

ИНФОРМАТИКА,  
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА  
И УПРАВЛЕНИЕ

INFORMATICS,  
COMPUTER ENGINEERING  
AND CONTROL

УДК 681.5

DOI: 10.17212/1814-1196-2018-2-7-22

## **О выборе частоты дискретизации системы балансировки двухколесного робота\***

**А.Ю. ИВОЙЛОВ<sup>1</sup>, В.А. ЖМУДЬ<sup>2</sup>, В.Г. ТРУБИН<sup>3</sup>, Г.В. САБЛИНА<sup>4</sup>**

<sup>1</sup> 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, аспирант кафедры автоматики. E-mail: [ivojlov@corp.nstu.ru](mailto:ivojlov@corp.nstu.ru)

<sup>2</sup> 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, доктор технических наук, заведующий кафедрой автоматики. E-mail: [zhmud@corp.nstu.ru](mailto:zhmud@corp.nstu.ru)

<sup>3</sup> 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, старший преподаватель. E-mail: [trubin@ngs.ru](mailto:trubin@ngs.ru)

<sup>4</sup> 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, кандидат технических наук, доцент. E-mail: [sablina@corp.nstu.ru](mailto:sablina@corp.nstu.ru)

В статье рассматривается вопрос выбора частоты дискретизации системы автоматического управления на примере системы автоматической стабилизации двухколесного балансирующего робота. Решаются задачи снижения потребления энергии устройством и повышения качества процессов в системе. В ходе работы проводится анализ процессов в системе, который показывает, что качество процессов в реальном устройстве хуже, чем предсказывает моделирование. Кроме того, при работе системы балансировки робота наблюдаются значительные пульсации тока в обмотках его двигателей, что является причиной высокого потребления энергии. В результате выдвинуто предположение, что причиной этих отрицательных эффектов является неоптимальный выбор частоты дискретизации системы управления. Далее в работе исследуется влияние значения этой частоты на качество работы устройства. Показано, что выбор недостаточно высокого значения частоты дискретизации приводит к искусственному ограничению частоты шума датчика угла наклона, что при высоком коэффициенте усиления системы приводит к броскам тока и момента в двигателях. Этот эффект эквивалентен снижению несущей частоты ШИМ при управлении двигателем. Данный вывод подтверждается численным моделированием системы и экспериментальными данными. Далее в статье приводится пример реализации системы с повышенной частотой дискретизации на микроконтроллере семейства STM32 с использованием МЭМС-гироскопа MPU6050. Показано, что выбранное значение частоты дискретизации можно реализовать на практике. Проведено измерение энергопотребления устройства, показавшее, что пульсации тока, а следовательно, и момента снизились практически в 10 раз. Кроме того, уменьшилась амплитуда автоколебаний. Таким образом, описанная в работе методика позволила решить поставленные задачи.

---

\* Статья получена 19 марта 2018 г.

**Ключевые слова:** частота дискретизации, теория автоматического управления, ПИД-регулятор, робот, балансирующий робот, МЭМС-датчик, гироскоп, ШИМ, двигатель постоянного тока

## ВВЕДЕНИЕ

В данной статье рассматривается вопрос выбора частоты дискретизации регулятора, применяемого в системе автоматической стабилизации двухколесного балансирующего робота. При реализации регулятора в устройстве на базе микроконтроллера период его дискретизации обычно выбирается таким образом, чтобы его значение было много меньше значения наименьшей постоянной времени объекта. При соблюдении этого условия уравнения динамики объекта управления можно считать непрерывными при расчете системы стабилизации. Следует отметить, что аналогичное условие справедливо и при выборе шага интегрирования при моделировании процессов на ПК. Кроме того, при расчете систем автоматического управления допустимо при некоторых условиях пренебрегать малыми инерционностями (процессами с малыми постоянными времени) объекта управления. Основным условием в данном случае является устойчивость быстрых процессов в замкнутой системе [1]. Из этого следует, что при реализации системы управления в реальном устройстве при выборе частоты дискретизации объекта управления необходимо учитывать влияние инерционностей, которыми было допустимо пренебречь в непрерывной системе. В противном случае поведение устройства будет отличаться от расчетного. При этом возможно появление различных отрицательных эффектов – от увеличения энергопотребления и возникновения автоколебаний до полной потери устойчивости. В нелинейных системах влияние этих эффектов может быть еще сильнее.

## 1. 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.

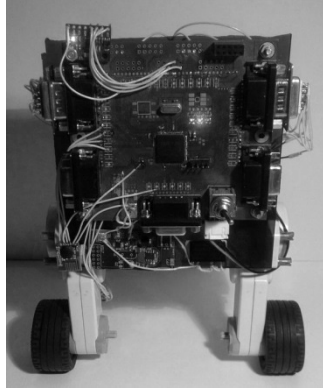


Рис. 1. Внешний вид робота

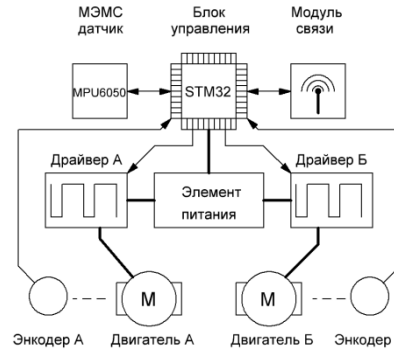


Рис. 2. Структурная схема устройства

Для оценки угла отклонения робота от вертикали применяется измерительный модуль MPU6050, который содержит два трехосевых МЭМС-датчика – акселерометр и гироскоп. На практике в системе стабилизации робота в настоящее время применяется только гироскоп [2]. Подробная информация об особенностях работы и применения модуля MPU6050 приведена в работах [2, 3].

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 также блоки проводной и беспроводной передачи данных. Питание устройства осуществляется от двух Li-Ion-аккумуляторов с суммарным напряжением 8.4 В.

## 2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассмотрим процессы в системе стабилизации балансирующего робота. На рис. 3 приведена структурная схема системы управления. Подробно выбор структуры и расчет системы управления приведен в работе [2], здесь же приведем лишь выражения для передаточных функций в схеме и численные значения параметров системы:

$$W_{\phi}(p) = \frac{k_0 p}{p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0}; \quad (1)$$

$$W_{\alpha}(p) = k_{\alpha} \frac{p^2 + b_0}{p^2}; \quad (2)$$

$$W_K(p) = \frac{K_d p^2 + K_p p + K_i}{p}; \quad (3)$$

$$W_H(p) = \frac{H_p p^2 + H_i p + H_{ii}}{p^2}. \quad (4)$$

Таблица 1

Численные значения параметров системы

$k_o$	$a_0$	$a_1$	$a_2$	$k_a$	$b_0$	$K_i$	$K_p$	$K_d$	$H_{ii}$	$H_i$	$H_p$
-2.8	-490	-52.3	9.9	-7.07	-49.5	-4040	-1170	-33.6	-2.55	-10.3	-15.8

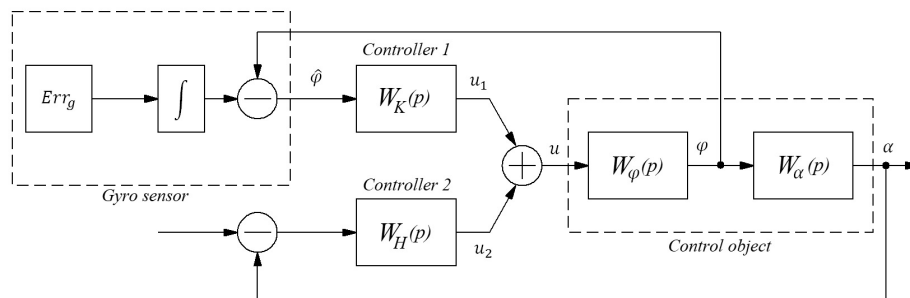


Рис. 3. Структурная схема системы управления

На рис. 4–6 приведены графики процессов, протекающих в реальном устройстве и рассчитанных путем моделирования на ПК (кривые *real data* и *simulation* соответственно). Отметим, что кривая угла наклона робота (рис. 4) соответствует показаниям МЭМС-датчика (гироскопа). Значение угла наклона постепенно «уплывает» из-за дрейфа нуля гироскопа, однако описанная структура системы управления позволяет компенсировать этот недостаток. Как следствие, угол отклонения самого устройства остается близким к нулю, что видно из рис. 5 – угол поворота колеса с течением времени не возрастает, а выходит на некоторое постоянное значение. Подробно особенности данной системы описаны в работе [2]. Кроме того, на рис. 6 добавлен дополнительный график *filtered data*, полученный в результате фильтрации управляющего воздействия уже после получения данных от робота. Данный график позволяет сравнить форму управляющего воздействия, рассчитанного системой управления робота, и аналогичного сигнала, полученного при моделировании. График добавлен, поскольку исходный сигнал управления робота сильно зашумлен.

Из графиков видно, что количественно процессы достаточно близки, однако имеется отличие: в процессах реального устройства возникают автоколебания. Причиной возникновения автоколебаний в первую очередь является наличие нелинейностей в реальном устройстве – люфта редуктора двигателей, а также нелинейность двигателей вида «зона нечувствительности», вызванная наличием сухого трения вала редуктора. Кроме того, при работе устройства наблюдается существенный нагрев обмоток двигателей. Это означает, что через обмотки двигателей протекает существенный по величине ток.

На рис. 7 приведена осциллограмма тока в обмотках двигателя при работе устройства (*device current*). Для сравнения на график добавлена кривая тока при переходном процессе, возникающем при подаче на двигатель ступенчатого напряжения со скважностью 100 % (*step response*). Это позволяет оценить величину пульсаций тока при работе устройства относительно величины пускового тока (пиковое значение кривой *step response*). Из рисунка видно, что величина пульсаций тока составляет 50...70 % величины пускового тока.

Поскольку величина момента, развиваемого двигателем постоянного тока, пропорциональна величине тока, протекающего в его обмотках [5–7], пульсации тока, видимые на осциллограмме, приводят к пульсациям момента. Данное обстоятельство в условиях нелинейностей, описанных выше, приводит к еще большему увеличению амплитуды автоколебаний.

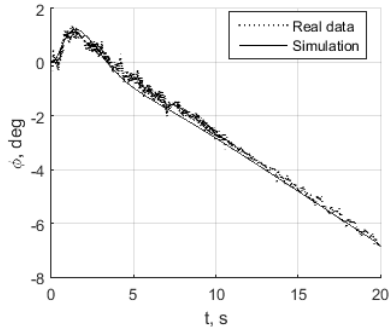


Рис. 4. График изменения угла наклона устройства

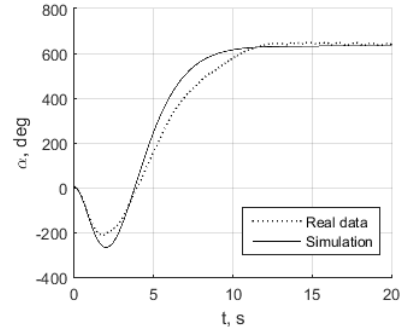


Рис. 5. График изменения угла поворота колеса

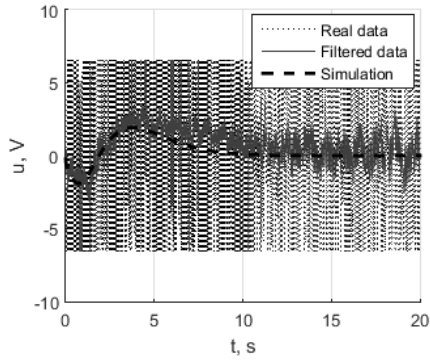


Рис. 6. График изменения управляющего воздействия (напряжения)

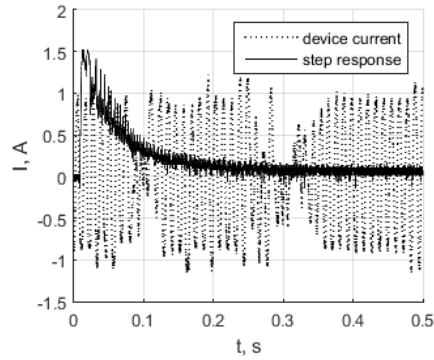


Рис. 7. Пульсации тока в обмотках двигателя при работе устройства

При расчете системы автоматического управления применялась следующая математическая модель объекта [2, 8]:

$$(mL^2 + J_p)\ddot{\phi} + mRL\ddot{\psi} = mgL\phi + 2M ; \quad (5)$$

$$mRL\ddot{\phi} + mR^2\ddot{\psi} = M ; \quad (6)$$

$$(J_p + J_m)\ddot{\alpha} = \frac{K_m}{R_m}U - \frac{K_m K_e}{R_m}\dot{\alpha} - M ; \quad (7)$$

$$\alpha = \psi - \phi . \quad (8)$$

Физический смысл параметров этой модели представлен в табл. 2. Для расчета системы данная модель была преобразована к уравнениям переда-

точных функций (1) и (2). Соотношения между параметрами уравнений (1), (2) и параметрами уравнений (5)–(8) приведены ниже.

Таблица 2

**Физический смысл и численные значения параметров модели**

Параметр	Обозначение	Значение	Единица измерения
Масса платформы	$m$	0.5	кг
Расстояние от центра масс до точки подвеса	$L$	0.1	м
Радиус колеса	$R$	0.02	м
Ускорение свободного падения	$g$	9.8	м/с <sup>2</sup>
Момент инерции платформы относительно точки подвеса	$J_p$	0.0015	кг · м <sup>2</sup>
Момент инерции валов двигателей	$J_m$	0.0015	кг · м <sup>2</sup>
Коэффициент передачи ток – момент двигателя	$K_m$	0.3	Н · м/А
Коэффициент передачи напряжение – частота вращения	$K_e$	0.5	В · с/рад
Сопrotивление обмоток двигателя	$R_m$	5	Ом
Угол отклонения робота от вертикали	$\varphi$	–	рад
Угол поворота колеса	$\psi$	–	рад
Напряжение, приложенное к обмоткам двигателя	$U$	–	В
Момент, приложенный двигателем к платформе	$M$	–	Н · м

Таблица 3

**Соотношения параметров исходной и преобразованной моделей**

Промежуточные параметры	Преобразованная модель
$k_1 = mL^2 + 3mRL + 2mR^2 + J_p$	$a_0 = \frac{-k_3k_6}{k_2k_4 - k_1k_5}$
$k_2 = mRL + 2mR^2$	$a_1 = \frac{k_3k_5}{k_2k_4 - k_1k_5}$
$k_3 = mgL$	$a_2 = \frac{k_1k_6}{k_2k_4 - k_1k_5}$
$k_4 = mRL + mR^2$	$k_0 = \frac{k_2k_7}{k_2k_4 - k_1k_5}$
$k_5 = mR^2 + J_p + J_m$	$b_0 = -\frac{k_3}{k_1}$
$k_6 = -\frac{K_mK_e}{R_m}$	$k_\alpha = -\frac{k_1}{k_2}$
$k_7 = \frac{K_m}{R_m}$	

Уравнение (7) в данной модели представляет собой уравнение динамики двигателя постоянного тока, и это уравнение не учитывает влияние индуктивности обмоток двигателя:

$$(J_p + J_m)\ddot{\alpha} = \frac{K_m}{R_m}U - \frac{K_mK_e}{R_m}\dot{\alpha} - L\frac{di}{dt} - M_L. \quad (9)$$

Данной составляющей при расчете непрерывной системы можно пренебречь, поскольку электромагнитная постоянная времени двигателя более чем в 50 раз меньше электромеханической, что показывает рис. 8. Пунктиром обозначена быстрая часть процесса (*fast part*), сплошной линией – медленная (*slow part*).

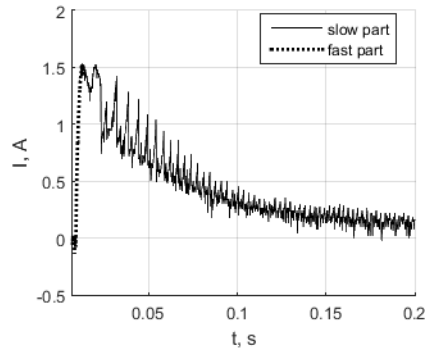


Рис. 8. Переходный процесс тока двигателя

Значения постоянных времени, полученные в результате аппроксимации переходного процесса тока суммой экспонент, следующие:

$$T_3 = 1,5 \text{ мс} ; \quad (10)$$

$$T_M = 100 \text{ мс} . \quad (11)$$

При реализации регулятора в реальной системе управления было принято следующее значение частоты дискретизации регулятора:

$$f_d = 1 \text{ кГц} . \quad (12)$$

Однако при этом не было учтено влияние электромагнитной постоянной времени двигателей.

Таким образом, можно сделать следующее предположение: одной из причин появления автоколебаний и нагрева обмоток двигателей является пульсация тока в обмотках, вызванная выбором неоптимального значения частоты дискретизации регулятора.

### 3. ВЫБОР ЧАСТОТЫ ДИСКРЕТИЗАЦИИ РЕГУЛЯТОРА

Рассмотрим способ управления двигателями постоянного тока, применяемый в устройстве. Способ управления основан на использовании широтно-импульсной модуляции (ШИМ) напряжения, прикладываемого к обмоткам двигателя. Идея управления заключается в использовании индуктивных свойств обмоток двигателя для сглаживания пульсаций тока, протекающего через них. Для того чтобы обеспечить реверсивное управление вращением вала двигателя, в устройстве применяется мостовая схема [9, 10]. Выбор несущей частоты ШИМ определяется электромагнитной постоянной времени двигателя: период ШИМ должен быть много меньше этой постоянной. Исхо-

для из значений постоянных времени двигателя, полученных ранее (см. рис. 8 и выражения (10) и (11)), было выбрано значение несущей частоты ШИМ, равное 10 кГц. На рис. 9 приведены осциллограммы тока при действии ШИМ напряжения различной несущей частоты. Из этого рисунка видно, что при частоте 1 кГц уровень пульсации тока в обмотках значителен, во втором же случае пульсации тока практически незаметны. Скважность ШИМ в обоих случаях составляет 50 %.

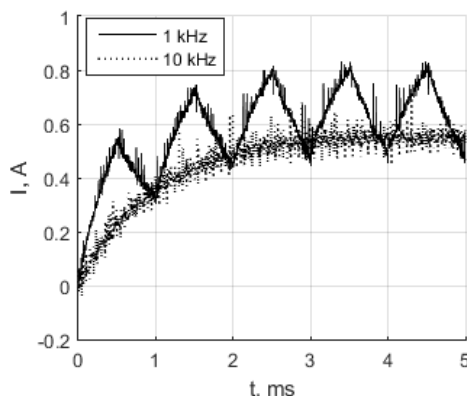


Рис. 9. Осциллограммы тока при значениях несущей частоты ШИМ 1 и 10 кГц со скважностью 50 %

Рассмотрим теперь подробнее особенности реализации системы управления роботом. В системе применяются два вида датчиков. Датчик-гироскоп MPU6050 измеряет угловую скорость – производную угла наклона робота. Встроенные в двигатели энкодеры позволяют получить значение угла поворота колеса. Показания этих датчиков поступают на регуляторы *Controller 1* и *Controller 2* соответственно. Эти регуляторы реализованы цифровым способом в управляющей программе устройства. Управляющее воздействие представляет собой сумму выходных величин регуляторов.

Из рис. 6 видно, что управляющее воздействие, рассчитанное системой управления, сильно зашумлено. На некоторых участках оно принимает релейный характер. Это говорит о том, что расчетное значение управляющего воздействия значительно превышает максимально возможный уровень. Этот уровень ограничен напряжением элемента питания, которое составляет 8.4 В, и свойствами двигателя. Тем не менее устройство сохраняет работоспособность. Это означает, что сам объект управления выступает в роли фильтра низких частот. Причина такого поведения управляющего воздействия состоит в том, что шум с датчика угловой скорости (производной угла наклона) усиливается регулятором и проникает в управляющий сигнал. Это видно из рис. 4 и 5, сигнал угла наклона сильно зашумлен, в то время как сигнал угла поворота практически не содержит шумов. Таким образом, причиной шума сигнала управления является именно шум датчика угловой скорости.

Несмотря на достаточно высокий уровень помехи сигнала управления, ее действие на систему может быть нейтрализовано сглаживающими свойствами обмоток двигателя, если ее частота будет достаточно высока. То есть



в случае с помехой действует тот же принцип, что при управлении с помощью ШИМ. Однако частота помехи определяется не только частотой помехи непосредственно датчика, но и частотой, с которой происходит выборка его показаний, – частотой дискретизации регулятора в нашем случае. Частота помехи датчика угловой скорости искусственно ограничивается частотой дискретизации, а значит, влияние этой помехи на ток в обмотках двигателя эквивалентно тому, как если бы значение несущей частоты ШИМ было бы равным 1 кГц. Это означает, что частота дискретизации является неоптимальной (рис. 10).

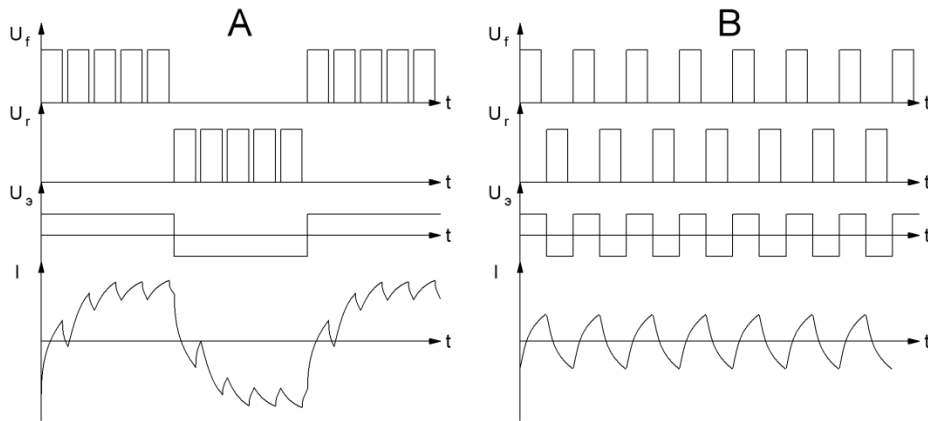


Рис. 10. Форма тока при низкой (А) и высокой (В) частоте дискретизации:

$U_f$ ,  $U_r$  – напряжения на «прямом» и «обратном» каналах ШИМ;  $U_a$  – величина эквивалентного напряжения на обмотках двигателя;  $I$  – ток, протекающий через обмотки

Для наглядности проведем следующий численный эксперимент. Схема моделируемой системы представлена на рис. 11. Данная система представляет собой простейшую систему управления скоростью двигателя постоянного тока, основанную на пропорциональном регуляторе. Модель двигателя реализована в соответствии с уравнением (9). При моделировании датчик скорости двигателя считается безынерционным, однако к его показаниям добавлен сигнал шума. Проведем два опыта. В первом случае сигнал управления на двигатель подается с частотой интегрирования модели (10 кГц), во втором случае эта частота искусственно снижена в 10 раз. Результаты моделирования приведены на рис. 12 и 13. Из рис. 13 видно, что во втором случае ток имеет большую величину пульсаций, чем в первом.

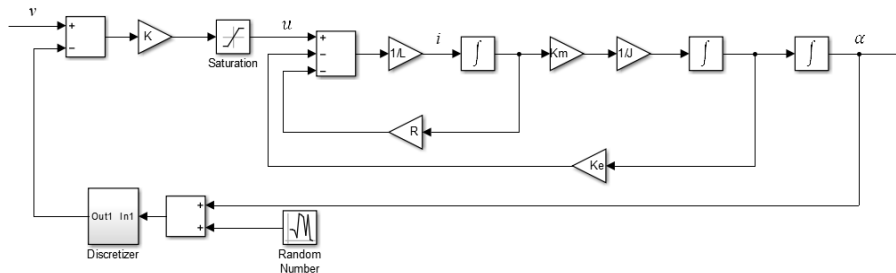


Рис. 11. Схема численного эксперимента

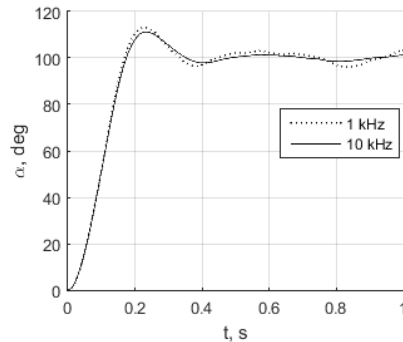


Рис. 12. Результаты численного эксперимента: угол поворота вала двигателя

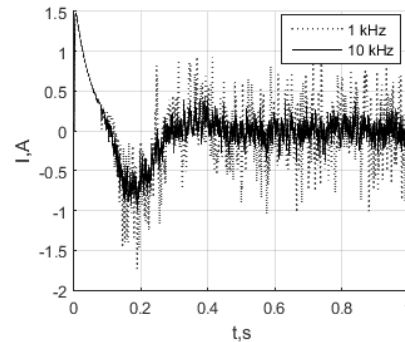


Рис. 13. Результаты численного эксперимента: ток обмоток двигателя

Итак, очевидно, что выбранное значение частоты дискретизации мало, его необходимо увеличить.

#### 4. ОСОБЕННОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ НА МИКРОКОНТРОЛЛЕРЕ

Как было сказано выше, в качестве датчика угловой скорости в устройстве применяется измерительный модуль MPU6050, включающий два трех-осевых МЭМС-датчика – акселерометр и гироскоп. Подробно особенности работы с этим датчиком рассмотрены в работах [4, 11, 12]. Согласно технической документации [13, 14], максимально возможная частота работы гироскопа составляет 8 кГц, акселерометра – 1 кГц. В рассматриваемой системе управления не используются показания акселерометра (подробнее см. в работах [2] и [3]), используются только показания по одной из осей гироскопа. Следовательно, для получения необходимых данных за один шаг управления достаточно получить показания по этой оси. Рассчитаем время, необходимое для получения показаний по одной оси по интерфейсу  $I^2C$ . Согласно документации [13], для этого необходимо установить адрес регистра оси, после чего прочитать два байта данных. Поскольку в первом случае применяется запрос на запись, а во втором – запрос на чтение, в соответствии с протоколом  $I^2C$  необходимо дважды отправить  $I^2C$ -адрес датчика. Полная диаграмма запроса приведена на рис. 14. Таким образом, полное время, необходимое на чтение показаний, можно оценить как 50 периодов сигнала  $SCL$ . При максимально допустимой частоте  $SCL$ , равной 400 кГц [13], это время составит 125 мкс, что соответствует частоте выборки в 8 кГц. Следовательно, реализация регулятора с частотой дискретизации 8 кГц возможна, хотя для этого может потребоваться поднять частоту сигнала  $SCL$  на 5...10 %, так как даже при работе на прерываниях микроконтроллер будет тратить часть времени на вызов обработчиков прерываний и их выполнение. Например, при использовании микроконтроллера STM32F205 с частотой ядра в 120 МГц [15] успешное чтение данных с частотой выборки в 8 кГц достижимо при повышении частоты сигнала  $SCL$  до 410 кГц, т. е. всего на 2.5 %.

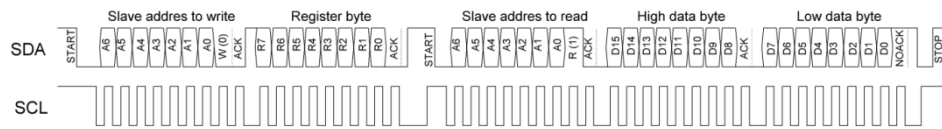


Рис. 14. Диаграмма обмена данными по  $I^2C$  при чтении слова данных MPU6050

## 5. СИСТЕМА С ПОВЫШЕННОЙ ЧАСТОТОЙ ДИСКРЕТИЗАЦИИ

На рис. 15–19 представлены результаты работы системы с повышенной частотой дискретизации в сравнении исходной системой. На рис. 15 приведен график тока, потребляемого устройством. Как видно из рисунка, пульсации тока существенно уменьшились, что привело к снижению интенсивности нагрева обмоток двигателя. На рис. 16 представлен график интеграла тока (электрический заряд). Данный график дает представление о потреблении устройством энергии от элемента питания. Численные значения среднего тока потребления и заряда за период работы устройства (30 секунд) приведены в табл. 4. Эти данные позволяют сделать вывод, что повышение частоты дискретизации позволило сократить расход энергии почти в 10 раз. Из рис. 18 также видно, что в системе с повышенной частотой дискретизации помимо снижения расхода энергии также наблюдается некоторое снижение амплитуды автоколебаний (в 1,5–2 раза). Процесс угла наклона при этом практически не претерпел изменений (рис. 17). Таким образом, выдвинутое в разделе 1 предположение оказалось верным. Повышение частоты дискретизации приводит к существенному выигрышу в энергопотреблении, а также к некоторому повышению качества процессов.

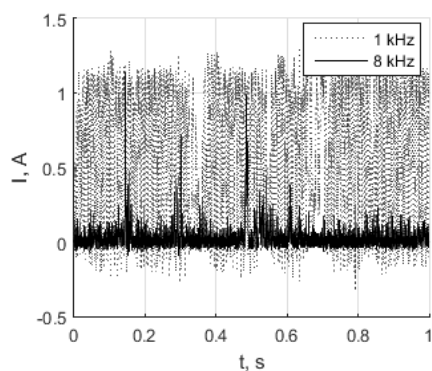


Рис. 15. Осциллограммы тока потребления роботом при частотах дискретизации 1 и 8 кГц

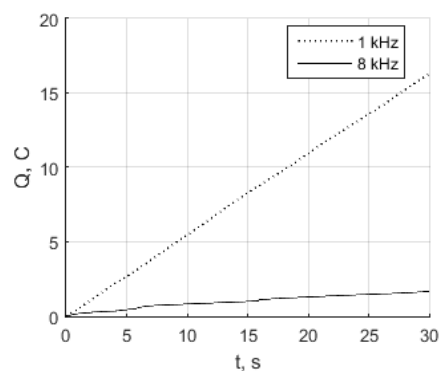


Рис. 16. Расход тока в системе за 30 секунд при частотах дискретизации 1 и 8 кГц

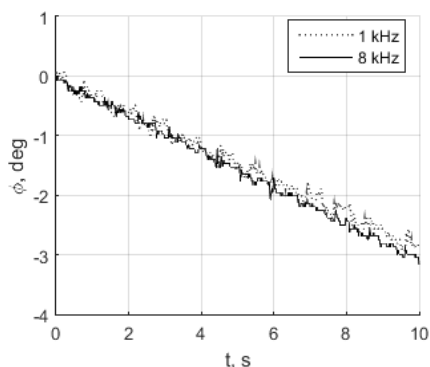


Рис. 17. Угол наклона робота при частотах дискретизации 1 и 8 кГц

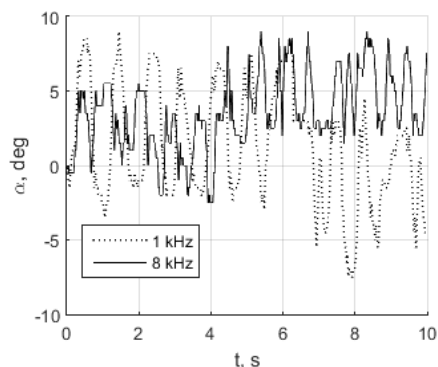


Рис. 18. Угол поворота колеса робота при частотах дискретизации 1 и 8 кГц

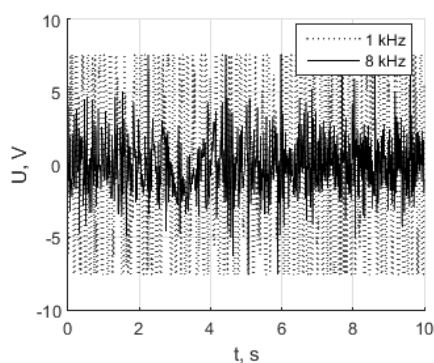


Рис. 19. Напряжение, приложенное к обмоткам двигателей при частотах дискретизации 1 и 8 кГц

Таблица 4

Показатели энергопотребления робота при частотах дискретизации 1 и 8 кГц

Частота дискретизации, кГц	Средний ток потребления, мА	Расход тока за 30 с, Кл (мА · ч)
1	540	16,3 (4,5)
8	56	1,67 (0,46)

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование влияния частоты дискретизации цифровой системы на поведение устройства показало, что задача выбора значения этой частоты играет важную роль, особенно в тех случаях, где необходимо получить высокое качество процессов в устройстве. При выборе значения частоты дискретизации необходимо учитывать влияние таких факторов, как наличие быстрых процессов в двигателе, особенности его схемы управления, полоса пропускания датчика и др. В исходной системе возможности датчика угловой скорости были использованы недостаточно эффективно, в результате чего его

полоса пропускания была искусственно ограничена. Повышение частоты дискретизации системы с 1 до 8 кГц позволило эффективнее использовать фильтрующие свойства объекта управления. Реализация системы управления с высоким значением частоты дискретизации сопряжена с определенными техническими трудностями, однако современные микроконтроллеры позволяют решать такие задачи, что было показано на примере микроконтроллера семейства STM32. Модифицированная система управления позволила получить более качественные переходные процессы в системе, снизив амплитуду автоколебаний и расход энергии элементов питания.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Востриков А.С., Французова Г.А., Гаврилов Е.Б. Основы теории непрерывных и дискретных систем регулирования: учебное пособие. – 5-е изд. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2008. – 476 с.
2. Ivoilov A.Yu., Zhmud V.A., Trubin V.G. The tilt angle estimation in the inverted pendulum stabilization task // Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT): proceedings, Moscow, March 14–16, 2018. – Moscow, 2018.
3. Ивойлов А.Ю. О применении МЭМС-датчиков при разработке системы автоматической стабилизации двухколесного робота // Сборник научных трудов НГТУ. – 2017. – № 3 (89). – С. 32–51.
4. Использование измерительной системы MPU 6050 для определения угловых скоростей и линейных ускорений / Д.С. Федоров, А.Ю. Ивойлов, В.А. Жмудь, В.Г. Трубин // Автоматика и программная инженерия. – 2015. – № 1 (11). – С. 75–80.
5. Вольдек А.И., Попов В.В. Электрические машины. Введение в электромеханику. Машины постоянного тока и трансформаторы: учебник для вузов. – СПб.: Питер, 2008. – 320 с.
6. Усольцев А.А. Электрические машины: учебное пособие. – СПб.: НИУ ИТМО, 2013. – 416 с.
7. Кулик Ю.А. Электрические машины. – М.: Высшая школа, 1966. – 362 с.
8. Формальский А.М. Управление движением неустойчивых объектов. – М.: Физматлит, 2012. – 232 с. – ISBN 978-5-9221-1460-8.
9. Schweber B. Basics of MOSFETs and IGBTs for Motor Control [Electronic resource]. – URL: <https://eu.mouser.com/applications/industrial-motor-control-mosfets/> (accessed: 21.05.2018).
10. Key MOSFET parameters for Motor Control applications [Electronic resource]. – URL: <https://www.diodes.com/assets/App-Note-Files/AN1102.pdf> (accessed: 21.05.2018).
11. Development of deflection angle stabilizing system for balancing robot / D. Fedorov, A. Ivoilov, V. Zhmud, V. Trubin. // Journal of Advances in Management Sciences & Information Systems. – 2015. – N 1. – P. 65–82.
12. Разработка системы стабилизации угла отклонения балансирующего робота / Д.С. Федоров, А.Ю. Ивойлов, В.А. Жмудь, В.Г. Трубин // Автоматика и программная инженерия. – 2015. – № 2 (12). – С. 16–34.
13. MPU-6000 and MPU-6050 Product Specification. Revision 3.4 [Electronic resource]. – URL: [https://store.invensense.com/datasheets/invensense/MPU-6050\\_DataSheet\\_V3%204.pdf](https://store.invensense.com/datasheets/invensense/MPU-6050_DataSheet_V3%204.pdf) (accessed: 21.05.2018).
14. MPU-6000 and MPU-6050 Register Map and Descriptions. Revision 4.2 [Electronic resource]. – URL: <https://www.invensense.com/wp-content/uploads/2015/02/MPU-6000-Register-Map1.pdf> (accessed: 21.05.2018).
15. STM32F205xx. STM32F207xx. Datasheet – production data [Electronic resource]. – URL: <http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/datasheet/bc/21/42/43/b0/f3/4d/d3/CD00237391.pdf/files/CD00237391.pdf/jcr:content/translations/en.CD00237391.pdf> (accessed: 21.05.2018).

*Ивойлов Андрей Юрьевич*, аспирант кафедры автоматики Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – системы автоматического управления, перевернутый маятник, робототехника. Имеет 15 публикаций. E-mail: [ivojlov@corp.nstu.ru](mailto:ivojlov@corp.nstu.ru)

*Жмудь Вадим Аркадьевич*, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой автоматики Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – автоматика, автоматизация технологических процессов, информатика. Имеет более 200 публикаций. E-mail: [zhmud@corp.nstu.ru](mailto:zhmud@corp.nstu.ru)

*Трубин Виталий Геннадьевич*, старший преподаватель кафедры автоматики Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – разработка цифровых систем управления. Имеет более 50 публикаций. E-mail: [trubin@ngs.ru](mailto:trubin@ngs.ru)

*Саблина Галина Владимировна*, кандидат технических наук, доцент. Основное направление научных исследований – стабилизация электромеханических колебательных систем с неустойчивыми вырожденными движениями. Имеет более 40 публикаций. E-mail: [sablina@corp.nstu.ru](mailto:sablina@corp.nstu.ru)

DOI: 10.17212/1814-1196-2018-2-7-22

### ***On the choice of the sampling frequency of A two-wheeled robot balancing system\****

*A.YU. IVOILOV<sup>1</sup>, V.A. ZHMUD<sup>2</sup>, V.G. TRUBIN<sup>3</sup>, G.V. SABLINA<sup>4</sup>*

<sup>1</sup> *Novosibirsk State Technical University, 20, K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, PhD student at the automation department. E-mail: [ivojlov@corp.nstu.ru](mailto:ivojlov@corp.nstu.ru)*

<sup>2</sup> *Novosibirsk State Technical University, 20, K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, D. Sc. (Eng.), head of the automation department. E-mail: [zhmud@corp.nstu.ru](mailto:zhmud@corp.nstu.ru)*

<sup>3</sup> *Novosibirsk State Technical University, 20, K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, assistant professor. E-mail: [trubin@ngs.ru](mailto:trubin@ngs.ru)*

<sup>4</sup> *Novosibirsk State Technical University, 20, K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, PhD (Eng.), associate professor. E-mail: [sablina@corp.nstu.ru](mailto:sablina@corp.nstu.ru)*

The issue of choosing the sampling frequency of an automatic control system is considered in this paper. An automatic stabilization system of a two-wheeled balancing robot is used as an example. The problems of reducing the device power consumption and improving the quality of the system processes are solved. In the course of work an analysis of the system processes which shows that the quality of real device processes is worse than it was predicted by modeling is carried out. Moreover, a significant ripple of the current in windings of the device motor is present during the operation of the robot balancing system. This causes high power consumption. As a result an assumption that the cause of these negative effects is a non-optimal choice of the control system sampling frequency is made. The influence of the value of this frequency on the system operation quality is also studied in the paper. It is shown that if the selected value of the frequency is not high enough, the noise bandwidth of the tilt angle sensor is artificially limited. This leads to current and torque surges in the motors if the system gain coefficient is high. This effect is equivalent to reducing the PWM carrier frequency in the motor control. This conclusion is proved by the numerical simulation of the system and the experimental data. Further, an example of the implementation of the system with an increased frequency using the microcontroller of the STM32 family and the MPU6050 MEMS gyro sensor is given in the paper. It is shown that the selected value of the sampling frequency can be realized in practice. The analysis is completed by measuring the device power consumption. The measurement shows that the ripple of current and hence of torque is decreased almost 10 times.

---

\* Received 19 March 2018.

Besides, the limit cycle amplitude of the tilt angle is decreased. Thus, the solution proposed in the paper made it possible to solve the problems.

**Keywords:** sampling frequency, theory of automatic control, PID controller, balancing robot, MEMS sensors, gyroscope, PWM, DC motor

## REFERENCES

1. Vostrikov A.S., Frantsuzova G.A., Gavrilov E.B. *Osnovy teorii nepreryvnykh i diskretnykh sistem regulirovaniya* [Principles of the theory of continuous and discrete control systems]. 5th ed. Novosibirsk, NSTU Publ., 2008. 476 p.
2. Ivoilov A.Yu., Zhmud V.A., Trubin V.G. The tilt angle estimation in the inverted pendulum stabilization task. Proceedings of Siberian Conference on Control and Communications (Sibcon-2018). 14–16 march 2018, Moscow. *Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT): proceedings*, Moscow, March 14–16, 2018.
3. Ivoilov A.Yu. O primeneni MEMS-datchikov pri razrabotke sistemy avtomaticheskoi stabilizatsii dvukhkollesnogo robota [About the application of MEMS sensors in the development of two-wheeled robot automatic stabilization system]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2017, no. 3 (89), pp. 32–51.
4. Fedorov D.S., Ivoilov A.Yu., Zhmud V.A., Trubin V.G. Ispol'zovanie izmeritel'noi sistemy MPU 6050 dlya opredeleniya uglovykh skorostei i lineinykh uskorenii [Using of measuring system MPU6050 for the determination of the angular velocities and linear accelerations]. *Avtomatika i programnaya inzheneriya – Automatics & Software Enginery*, 2015, no. 1 (11), pp. 75–80.
5. Vol'dek A.I., Popov V.V. *Elektricheskie mashiny. Vvedenie v elektromekhaniku. Mashiny postoyannogo toka i transformatory* [Electric machines. Introduction to electrical engineering. DC electric machines and transformers]. St. Petersburg, Piter Publ., 2008. 320 p.
6. Usol'tsev A.A. *Elektricheskie mashiny* [Electric machines]. St. Petersburg, NIU ITMO Publ., 2013. 416 p.
7. Kulik Yu.A. *Elektricheskie mashiny* [Electric machines]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1966. 362 p.
8. Formal'skii A.M. *Upravlenie dvizheniem neustoiichivyykh ob"ektov* [The control of unstable object movement]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2012. 232 p. ISBN 978-5-9221-1460-8.
9. Schweber B. *Basics of MOSFETs and IGBTs for motor control*. Available at: <https://eu.mouser.com/applications/industrial-motor-control-mosfets/> (accessed 21.05.2018).
10. *Key MOSFET parameters for Motor Control applications*. Available at: <https://www.diodes.com/assets/App-Note-Files/AN1102.pdf> (accessed 21.05.2018).
11. 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, no. 1, pp. 65–82.
12. Fedorov D.S., Ivoilov A.Yu., Zhmud V.A., Trubin V.G. Development of deflection angle stabilizing system for balancing robot. *Automatics & Software Enginery*, 2015, no. 12 (2), pp. 16–34.
13. *MPU-6000 and MPU-6050 Product Specification. Revision 3.4*. Available at: [https://store.invensense.com/datasheets/invensense/MPU-6050\\_DataSheet\\_V3%204.pdf](https://store.invensense.com/datasheets/invensense/MPU-6050_DataSheet_V3%204.pdf) (accessed 21.05.2018).
14. *MPU-6000 and MPU-6050 Product Specification. Revision 3.4*. Available at: <https://www.invensense.com/wp-content/uploads/2015/02/MPU-6000-Register-Map1.pdf> (accessed 21.05.2018).
15. *STM32F205xx. STM32F207xx. Datasheet – production data*. Available at: <http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/datasheet/bc/21/42/43/b0/f3/4d/d3/CD00237391.pdf/files/CD00237391.pdf/jcr:content/translations/en.CD00237391.pdf> (accessed 21.05.2018).

Для цитирования:

О выборе частоты дискретизации системы балансировки двухколесного робота / А.Ю. Ивойлов, В.А. Жмудь, В.Г. Трубин, Г.В. Саблина // Научный вестник НГТУ. – 2018. – № 2 (71). – С. 7–22. – doi: 10.17212/1814-1196-2018-2-7-22.

For citation:

Ivailov A.Yu., Zhmud V.A., Trubin V.G., Sablina G.V. O vybore chastoty diskretizatsii sistemy balansirovki dvukhkolesnogo robota [On the choice of the sampling frequency of A two-wheeled robot balancing system]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2018, no. 2 (71), pp. 7–22, doi: 10.17212/1814-1196-2018-2-7-22.