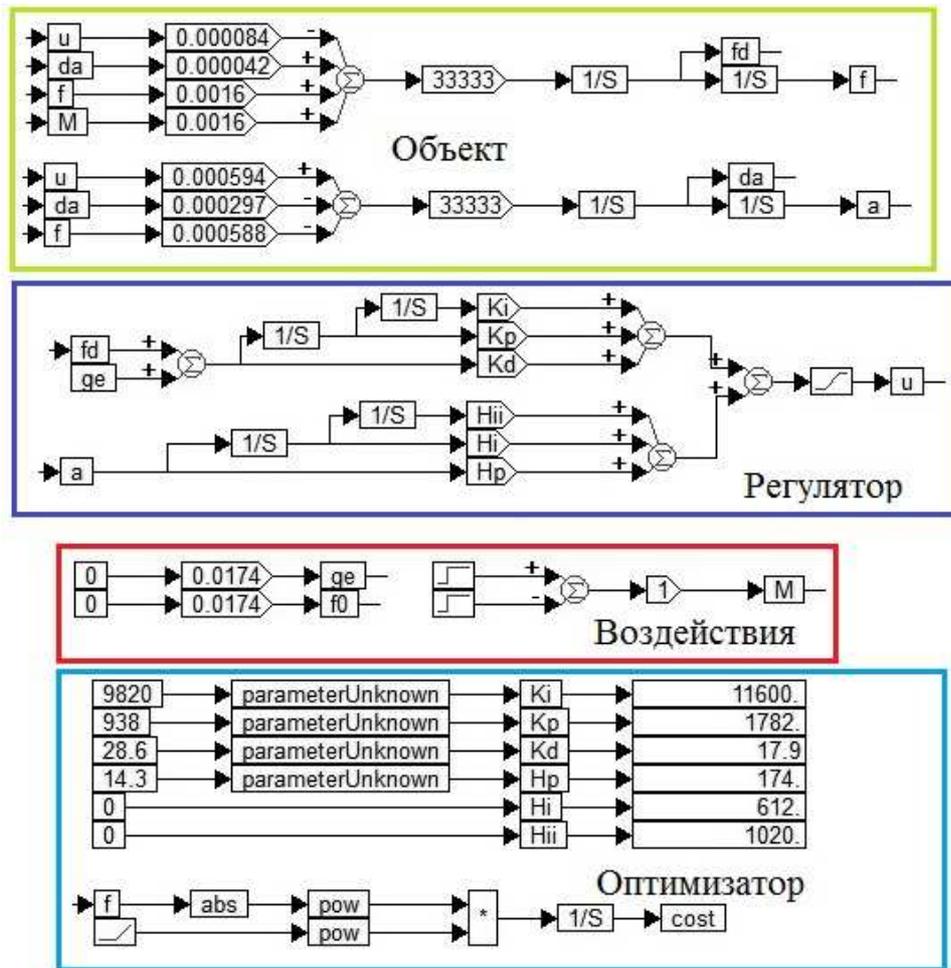


Рис. 12. Схема моделирования системы на этапе 1

Таблица 4

Результат настройки на Этапе 1

-	-	1	2	3	4	5
Система	Нач.	M=1, N=1	M=1, N=4	M=4, N=1	M=4, N=4	Модиф.
$K_i$	-9820	-4720	-4240	-36300	-6190	-3550
$K_p$	-983	-757	758	-104000	-583	-650
$K_d$	-28.6	-31.1	11.9	-481	-13.3	-14.2
$H_p$	-14.3	-39.1	54.6	0.126	-28.7	-22.3
$H_i$	0	0	0	0	0	0
$H_{ii}$	0	0	0	0	0	0

Отметим, что для случая  $M = 4$  и  $N = 1$  был получен некорректный результат, поскольку по завершении переходного процесса устройство продолжает перемещаться по поверхности, что демонстрирует Рис. 14. (угол поворота колеса нарастает с течением времени). Для решения данной проблемы выберем в качестве ошибки системы не текущее значение угла наклона, а текущее значение угловой скорости вращения колеса, и повторим процедуру оптимизации при  $M = 4$  и  $N = 1$ . Из рисунков видно, что наилучшей по быстрдействию из полученных при оптимизации систем является система 1, а наилучшей по уровню колебательности – система 5. Примем значения коэффициентов регуляторов этих систем и продолжим настройку

на этапе 2. Отметим, что хотя колебательность исходной системы ниже, чем в системе 5, в последней системе время переходного процесса существенно меньше, в то время как уровень колебательности незначительно выше, поэтому примем именно эту систему.

А. Этап 2

Для окончательной настройки коэффициентов регуляторов воспользуемся схемой оптимизации, представленной на Рис. 15. Основное отличие данной схемы от предыдущей состоит в том, что в эту систему введена ошибка измерения угла наклона гироскопом.

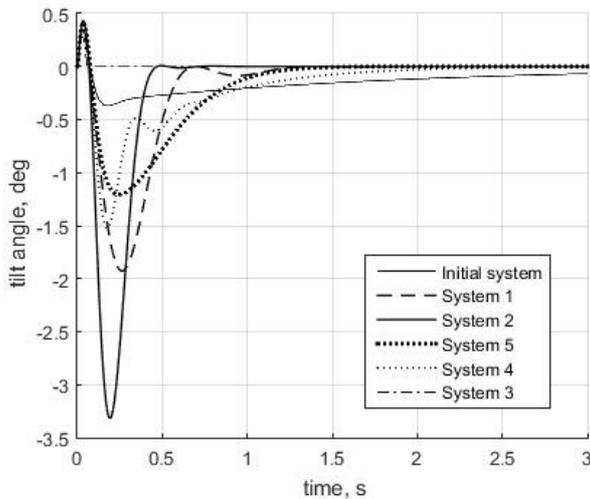


Рис. 13. Результат настройки на этапе 1: угол наклона

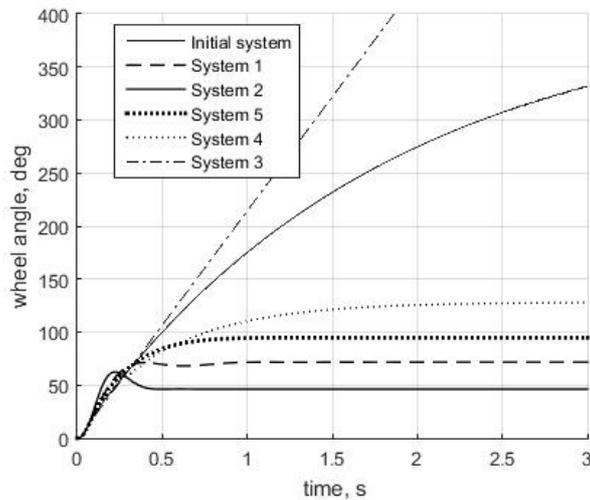


Рис. 14. Результат настройки на этапе 1: угол колеса.

В соответствии с этой схемой выполним настройку трех коэффициентов регулятора “Controller 2”. При этом в качестве начального значения коэффициента  $H_p$  примем значение, полученное на этапе 1. Начальные значения коэффициентов  $H_i$  и  $H_{ii}$  примем вдвое меньшими, чем  $H_p$ :

$$H_i = \frac{H_p}{2}$$

$$H_{ii} = \frac{H_p}{2}$$

На втором этапе процедуры настройки сохраним те значения параметров стоимостной функции  $M$  и  $N$ , при которых были получены коэффициенты регуляторов системы на этапе 1. Но при этом в качестве сигнала  $e(t)$  примем текущее значение угловой скорости вращения колеса. Результаты оптимизации представлены на Рис. 16 и 17. Значения коэффициентов регулятора, полученные при различных значениях параметров  $N$  и  $M$ , а также же исходные значения коэффициентов из работы [12], приведены в Таблице 5. Из рисунков видно, что процессы в системах с настроенными коэффициентами имеют более высокое быстродействие по сравнению с исходной системой. При этом система 5 при лучшем быстродействии имеет близкий к исходной системе уровень колебательности: первый пик имеет несколько большее значение, второй пик при этом чуть меньше.

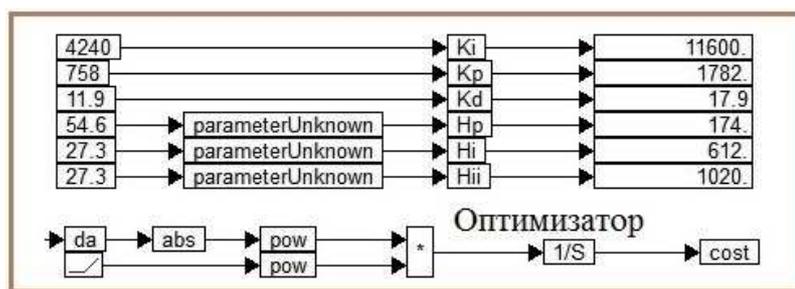


Рис. 15. Схема оптимизатора при моделировании системы на этапе 2; остальные блоки – без изменений

Таким образом, можно сделать вывод, что описанная методика позволяет получить более качественные процессы, по сравнению с полученными эмпирически. При этом методика позволяет получать более эффективные по быстродействию или по уровню колебательности процессы, в зависимости от конкретных требований к системе.

Таблица 5  
Результат настройки на Этапе 2

-	-	2	5
Система	Исходная	M=1, N=1	M=1, N=4
$K_i$	-4040	-4240	-3550
$K_p$	-1170	-758	-650
$K_d$	-33.6	-11.9	-14.2
$H_p$	-15.8	-35.4	-20.9
$H_i$	-10.3	-55.7	-22.6
$H_{ii}$	-2.55	-32.3	-9.48

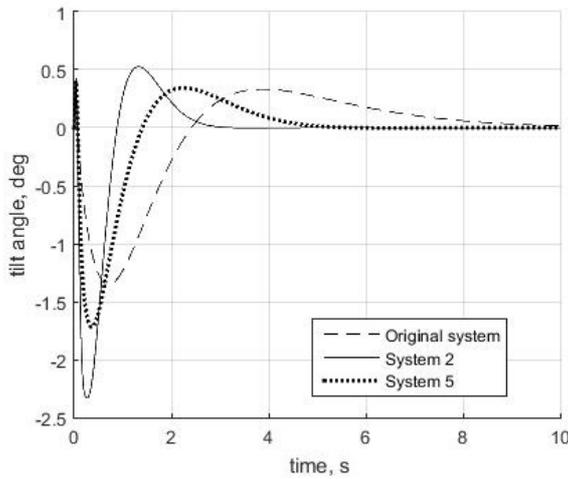


Рис. 16. Результат настройки на этапе 2: угол наклона

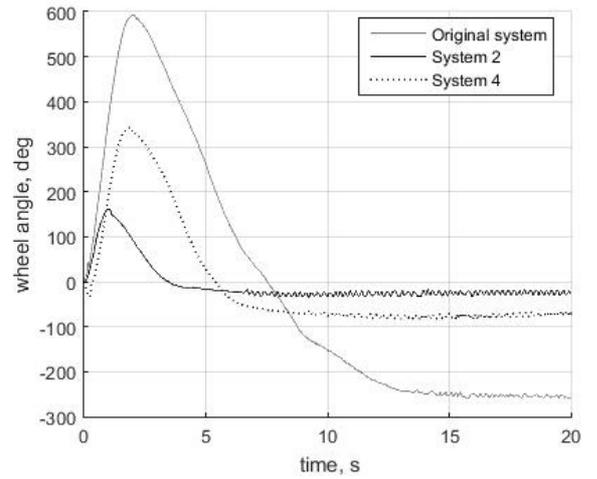


Рис. 19. Результат эксперимента: угол колеса при отработке начальных условий

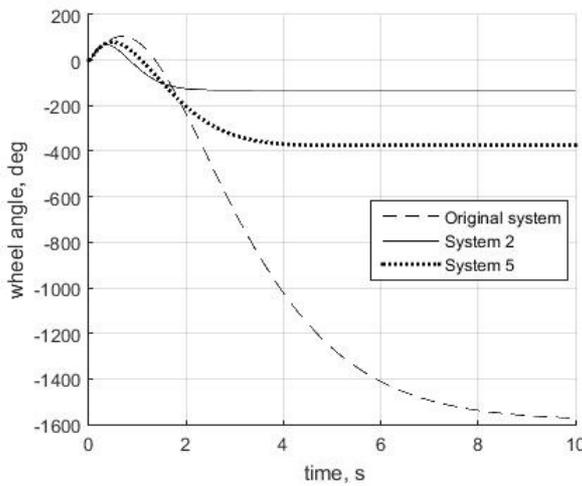


Рис. 17. Результат настройки на этапе 2: угол колеса

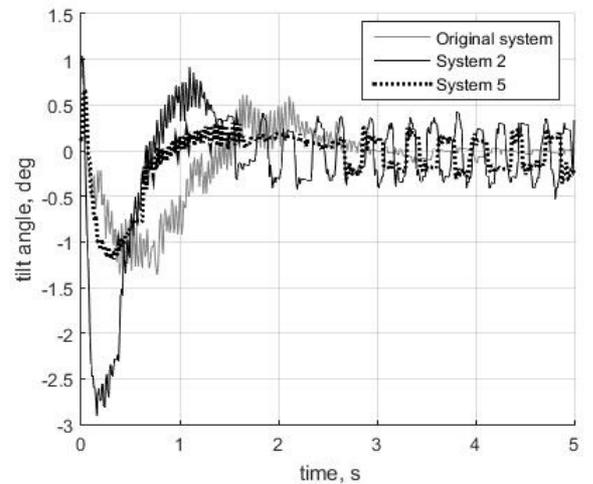


Рис. 20. Результат эксперимента: угол наклона при отработке возмущения

## VII. ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Полученные ранее значения коэффициентов регулятора были применены в системе управления реального устройства. Результаты работы полученных систем, а также исходной системы, при отработке начальных условий и отработки возмущения представлены на Рис. 18–21.

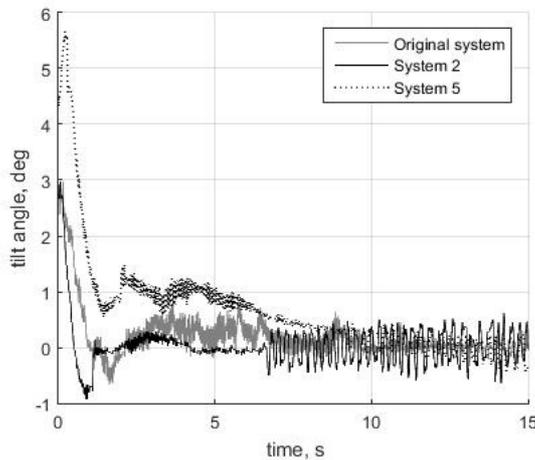


Рис. 18. Результат эксперимента: угол наклона при отработке начальных условий

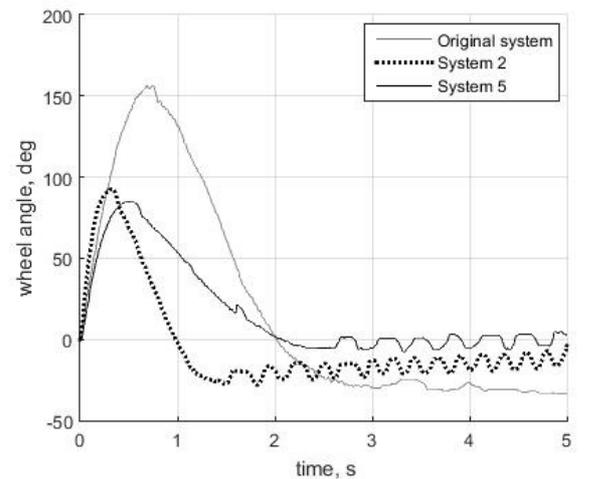


Рис. 21. Результат эксперимента: угол колеса при отработке возмущения

Из графиков видно, что процессы в реальных системах в целом соответствуют результатам моделирования. Стоит, однако, отметить, что в настроенных системах присутствуют автоколебания. Для системы с наибольшим быстродействием величина этих колебаний более существенна. При этом в по-

лученных системах существенно ниже уровень статической ошибки по величине угла поворота колеса. Таким образом, можно сделать вывод, что предложенная методика позволяет получить процессы в соответствии с конкретными требованиями к системе и для реального устройства.

### VIII. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрен вопрос выбора желаемого распределения корней системы и его влияния на качество ее работы. Показано, что выбор распределения корней в виде биннома Ньютона позволяет лишь получить устойчивые процессы в системе и управлять ее общим усилением. При этом в рамках заданного усиления нет возможности задать предпочтительное требование к процессам – высокое быстродействие, малая колебательность или компромиссный вариант. Поэтому такое распределение нельзя считать приемлемым. В результате проведенного исследования предложена методика, основанная на использовании метода численной оптимизации. Показано, что данная методика позволяет настроить процессы в системе в соответствии с конкретными требованиями к системе путем изменения вида стоимостной функции, используемой при оптимизации системы. Результаты исследования подтверждены численным моделированием и экспериментально.

### ЛИТЕРАТУРА

[1] Toscano R. A simple robust PI/PID controller design via numerical optimization approach. *Journal of Process Control*. vol. 15, no. 1, pp. 81-88, Feb. 2005.

[2] Zhmud V.A., Liapidevskiy A.V. The Design of the Feedback Systems by Means of the Modeling and Optimization in the Program VisSim 5.6/6.0 // Proc. Of The 30th IASTED Conference on Modelling, Identification, and Control ~ AsiaMIC 2010 ~November 24 – 26, 2010 Phuket, Thailand. P. 27–32.

[3] Sanchis R., Romero J., Balaguer P. Tuning of PID controllers based on simplified single parameter optimization. *International Journal of Control*. vol. 83, no. 9, P. 1785–1798, Jul. 2010.

[4] Zhmud V.A., Dimitrov L.V., Yadrishnikov O.D. Calculation of regulators for the problem of mechatronics by means of numerical optimization method. 12th International Conference on Actual Problems on Electronic Instrument Engineering APEIE 2014. Proceedings.

[5] Zhmud V. A., Semibalamut V. M., Vostrikov A. S. Feedback systems with pseudo local loops. Testing and measurement: techniques and applications: proc. of the 2015 Intern. Conf. on testing and measurement techniques (TMTA 2015), Thailand, Phuket Island, 16–17 Jan. 2015. – London: CRC Press, 2015. – P. 411–416. - 200 copy. - ISBN 978-1-138-02812-1-8.

[6] Walton C., Phelps C., Gong Q., Kaminer I. A Numerical Algorithm for Optimal Control of Systems with Parameter Uncertainty. *IFAC-PapersOnLine*. vol. 49, no. 18, pp. 468-475, 2016.

[7] Diaz-Rodriguez I., Han S., Keel L., Bhattacharyya S. “Advanced Tuning for Ziegler-Nichols Plants”. *IFAC-PapersOnLine*. vol. 50, no. 1, P. 1805–1810, Jul. 2017.

[8] Zhmud V., Zavorin A. The design of the control system for object with delay and interval-given parameters.

International Siberian conference on control and communications (SIBCON–2015): proc., Omsk, 21–23 May, 2015. – Omsk: IEEE, 2015. – Art. 130 (6 p.). ISBN 978-1-4799-7102-2. - DOI: 10.1109/SIBCON.2015.7147060.

[9] M. Jin, J. Lee, P. Chang, M. Kim, S. Kang “Automatic Gain Tuning for Robust PID Control Using Time-Delay Control”. *IFAC-PapersOnLine*. vol. 50, no. 1, pp. 4318-4323, Jul. 2017.

[10] Zhmud V.A., Yadrishnikov O.D., Semibalamut V.M. Control of the objects with a single output and with two or more input channels of influence. *WIT Transaction on Modelling and Simulation*. Vol.59, 2015. WIT Press. [www.witpress.com](http://www.witpress.com), ISSN 1743-355X. P. 147–156.

[11] Quiryne R. “Numerical Simulation Methods for Embedded Optimization”. Ph.D. dissertation, Faculty of Engineering Science., KU Leuven, Leuven, Belgium, 2017. Available: [ftp://ftp.esat.kuleuven.be/pub/SISTA/ida/reports/17-18.pdf](http://ftp.esat.kuleuven.be/pub/SISTA/ida/reports/17-18.pdf).

[12] Ivoilov A. Yu., Zhmud V. A. and Trubin V. G. The tilt angle estimation in the inverted pendulum stabilization task. 2018 Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT). Moscow, 14-16 march, 2018.

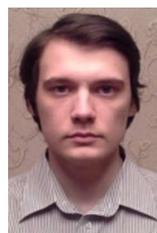
[13] Fedorov D., Ivoilov A., Zhmud V., Trubin V. Development of Deflection Angle Stabilizing System for Balancing Robot. *Journal of Advances in Management Sciences & Information Systems*. – 2015. №1. P. 65–82. ISSN 2371-1647.

[14] Ivoilov A. Y., Zhmud V. A., Trubin V. G., Dimitrov L. V. Detection of unrevealed nonlinearities in the layout of the balancing robot. International Siberian conference on control and communications (SIBCON): proc., Moscow, 12-14 May 2016. – Moscow: IEEE, 2016. – 9 p. - ISBN 2380-6516.

[15] Lebedev S. K., Gnezdov N. E., Kolganov A. R. Dynamic Model Selection For Vector Control Systems of AC Electric Drives. XVI mezhdunarodnaja nauchno-tehnicheskaja konferentsija “Electroprivody peremennogo toka” [XVI International Science Conference “AC Electric Drives”]. Ekaterinburg, 2015.

[16] Ким Д.Р. Алгебраические методы синтеза систем автоматического управления. Физматгиз. М. 2014.

[17] Ivoilov A. Yu., Zhmud V. A. and Roth H. The Dynamic Accuracy Increasing for a Controlling System by Means of the Modified Algorithm of Numerical Optimization of the Regulator. 2018 Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT). Moscow, 2018.



**Андрей Юрьевич Ивойлов** - аспирант кафедры Автоматики НГТУ.

E-mail: [iou13hv@mail.ru](mailto:iou13hv@mail.ru)

630073, Новосибирск, просп. К.Маркса, д. 20



**Вадим Аркадьевич Жмудь** - заведующий кафедрой Автоматики НГТУ, профессор, доктор технических наук.  
E-mail: [oao\\_nips@bk.ru](mailto:oao_nips@bk.ru)

630073, Новосибирск,  
Просп. К. Маркса, д. 20



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

630073, Новосибирск,  
Просп. К. Маркса, д. 20



**Губерт Рот** – Заведующий кафедрой Автоматизированного управления в университете Зигена, профессор, г. Зиген, Германия

E-mail: [hubert.roth@uni-siegen.de](mailto:hubert.roth@uni-siegen.de)

Adolf-Reichwein-Strasse 2, Siegen,  
Germany

Статья получена 14 мая 2018 г.

## Obtaining the Desired form of the Processes of the Stabilizing System of the Two-Wheeled Balancing Robot Based on the Numerical Optimization

A.Yu. Ivoylov<sup>1</sup>, V.A. Zhmud<sup>1</sup>, V.G. Trubin<sup>1</sup>, H. Roth<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia  
<sup>2</sup>Siegen University, Siegen, Germany

*Abstract* - This paper solves the problem of ensuring the desired form of the transient processes of the automatic stabilization system of the two-wheeled balancing robot. It is necessary to choose the distribution of the roots of the desired dynamics polynomial to set the form of the processes of the system. As we deal with a real device, the task of choosing the roots distribution becomes more complicated due to a presence of such nonlinearities as static friction and backlash in actuators, the limitation of the control action, and others. Usually general requirements for the transient processes of the system are used to set the roots distribution. These requirements are maximum level of an overshoot and maximum duration of a transient process. The requirements described above define the sector on the complex plane in which the roots should be placed. But in addition it is necessary to set the distribution inside this sector, and this issue remains open. It is shown in the paper that the roots distribution in accordance with the Newton binomial is not give an acceptable result. In this case there is no ability to correct the transient process form toward more speed or less overshoot value. We propose a method of obtaining the processes with the desired form based of the numerical optimization. This method is based on changing the form of cost function which is used to perform the optimization procedure.

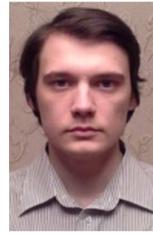
*Key words* - automatic control system, regulator, numerical optimization, adjustment of the regulator coefficients, robot, microcontroller, desired equation of dynamics

### REFERENCES

- [1] Toscano R. A simple robust PI/PID controller design via numerical optimization approach. *Journal of Process Control*. vol. 15, no. 1, pp. 81-88, Feb. 2005.
- [2] Zhmud V.A., Liapidevskiy A.V. The Design of the Feedback Systems by Means of the Modeling and Optimization in the Program VisSim 5.6/6.0 // *Proc. Of The 30th IASTED Conference on Modelling, Identification, and Control ~ AsiaMIC 2010 ~November 24 – 26, 2010 Phuket, Thailand*. P. 27–32.
- [3] Sanchis R., Romero J., Balaguer P. Tuning of PID controllers based on simplified single parameter optimization. *International Journal of Control*. vol. 83, no. 9, P. 1785–1798, Jul. 2010.
- [4] Zhmud V.A., Dimitrov L.V., Yadrishnikov O.D. Calculation of regulators for the problem of mechatronics by means of numerical optimization method. *12th International Conference on Actual Problems on Electronic Instrument Engineering APEIE 2014. Proceedings*.
- [5] Zhmud V. A., Semibalamut V. M., Vostrikov A. S. Feedback systems with pseudo local loops. Testing and measurement: techniques and applications: proc. of the 2015 Intern. Conf. on testing and measurement techniques (TMTA 2015), Thailand, Phuket Island, 16–17 Jan. 2015. – London: CRC Press, 2015. – P. 411–416. - 200 copy. - ISBN 978-1-138-02812-1-8.
- [6] Walton C., Phelps C., Gong Q., Kaminer I. A Numerical Algorithm for Optimal Control of Systems with Parameter Uncertainty. *IFAC-PapersOnLine*. vol. 49, no. 18, pp. 468-475, 2016.
- [7] Diaz-Rodriguez I., Han S., Keel L., Bhattacharyya S. “Advanced Tuning for Ziegler-Nichols Plants”. *IFAC-PapersOnLine*. vol. 50, no. 1, P. 1805–1810, Jul. 2017.
- [8] Zhmud V., Zavorin A. The design of the control system for object with delay and interval-given parameters. *International Siberian conference on control and communications (SIBCON-2015): proc., Omsk, 21–23 May, 2015. – Omsk: IEEE, 2015. – Art. 130 (6 p.). ISBN 978-1-4799-7102-2. - DOI: 10.1109/SIBCON.2015.7147060.*
- [9] M. Jin, J. Lee, P. Chang, M. Kim, S. Kang “Automatic Gain Tuning for Robust PID Control Using Time-Delay Control”. *IFAC-PapersOnLine*. vol. 50, no. 1, pp. 4318-4323, Jul. 2017.
- [10] Zhmud V.A., Yadrishnikov O.D., Semibalamut V.M. Control of the objects with a single output and with two or more input channels of influence. *WIT Transaction on Modelling and Simulation*. Vol.59, 2015. WIT Press. [www.witpress.com](http://www.witpress.com), ISSN 1743-355X. P. 147–156.
- [11] Quiryren R. “Numerical Simulation Methods for Embedded Optimization”. Ph.D. dissertation, Faculty of Engineering Science., KU Leuven, Leuven, Belgium, 2017. Available:

<ftp://ftp.esat.kuleuven.be/pub/SISTA/ida/reports/17-18.pdf>.

- [12] Ivoilov A. Yu, Zhmud V. A. and Trubin V. G. The tilt angle estimation in the inverted pendulum stabilization task. 2018 Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT). Moscow, 14-16 march, 2018.
- [13] Fedorov D., Ivoilov A., Zhmud V., Trubin V. Development of Deflection Angle Stabilizing System for Balancing Robot. Journal of Advances in Management Sciences & Information Systems. – 2015. №1. P. 65–82. ISSN 2371-1647.
- [14] Ivoilov A. Y., Zhmud V. A., Trubin V. G., Dimitrov L. V. Detection of unrevealed non-linearities in the layout of the balancing robot. International Siberian conference on control and communications (SIBCON): proc., Moscow, 12-14 May 2016. – Moscow: IEEE, 2016. – 9 p. - ISBN 2380-6516.
- [15] Lebedev S. K., Gnezdov N. E., Kolganov A. R. Dynamic Model Selection For Vector Control Systems of AC Electric Drives. XVI mezhdunarodnaja nauchno-tekhnicheskaja konferentsija "Electroprivody peremennogo toka" [XVI International Science Conference "AC Electric Drives"]. Ekaterinburg, 2015.
- [16] Kim D.P. Algebraicheskiye metody siteza sistem avtomaticheskogo upravlenija (Algebraic synthesis methods of the automatic control systems), Moscow, Russia: FIZMATLIT, 2014.
- [17] Ivoilov A. Yu., Zhmud V. A. and Roth H. The Dynamic Accuracy Increasing for a Controlling System by Means of the Modified Algorithm of Numerical Optimization of the Regulator. 2018 Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT). Moscow, 2018.



**Andrey Yurievich Ivoilov** – PhD-student of Department of Automatics of NSTU.

**E-mail:** [iau13hv@mail.ru](mailto:iau13hv@mail.ru)

630073, Novosibirsk,  
srt. Prosp. K. Marksa, h. 20



**Vadim Arkadievich Zhmud** – Head of the Department of Automation in NSTU, Professor, Doctor of Technical Sciences.

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

630073, Novosibirsk,  
str. Prosp. K. Marksa, h. 20



**Vitaly Gennadievich Trubin** - head of the department. lab. Automatics Department of NSTU, Director of KB Automatics.

**E-mail:** [trubin@ngs.ru](mailto:trubin@ngs.ru)



**Hubert Roth** – Head of the Department of Automatic Control Engineering of University of Siegen, Professor, Doctor of Sci., **Germany**

**E-mail:** [hubert.roth@uni-siegen.de](mailto:hubert.roth@uni-siegen.de)

Adolf-Reichwein-Strasse 2, Siegen,  
Germany

The paper was received on 14 May, 2018.