

## О ПРИМЕНЕНИИ МЭМС-ДАТЧИКОВ ПРИ РАЗРАБОТКЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ ДВУХКОЛЕСНОГО РОБОТА\*

А.Ю. ИВОЙЛОВ

630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, аспирант кафедры автоматики. E-mail: iaul3hv@mail.ru

В статье рассматриваются особенности применения МЭМС-датчиков при разработке системы автоматической стабилизации двухколесного робота. Данное устройство с математической точки зрения является объектом вида «Перевернутый маятник» с точкой подвеса на оси колеса. В процессе работы системы стабилизации этого устройства необходимо оценивать угол его отклонения от вертикали. В настоящее время широкое распространение получили различные виды МЭМС-датчиков, которые успешно применяются для решения этой задачи. В работе рассмотрены преимущества и недостатки различных типов датчиков (акселерометра и гироскопа) применительно к задаче оценки угла отклонения от вертикали. Показано, что гироскоп как датчик угла отклонения имеет преимущество перед акселерометром в рамках решаемой задачи. Изучаются способы компенсации основного недостатка гироскопа – дрейфа нуля. В качестве одного из вариантов решения этой проблемы рассматривается применение комплементарного фильтра. Данный фильтр использует показания акселерометра для исключения дрейфа нуля гироскопа и является достаточно распространенным в настоящее время инструментом, в том числе и для решения задач, близких к рассматриваемой в данной статье. В работе показано теоретически и экспериментально, что данный фильтр не всегда дает приемлемый результат и может вносить существенные искажения в динамику работы системы стабилизации. Рассматривается возможность применения альтернативного варианта оценки угла наклона, в основе которого лежит неявное использование показаний датчика угла поворота колеса – энкодера. Проведено численное моделирование, показывающее работоспособность этого варианта системы стабилизации.

**Ключевые слова:** перевернутый маятник, балансирующий робот, система автоматического управления, МЭМС-датчик, акселерометр, гироскоп, энкодер, комплементарный фильтр, дрейф нуля

DOI: 10.17212/2307-6879-2017-3-32-51

---

\* Статья получена 18 мая 2017 г.

## ВВЕДЕНИЕ

Статья посвящена вопросам, связанным с применением МЭМС-датчиков при разработке системы стабилизации двухколесного балансирующего робота. Внешний вид устройства представлен на рис. 1. Данное устройство представляет собой платформу с закрепленными на ней статорами электродвигателей постоянного тока. Валы двигателей соединены с колесами. На платформе размещены электронные компоненты устройства – МЭМС-датчик, схема драйвера электродвигателей и управляющая схема на основе микроконтроллера STM32. Кроме того, на платформе установлен блок беспроводной передачи данных. Удержание системы в вертикальном положении производится за счет вращения колес. Структурная схема устройства представлена на рис. 2.

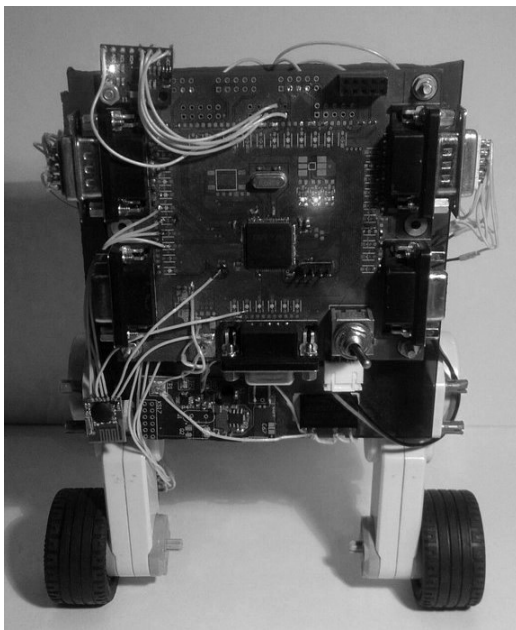


Рис. 1. Двухколесный балансирующий робот

С математической точки зрения двухколесный робот представляет собой объект вида «Перевернутый маятник» с точкой подвеса, размещенной на оси колеса. Задача стабилизации перевернутого маятника является на сегодняшний день актуальной задачей. С одной стороны, появляется все больше техни-

ческих устройств, поведение которых описывает математическая модель перевернутого маятника. К таким устройствам можно отнести транспортное средство «Segway», многоступенчатые антенны, шагающие антропоморфные механизмы [1]. С другой стороны, объекты типа «Перевернутый маятник» можно рассматривать как успешные лабораторные идеализации неустойчивых электромеханических систем [2].

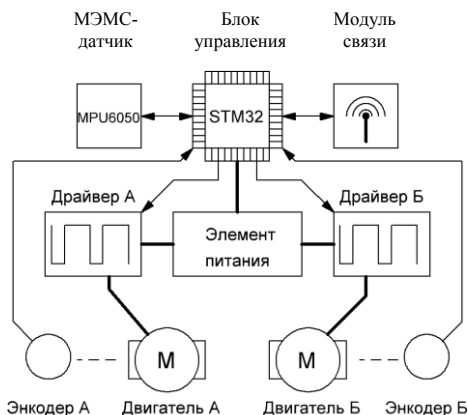


Рис. 2. Структурная схема устройства

Уравнения, описывающие поведение данного типа объектов, широко известны и рассмотрены, например, в работах [3–5]. Здесь же приведем линеаризованные уравнения системы:

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

$$mRL\ddot{\phi} + mR^2\ddot{\psi} = M,$$

$$(J_p + J_m)(\ddot{\psi} - \ddot{\phi}) = \frac{K_m}{R_m}U - \frac{K_m K_e}{R_m}(\dot{\psi} - \dot{\phi}).$$

Параметры модели робота отображены в табл. 1.

Существуют различные способы организации системы автоматической стабилизации, но любая такая система в процессе работы так или иначе использует информацию об угле отклонения объекта от вертикали. Таким образом, задача оценки угла отклонения от вертикали является неотъемлемой частью задачи стабилизации. От качества работы этой части системы зависит качество работы устройства в целом.

Таблица 1

**Параметры модели робота**

Обозначение	Параметр
$m$	Масса платформы
$L$	Расстояние от центра масс до точки подвеса
$R$	Радиус колеса
$g$	Ускорение свободного падения
$J_p$	Момент инерции платформы относительно точки подвеса
$J_m$	Момент инерции валов двигателей
$K_m$	Коэффициент передачи ток – момент двигателя
$K_e$	Коэффициент передачи напряжение – частота вращения
$R_m$	Соппротивление обмоток двигателя
$\varphi$	Угол отклонения робота от вертикали
$\psi$	Угол поворота колеса
$U$	Напряжение, приложенное к обмоткам двигателя
$M$	Момент, приложенный двигателем к платформе

В рассматриваемом устройстве используется измерительная система MPU6050, в состав которой входят два трехосевых МЭМС-датчика – акселерометр и гироскоп. Каждый из этих датчиков имеет свои преимущества и недостатки, которые определяют возможность их применения для решения задачи оценки угла наклона. В следующих разделах статьи рассмотрены особенности этих датчиков и возможность их применения для измерения угла отклонения робота.

## 1. АКСЕЛЕРОМЕТР

Данное устройство измеряет проекцию суммы действующих на него сил на одну или несколько осей, называемых осями чувствительности. Если на объект действует лишь сила тяжести, то, измеряя проекцию этой силы на оси чувствительности акселерометра, можно определить угол наклона объекта по отношению к этой силе (рис. 3.) [6, 7], а значит, и по отношению к вертикали в соответствии с выражением

$$\varphi_a = \arctg \left( \frac{F_x}{F_y} \right).$$

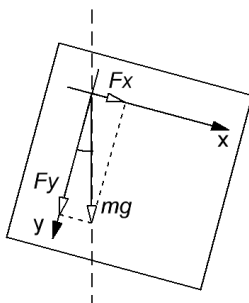


Рис. 3. Определение угла наклона по проекциям силы тяжести

В действительности же на объект могут действовать дополнительные силы, которые будут вносить существенные искажения в оценку угла отклонения от вертикали. Примерами ситуаций, в которых подобные силы возникают, могут быть следующие: движение объекта в горизонтальном направлении с ускорением, воздействие микроударов, вибрация элементов конструкции устройства. Для демонстрации этой особенности был проведен следующий эксперимент. На валу электродвигателя был жестко закреплен стержень, на котором размещен датчик MPU6050 (рис. 4). Вал двигателя приводился во вращение путем подачи напряжения на обмотки двигателя: 10 % и 50 % от максимального. При этом фиксировались показания акселерометра, гироскопа и энкодера, встроенного в двигатель. Сравнивая значения, полученные с помощью MPU6050, с данными, полученными с помощью энкодера (который в этом опыте является эталонным датчиком), можно оценить точность измерения угла MPU6050.

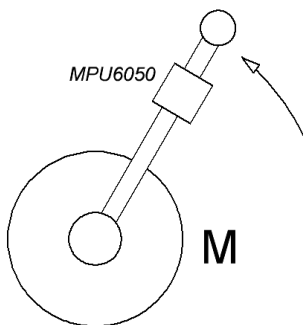


Рис. 4. Схема опыта: система двигатель–стержень

На рис. 5–8 представлены результаты эксперимента. При подаче 10 % напряжения оценка угла, полученная по показаниям акселерометра, содержит высокочастотный шум, но в целом соответствует данным энкодера. При подаче 50 % напряжения оценка угла сильно искажена из-за большего ускорения вала двигателя при старте. Таким образом, акселерометр в качестве датчика угла отклонения можно применять лишь в случаях, когда не требуется высокая точность измерений или объект имеет значительную инерцию.

В рамках решаемой в данной работе задачи к преимуществам акселерометра можно отнести следующее:

- возможность оценки абсолютного значения угла отклонения;
- сравнительно высокая точность в статике.

Недостатками являются:

- высокий уровень высокочастотных шумов;
- высокий уровень помех под действием дополнительных сил и как следствие – высокий уровень помехи в области средних и даже низких частот.

Отметим последнее обстоятельство, так как оно будет иметь значение в дальнейшем.

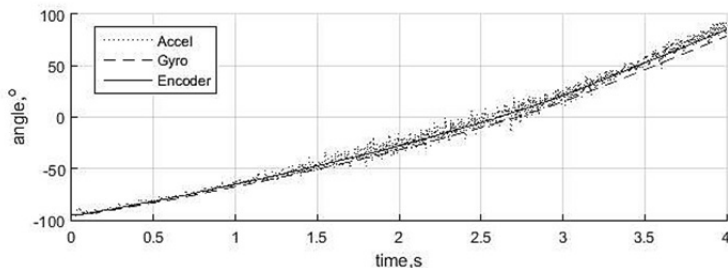


Рис. 5. Угол наклона при подаче 10 % напряжения

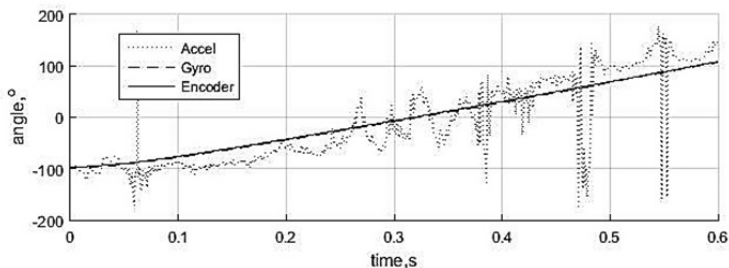


Рис. 6. Угол наклона при подаче 50 % напряжения

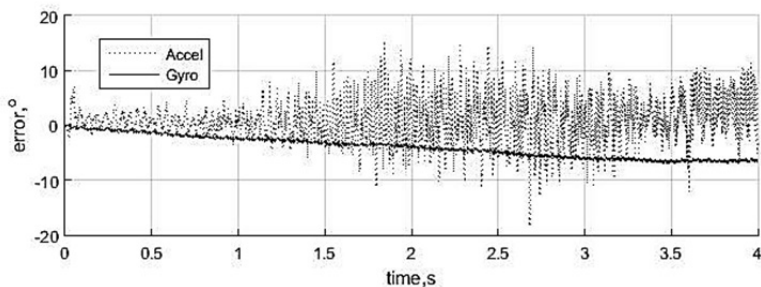


Рис. 7. Ошибка при подаче 10 % напряжения

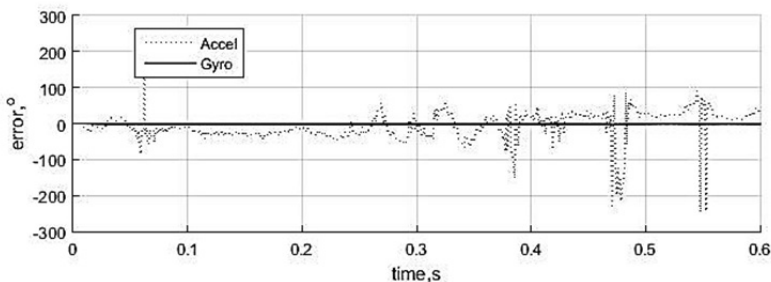


Рис. 8. Ошибка при подаче 50 % напряжения

## 2. ГИРОСКОП

Гироскоп представляет собой устройство, измеряющее угловую скорость [8, 9]. Работа таких устройств в большинстве случаев основана на использовании силы Кориолиса. Поскольку данный вид датчика измеряет угловую скорость, при известном начальном значении угла отклонения достаточно проинтегрировать по времени показания датчика для получения угла отклонения. На практике же такой способ определения сопряжен с проблемой, называемой дрейфом нуля гироскопа. В силу конструктивных особенностей датчиков показания гироскопа почти всегда смещены относительно нулевого уровня. Кроме того, величина смещения зависит от различных факторов, таких как температура, скорость вращения гироскопа и др. Как следствие, при интегрировании эта ошибка будет накапливаться, что вызовет постепенное «убегание» значения угла отклонения. Этот эффект проявляется в опыте, проведенном ранее: из рис. 7 видно, что ошибка определения угла, полученная по

показаниям гироскопа, постоянно нарастает. Несмотря на этот недостаток, гироскоп имеет ряд преимуществ по сравнению с акселерометром:

- меньший уровень шума в области средних и высоких частот по сравнению с акселерометром;
- при интегрировании амплитуда помех снижается;
- есть возможность определить производную угла наклона напрямую;
- низкий уровень помех, вызванный действием внешних сил.

К недостаткам можно отнести следующее:

- наличие дрейфа нуля;
- нет возможности оценить абсолютное значение угла (для этого необходимо знать его начальное значение).

Из вышесказанного следует, что из-за недостатков датчиков ни один из них не может быть применен сам по себе. Показания акселерометра подвержены влиянию внешних сил, показания гироскопа со временем накапливают ошибку. Однако основным датчиком все же следует считать именно гироскоп благодаря лучшим показаниям в области средних частот, которая является особенно важной при проектировании системы стабилизации. Это подтверждается результатами описанного выше эксперимента, из которых видно, что показания гироскопа существенно точнее показаний акселерометра (без учета влияния дрейфа нуля).

Таким образом, для решения задачи оценки угла отклонения необходимо найти способ компенсировать дрейф нуля гироскопа. Для этого следует откорректировать его показания с помощью других датчиков. Один из способов – применение широко распространенного комплементарного фильтра для компенсации дрейфа нуля гироскопа с помощью показаний акселерометра. Альтернативный метод состоит в том, чтобы неявно использовать показания энкодеров, определяющих угол поворота колес, для компенсации дрейфа нуля гироскопа. Оба этих метода будут рассмотрены ниже.

### 3. КОМПЛЕМЕНТАРНЫЙ ФИЛЬТР

Комплементарный фильтр – один из наиболее популярных в настоящее время методов совмещения показаний акселерометра и гироскопа. Применение данного фильтра описано, например, в работах [10–12]. Кроме того, данный фильтр применялся автором ранее [5, 13, 14]. Суть этого метода состоит в том, чтобы компенсировать дрейф нуля гироскопа с помощью показаний акселерометра. При этом для гироскопа комплементарный фильтр является фильтром высоких частот, а для акселерометра – фильтром низких частот [11]. Таким образом, достигается решение задачи: на низких частотах



преобладают показания акселерометра (а значит, отсутствует дрейф нуля), на высоких – гироскопа.

Выражение для вычисления угла отклонения с помощью комплементарного фильтра представлено ниже:

$$\hat{\varphi}(n) = K(\hat{\varphi}(n-1) + \omega_g \Delta t) + (1-K)\varphi_a.$$

Параметры уравнения комплементарного фильтра отображены в табл. 2.

Таблица 2

**Параметры уравнения комплементарного фильтра**

Обозначение	Параметр
$\hat{\varphi}(n)$	Оценка угла в текущий момент времени
$\hat{\varphi}(n-1)$	Оценка угла в предыдущий момент времени
$\omega_g$	Угловая скорость, полученная по показаниям гироскопа
$\varphi_a$	Значение угла наклона, полученное по показаниям акселерометра
$\Delta t$	Шаг интегрирования
$K$	Коэффициент фильтра

Для обеспечения требуемых свойств фильтра необходимо правильно выбрать значение параметра  $K$  – коэффициента фильтра, определяющего вклад показаний датчиков. Данному выражению соответствует следующая структурная схема (рис. 9):

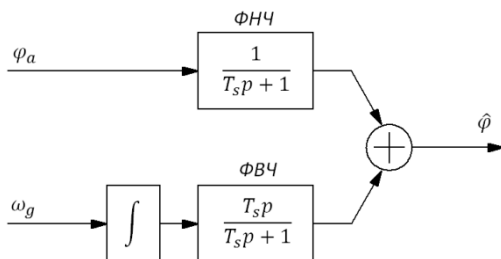


Рис. 9. Структурная схема комплементарного фильтра,

$$T_s = \frac{2\pi}{\omega_s}$$

При этом параметр фильтра  $K$  и частота среза  $\omega_s$  связаны следующим соотношением [10]:

$$K = \frac{1}{1 + \omega_s \Delta t}.$$

Часто можно встретить рекомендации выбора значений  $K$  в диапазоне значений 0.95...0.99 (см., например, [15]). Это объясняется тем, что при уменьшении значения  $K$  на выход фильтра начинают попадать высокочастотные помехи акселерометра, а при приближении значения к единице увеличивается статическая ошибка оценки и время переходного процесса.

На практике данный метод оценки угла имеет существенный недостаток, ограничивающий его применение. И основной уязвимостью данного фильтра является наличие помех измерений акселерометра в области *средних* частот (на этом факте акцентировалось внимание в предыдущем разделе). Для того чтобы показать этот факт, рассмотрим подробнее работу фильтра.

Как следует из структурной схемы (рис. 9), частоты среза фильтров акселерометра (ФНЧ) и гироскопа (ФВЧ) связаны друг с другом и параметром фильтра  $K$ . Это означает, что чем ниже частота, на которой помехи акселерометра становятся существенными, тем ниже должна быть частота среза ФНЧ, а следовательно, и частота ФВЧ. А снижение частоты среза ФВЧ, в свою очередь, приводит к увеличению статической ошибки и времени переходного процесса. Эту особенность иллюстрирует следующий численный эксперимент. Для моделирования использовалась структурная схема, представленная на рис. 10. При этом сигналы акселерометра искажались колебаниями различной частоты (50, 20 и 5 Гц), что является имитацией различных воздействий на акселерометр. Амплитуда колебаний составляла  $1^\circ$ . Частоты 50 Гц и выше соответствуют шуму, возникающему при микроколебаниях датчика и из-за помех преобразования ускорения в цифровой сигнал. Частоты 5...50 Гц соответствуют колебаниям от ударов, неровности поверхности, по которой движется устройство, вибрации двигателей и др. Частоты 5 Гц и ниже соответствуют помехам, возникающим при горизонтальном ускорении робота, в момент начала движения (падение) и при более медленных процессах (табл. 3).

Результаты моделирования представлены на рис. 11. Моделирование проводилось для различных значений коэффициента фильтра  $K$  ( $K = 0.02$ ,  $K = 0.005$ ,  $K = 0.001$ ). Из результатов моделирования видно, что фильтр сильнее всего уязвим именно к среднечастотным и низкочастотным помехам акселерометра (10 Гц и ниже). Для их подавления необходимо существенно увеличивать коэффициент фильтра, что приводит к увеличению времени переходного процесса и ошибки оценки угла (что также видно из результатов моделирования).

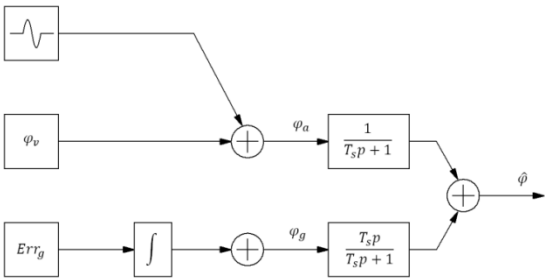


Рис. 10. Схема моделирования процессов комплементарного фильтра

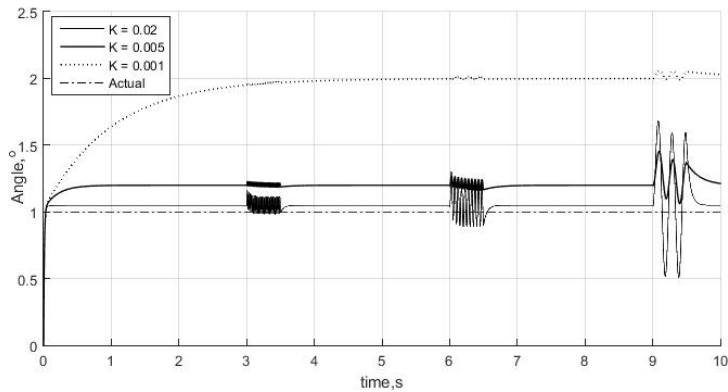


Рис. 11. Результат моделирования процессов комплементарного фильтра

Таблица 3

Частоты возмущающих колебаний и время их действия

Частота, Гц	50	20	5
Время действия, с	3.0...3.5	6.0...6.5	9.0...9.5

Следующий эксперимент был проведен с реальными данными датчиков и позволяет оценить погрешность фильтра для реальных показаний. Результаты эксперимента представлены на рис. 12 и 13. На рис. 12 показаны графики изменения угла наклона во времени для различных значений коэффициента фильтра, а также сигнал, полученный чистым интегрированием показаний

гироскопа. На рис. 13 представлены графики разностей показаний фильтров и показаний гироскопа. Данные кривые позволяют оценить степень ошибки фильтра. Поскольку в динамике эталонными показаниями являются показания гироскопа, то разность показаний «идеального» фильтра и гироскопа должна быть линейно нарастающей во времени функцией (из-за дрейфа нуля гироскопа). В действительности же в моменты движения на этой линии присутствуют выбросы и пики – это и есть ошибки работы фильтра. Из графика видно, что даже для наибольшего значения  $K$ , при котором помехи акселерометра подавляются сильнее всего, величина выброса достигает 10 градусов, что может ухудшить потенциальное качество работы системы стабилизации.

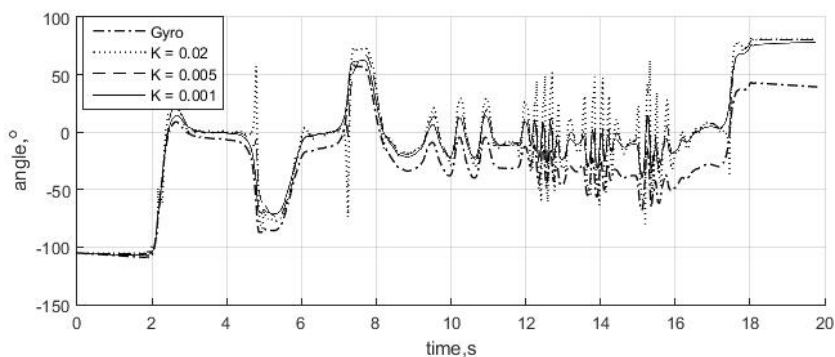


Рис. 12. Оценка угла отклонения комплементарным фильтром и интегрированием показаний гироскопа

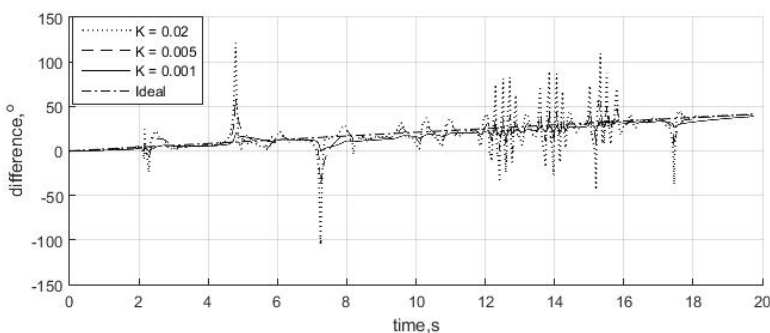


Рис. 13. Разность оценки угла комплементарным фильтром и интегрированием показаний гироскопа: ошибки оценки угла фильтром

Из вышесказанного следует, что комплементарный фильтр имеет ряд особенностей, которые могут существенно повлиять на работу системы. Главным источником помех для фильтра являются среднечастотные и низкочастотные помехи акселерометра. Для улучшения качества работы системы с фильтром можно предложить следующее:

- увеличение коэффициента фильтра  $K$ ;
- установка датчика как можно ближе к оси вращения объекта для уменьшения величины помех;
- модификация исходной схемы фильтра для получения лучшей частотной характеристики.

## ОЦЕНКА УГЛА БЕЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АКСЕЛЕРОМЕТРА

Альтернативным методом оценки угла отклонения от вертикали для исследуемого устройства может быть неявная коррекция показаний гироскопа с помощью показаний энкодеров. Для того чтобы показать возможность такой коррекции, представим исходную модель системы в виде передаточной функции:

$$W(p) = W_1 W_2,$$

$$W_1(p) = \frac{\varphi}{u} = \frac{k_0 p}{p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0},$$

$$W_2(p) = \frac{\alpha}{\varphi} = k_a \frac{p^2 + b_0}{p^2},$$

$$\alpha = \varphi - \psi,$$

где

$$a_0 = \frac{k_3 k_8}{k_2 k_4 - k_1 (k_5 + k_7)}, \quad a_1 = \frac{k_3 (k_5 + k_7)}{k_2 k_4 - k_1 (k_5 + k_7)},$$

$$a_2 = \frac{-k_1 k_8}{k_2 k_4 - k_1 (k_5 + k_7)}, \quad k_0 = \frac{k_2 k_6}{k_2 k_4 - k_1 (k_5 + k_7)},$$

$$b_0 = -\frac{k_3}{k_1}, \quad k_a = -\frac{k_1}{k_2}.$$

Коэффициенты  $k_i$  связаны с параметрами исходной модели следующим образом:

$$k_1 = mL^2 + 3mRL + 2mR^2 + J_p,$$

$$k_2 = mRL + 2mR^2,$$

$$k_3 = mgL, \quad k_4 = mRL, \quad k_5 = mR^2,$$

$$k_6 = \frac{K_m}{R_m}, \quad k_7 = J_p + J_m, \quad k_8 = \frac{K_m K_e}{R_m}.$$

При этом управление системой реализовано по схеме, представленной на рис. 14. Из схемы видно, что ошибка показаний гироскопа  $Err_g$  вносит искажения в работу контура № 1, образованного замыканием обратной связи по углу отклонения через регулятор № 1. При этом информацию об этой ошибке содержит в себе выходная переменная  $\alpha$  – угол поворота вала двигателя. Идея управления заключается в том, чтобы использовать эту информацию для подавления ошибки показаний гироскопа через контур № 2, образованный замыканием обратной связи по углу поворота вала двигателя через регулятор № 2.

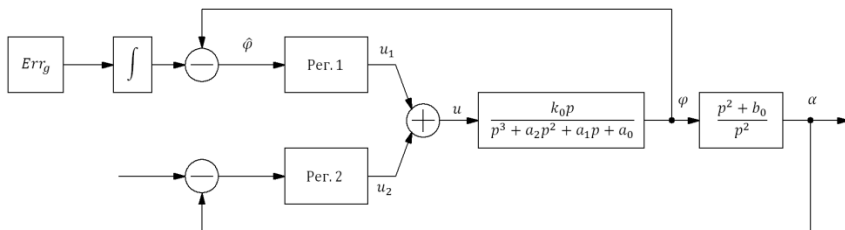


Рис. 14. Структурная схема системы без акселерометра

На рис. 15 представлен результат моделирования поведения системы с управлением, организованным по схеме на рис. 14. Регуляторы № 1 и № 2 представляют собой ПИИ (или П-И-2И) регуляторы. Входом регулятора № 1 является выход гироскопа – производная угла отклонения от вертикали (угловая скорость), входом регулятора № 2 – угол поворота вала двигателя ( $\alpha$ ). Таким образом, закон управления имеет следующий вид:

$$u = u_1 + u_2 = K_p \dot{\varphi} + K_i \varphi + K_{ii} \int \varphi + H_p \alpha + H_i \int \alpha + H_{ii} \iint \alpha.$$

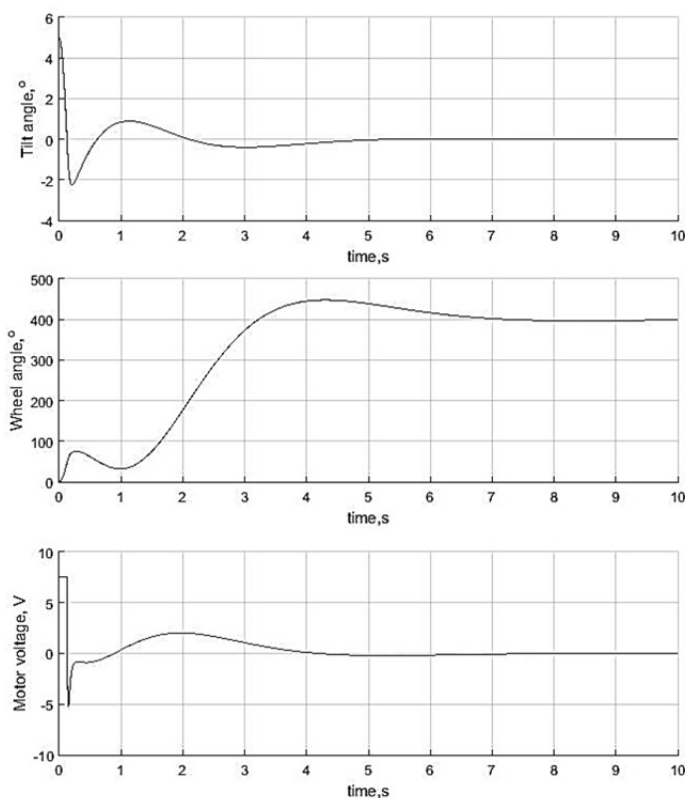


Рис. 15. Результат моделирования системы без акселерометра

Численные значения параметров модели и регуляторов представлены в табл. 4 и 5. Из результатов моделирования видно, что заданная схема управления позволяет устранить влияние ошибки интегрирования без применения акселерометра, что является возможной альтернативой применению описанного выше комплементарного фильтра.

Таблица 4

Численные значения параметров модели

$m$ , кг	$L$ , м	$R$ , м	$g$ , м/с <sup>2</sup>	$J_p$ , кг · м <sup>2</sup>	$J_m$ , кг · м <sup>2</sup>	$K_m$ , Н · м/А	$K_e$ , В · с/рад	$R_m$ , Ом
0,5	0.1	0.02	9.8	0.0015	0.0015	0.3	0.5	5

Таблица 5

## Численные значения коэффициентов регулятора

$K_p$	$K_i$	$K_{ii}$	$H_p$	$H_i$	$H_{ii}$
5700	1700	48	30	30	15

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье были рассмотрены особенности применения МЭМС-датчиков для оценки угла отклонения от вертикали. Эта задача является важной частью задачи стабилизации в вертикальном положении двухколесного робота, поведение которого описывает математическая модель перевернутого маятника. Рассмотрены преимущества и недостатки двух видов МЭМС-датчиков, широко применяемых в системах оценки угла отклонения – акселерометра и гироскопа. Показано, что гироскоп обладает преимуществом перед акселерометром, поскольку последний подвержен влиянию внешних сил, вызывающих значительное искажение показаний. Рассмотрены два способа компенсации основного недостатка гироскопа – дрейфа нуля: метод, основанный на применении комплементарного фильтра, и метод, в основе которого лежит неявное использование показаний датчика поворота колеса – энкодера. Показано, что применение комплементарного фильтра ограничено из-за его основной уязвимости – пропускания помех акселерометра в области средних и низких частот. Проведено моделирование, показывающее возможность применения для решения рассматриваемой задачи второго способа, основанного на использовании показаний энкодера.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колесникова Г.П., Формальский А.М. Об одном способе моделирования походки человека // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2014. – № 1.
2. Саблина Г.В. Разработка и исследование методики стабилизации объекта управления «каретка-маятник»: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Новосибирск, 2000. – 17 с.
3. Формальский А.М. Управление движением неустойчивых объектов. – М.: Физматлит, 2012. – 232 с. – ISBN 978-5-9221-1460-8.
4. Ивойлов А.Ю., Жмудь В.А., Трубин В.Г. Разработка системы автоматической стабилизации в вертикальном положении двухколесной платформы // Автоматика и программная инженерия. – 2014. – № 2 (8). – С. 15–21.



5. 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.

6. *Fisher C.J.* Using an accelerometer for inclination sensing [Electronic resource]. – URL: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/application-notes/AN-1057.pdf> (accessed: 23.11.2017).

7. *Pedley M.* Tilt sensing using a three-axis accelerometer [Electronic resource]. – URL: <https://www.nxp.com/docs/en/application-note/AN3461.pdf> (accessed: 23.11.2017).

8. *Шахнович И.* МЭМС-гироскопы – единство выбора // Электроника: наука, технология, бизнес. – 2007. – № 1. – С. 76–85.

9. Digital Output Gyro Sensor for Navigation [Electronic resource]. – URL: [http://www5.epsondevice.com/en/information/technical\\_info/pdf/wp140417gyrosensor\\_e.pdf](http://www5.epsondevice.com/en/information/technical_info/pdf/wp140417gyrosensor_e.pdf) (accessed: 23.11.2017).

10. *Malinen E.* Fusion of data from quadcopter's inertial measurement unit using complementary filter: bachelor's thesis. – Lappeenranta, 2015.

11. *Colton S.* The balance filter. – Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 2007.

12. *Мещеряков Я.Е., Корилов А.М.* Мониторинг точности позиционирования основных функциональных узлов технологических машин [Электронный ресурс] // Актуальные проблемы современного машиностроения: сборник трудов Международной научно-практической конференции, г. Юрга, 11–12 декабря 2014 г. – Томск, 2014. – С. 38–42. – URL: <http://earchive.tpu.ru/handle/11683/19015> (accessed: 23.11.2017).

13. 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.

14. 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.

15. *Зайчиков А.* Микроконтроллеры в управлении летательными аппаратами. Определение горизонта. Комплементарный фильтр [Электронный ресурс]. – URL: [http://www.parkflyer.ru/ru/blogs/view\\_entry/1461/](http://www.parkflyer.ru/ru/blogs/view_entry/1461/) (дата обращения: 23.11.2017).

**Ивойлов Андрей Юрьевич**, аспирант кафедры автоматики Новосибирского государственного технического университета по направлению «Управление в технических системах». Основные направления научных исследований: системы автоматического управления, перевернутый маятник, робототехника, микроконтроллеры. Имеет 12 публикаций. E-mail: iau13hv@mail.ru

## About the application of MEMS Sensors in the development of two-wheeled robot Automatic stabilization system<sup>\*</sup>

**A.Yu. Ivoilov**

*Novosibirsk State Technical University, 20 K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, Ph.D, the post-graduate student of Department "Automatics". E-mail: iau13hv@mail.ru*

This article is devoted to the features of using MEMS sensors in the development of automatic stabilization system of a two-wheeled robot. From the mathematical point of view this device is the object of Inverted pendulum type. It is necessary to estimate the tilt angle of the robot during operation process of stabilization system. At the present time different types of MEMS sensors have become widespread and these sensors are successfully used to solve this type task. Advantages and disadvantages of different types of sensors (accelerometer and gyroscope) are considered regarding to the tilt angle estimation task. It is shown that the gyroscope as a tilt angle sensor has an advantage over the accelerometer in the framework of the problem being solved. The methods of compensating of zero drift which is the main gyro sensor disadvantage are researched. The using of the complementary filter is considered as one of the ways for problem solving. This filter uses accelerometer data for gyroscope zero drift removing and it is the widespread instrument for solving task of such type at the moment. The paper shows in theory and at practice that this filter does not always give an acceptable result and can significantly distort the dynamics of the stabilization system. The possibility of using the alternate method to estimate the tilt angle is considered. This method is based on the implicit using the data of encoder which is the wheel rotation angle sensor. The numerical simulation is carried out and it showed the possibility of using this type of stabilization system.

**Keywords:** inverted pendulum, balancing robot, automatic control system, MEMS sensor, accelerometer, gyroscope, encoder, complementary filter, zero drift

DOI: 10.17212/2307-6879-2017-3-32-51

## REFERENCES

1. Kolesnikova G.P., Formal'sky A.M. Ob odnom sposobe modelirovaniya pokhodki cheloveka [A way of human gait modeling]. *Inzhenernyi zhurnal: nauka i innovatsii – Engineering Journal: Science and Innovation*, 2014, no. 1.

---

<sup>\*</sup> Received 18 May 2017.

2. Sablina G.V. *Razrabotka i issledovanie metodiki stabilizatsii ob"ekta upravleniya "karetko-mayatnik"*. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [The development and research of stabilization technique of control object "pendulum-cart". Author's abstract of PhD eng. sci. diss.]. Novosibirsk, 2000. 17 p.

3. 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.

4. Ivoilov A.Yu., Zhmud V.A., Trubin V.G. *Razrabotka sistemy avtomaticheskoi stabilizatsii v vertikal'nom polozhenii dvukhkolesnoi platformy* [Development of automotive stabilization system in vertical position of two-wheeled platform]. *Avtomatika i programmaya inzheneriya – Automatics & Software Enginery*, 2014, no. 2 (8), pp. 15–21.

5. Fedorov D.S., Ivoilov A.Yu., Zhmud V.A., Trubin V.G. *Razrabotka sistemy stabilizatsii ugla otkloneniya balansiruyushchego robota* [Development of deflection angle stabilizing system for balancing robot]. *Avtomatika i programmaya inzheneriya – Automatics & Software Enginery*, 2015, no. 2 (12), pp. 16–34.

6. Fisher C.J. *Using an accelerometer for inclination sensing*. Available at: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/application-notes/AN-1057.pdf> (accessed 23.11.2017).

7. Pedley M. *Tilt sensing using a three-axis accelerometer*. Available at: <https://www.nxp.com/docs/en/application-note/AN3461.pdf> (accessed 23.11.2017).

8. Shakhnovich I. MEMS-giroscopy – edinstvo vybora [MEMS gyroscopes. The unity of variety]. *Elektronika: nauka, tekhnologiya, bisness – Electronics: Science, Technology, Business*, 2007, no. 1, pp. 76–85.

9. *Digital Output Gyro Sensor for Navigation*. Available at: [http://www5.epsondevice.com/en/information/technical\\_info/pdf/wp140417gyrosensor\\_e.pdf](http://www5.epsondevice.com/en/information/technical_info/pdf/wp140417gyrosensor_e.pdf) (accessed 23.11.2017).

10. Malinen E. *Fusion of data from quadcopter's inertial measurement unit using complementary filter*: bachelor's thesis. Lappeenranta, 2015.

11. Colton S. *The balance filter*. Massachusetts, Massachusetts Institute of Technology, 2007.

12. Meshcheryakov Ya.E., Korikov A.M. [The monitoring of main functional units positioning of technological machines]. *Aktual'nye problemy sovremennogo mashinostroeniya: sbornik trudov Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Proceedings of the International scientific and practical conference "Urgent problems of up-to-date mechanical engineering"], Yurga, 11–12 December 2014, pp. 38–42. In Russian. Available at: <http://earchive.tpu.ru/handle/11683/19015> (accessed 23.11.2017).

13. Fedorov D.S., Ivoilov A.Yu., Zhmud V.A., Trubin V.G. Development of deflection angle stabilizing system for balancing robot. *Journal of Advances in Management Sciences & Information Systems*, 2015, no. 1, pp. 65–82.

14. 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.

15. Zaichikov A. Mikrokontrollery v upravlenii letatel'nyimi apparatami. Opre-delenie gorizonta. Komplementarnyi fil'tr [Microcontrollers in the control of aircrafts. Horizon definition. Complementary filter]. Available at: [http://www.parkflyer.ru/ru/blogs/view\\_entry/1461/](http://www.parkflyer.ru/ru/blogs/view_entry/1461/) (accessed 23.11.2017).