

Беспилотный измеритель коэффициента сцепления взлетно-посадочных полос

А. Р. Музалевский^{1✉}, Е. В. Друян², М. М. Копычев, В. В. Путов,
Т. Л. Русяева, М. А. Чернышев

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

✉ muzal2010@yandex.ru

Аннотация. Представлен беспилотный измеритель коэффициента сцепления с электромеханическим устройством торможения измерительного колеса. Приведена его структура и описана работа системы компьютерного зрения.

Ключевые слова: взлетно-посадочная полоса, беспилотный измеритель, коэффициент сцепления, электромеханическое торможение, система компьютерного зрения

Для цитирования: Беспилотный измеритель коэффициента сцепления взлетно-посадочных полос / А. Р. Музалевский, Е. В. Друян, М. М. Копычев, В. В. Путов, Т. Л. Русяева, М. А. Чернышев // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2022. Т. 15, № 7. С. 73–81. doi: 10.32603/2071-8985-2022-15-7-73-81.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Original article

Autonomous Runway Friction Coefficient Tester

A. R. Muzalevskiy^{1✉}, E. V. Druian², M. M. Kopichev, V. V. Putov,
T. L. Rusaeva, M. A. Chernyshev

Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia

✉ muzal2010@yandex.ru

Abstract. The paper describes an autonomous friction coefficient tester with an electromechanical braking device of the measuring wheel. Its structure is given and the computer vision system operation is described.

Keywords: runway, autonomous tester, friction coefficient, electromechanical braking, computer vision system

For citation: Autonomous Runway Friction Coefficient Tester / A. R. Muzalevskiy, E. V. Druian, M. M. Kopichev, V. V. Putov, T. L. Rusaeva, M. A. Chernyshev // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2022. Vol. 15, no. 7. P. 73–81. doi: 10.32603/2071-8985-2022-15-7-73-81.

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Введение. Во всем мире авиатранспорт на конечном этапе посадки тормозит колесами и большая или меньшая скользкость искусственно-покрытия взлетно-посадочной полосы (ВПП) определяет степень безопасности посадки воздушного судна¹. При недостаточно эффектив-

ном торможении самолет может совершить выбег за пределы ВПП либо потерять в пределах поло-

¹ Циркуляр ИКАО «Руководство по аэропортовым службам. Ч. 2. Состояние поверхности покрытия» (Doc 9137-AN/898-ICAO). 4-е изд. Междунар. ассоциация гражд. авиации. 2002.

Циркуляр ИКАО «Состояние поверхности ВПП: оценка, измерение и представление данных». Международная ассоциация гражданской авиации (Cir 329-AN/191-ICAO). 2012. (Далее – Циркуляр ИКАО «Состояние поверхности ВПП...»). Руководство по эксплуатации гражданских аэродромов Российской Федерации (РЭГА РФ-94). М.: Воздушный транспорт, 1995.

FAA Advisory Circular 150/5320-12C/Appendix 3/Measurement, Construction and Maintenance of Skid Resistant Airport Pavement Surfaces. 1997.

сы путевую устойчивость и совершить разворот во время торможения (особенно при сильном боковом ветре и (или) неравномерной скользкости покрытия ВПП). Поэтому для обеспечения безопасности посадки в ненадежных погодных условиях и при наличии загрязнений необходимо проводить предпосадочные оперативные измерения коэффициента сцепления ВПП с целью определения безопасной тормозной дистанции приземляющихся воздушных судов.

В мире существует развитая индустрия оборудования для непрерывного измерения коэффициента сцепления ВПП и разработаны согласованные международные сертификационные требования, предъявляемые к таким измерителям. Однако обзор серийно выпускаемых и эксплуатируемых мобильных установок мирового уровня для измерения коэффициента сцепления [1]–[3] позволяет сделать вывод, что, как правило, все существующие буксируемые или встроенные в автомобиль установки для измерения коэффициента сцепления колес воздушных судов с покрытием прокатывают специальное измерительное колесо по поверхности ВПП, принудительно равномерно подтормаживая его с постоянным значением скольжения, задаваемым кинематически (с помощью понижающего редуктора). В них нельзя управлять режимами торможения, что не соответствует реальным режимам торможения колес авиашасси самолетов при посадке. Несоответствие режимов непрерывного измерения коэффициента сцепления ВПП с принудительно постоянным скольжением измерительного колеса реальным антиблокировочным режимам торможения колес воздушных судов приводит к несоответствию результатов измерения коэффициента сцепления ВПП реальным характеристикам торможения воздушных судов и, следовательно, к ошибкам определения безопасной тормозной дистанции.

В Руководствах Гражданской авиации и в научно-технической литературе проблему сближения результатов непрерывного измерения коэффициента сцепления ВПП с реальными характеристиками торможения приземляющихся воздушных судов, называют проблемой корреляции².

В [4]–[8] описано устройство, измеряющее коэффициент сцепления аэродромных покрытий, коррелирующий с реальными характеристиками

торможения колес приземляющихся воздушных судов, выполненное в виде буксируемого автомобильного прицепа. В нем при помощи системы автоматического управления скольжением механическая энергия торможения измерительного колеса, отнимаемая у буксировочного автомобиля кинематически соединенной с ним синхронной электрической машиной, работающей в режиме динамического торможения, и преобразуемая (за вычетом собственных потерь) в электрическую энергию трехфазного переменного тока, далее преобразуется с помощью управляемого выпрямителя в электрическую энергию постоянного тока, которая, в свою очередь, полностью превращается в тепловую энергию, выделяемую на нагрузочном сопротивлении.

В представляемом в статье беспилотном измерителе коэффициента сцепления используется принцип электромеханического торможения измерительного колеса и описана разработка измерительной подвески с электромеханическим торможением измерительного колеса, интегрированной в беспилотное шасси с электродвижением [9].

Описание конструкции. Устройство представляет собой самоходный измерительный комплекс, содержащий раму, опирающуюся на три несущих колеса, измерительное колесо, установленное в независимой подвеске, связанной с рамой посредством шарнирной опоры, имеющей одну вращательную степень свободы в вертикальной продольной плоскости симметрии рамы, электрический актуатор, тормозной генератор, блок управляющей электроники и аккумулятор. Конструкция и внешний вид беспилотного измерителя показаны на рис. 1–3.

Передние колеса *1* служат мотор-колесами, установленными в стандартную подвеску. Они обеспечивают достаточную тягу для преодоления воздушного сопротивления при движении со скоростью 60 км/ч и тормозного усилия измерительного колеса *2* при значении коэффициента сцепления, равном единице. Рулевая рейка *3* с установленным на ней сервоприводом обеспечивает поворот передних колес. Заднее колесо *4* – опорное и служит для придания устойчивости конструкции.

Ступица измерительного колеса *2* прикреплена через датчик момента *5* к концу балки измерительной подвески. Цепная передача связывает измерительное колесо и тормозной генератор *6*,

² Циркуляр ИКАО «Состояние поверхности ВПП...».

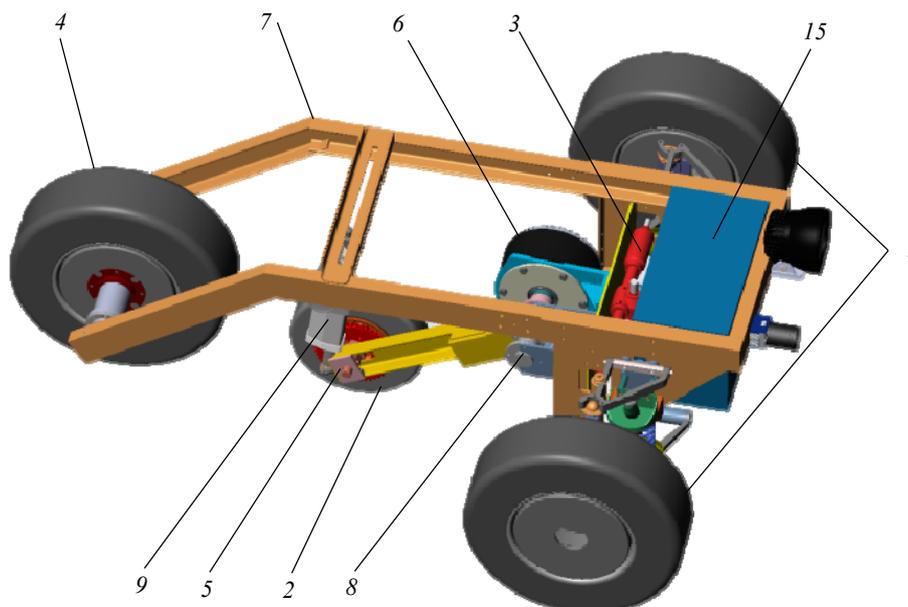


Рис. 1. Внешний вид каркаса конструкции беспилотного измерителя коэффициента сцепления

Fig. 1. Layout of the autonomous friction coefficient tester

в качестве которого используется синхронная электрическая машина с постоянными магнитами, жестко прикрепленная к раме измерителя 7. Соосно с валом генератора расположена ось поворота измерительной подвески 8, позволяющая поднимать балку с колесом в транспортное положение и опускать в рабочее положение при помощи электрического актуатора 9, шток которого шарнирно крепится к балке подвески, а корпус актуатора через S-образный тензодатчик 10 прикреплен к поперечной балке рамы измерителя, что позволяет получить замкнутую систему управления силой нагружения измерительного колеса.

Применение датчика крутящего момента, расположенного непосредственно на оси измери-

тельного колеса, повышает точность измерений по сравнению с тензодатчиком, измеряющим натяжение цепи, как принято во всех существующих разработках, поскольку потери в трансмиссии не влияют на показания, а к датчику прикладывается только одно усилие в направлении, предусмотренном конструкцией датчика.

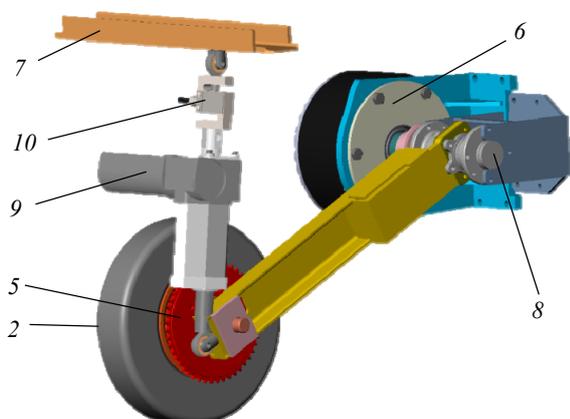


Рис. 2. Подвеска измерительного колеса

Fig. 2. Measuring wheel suspension

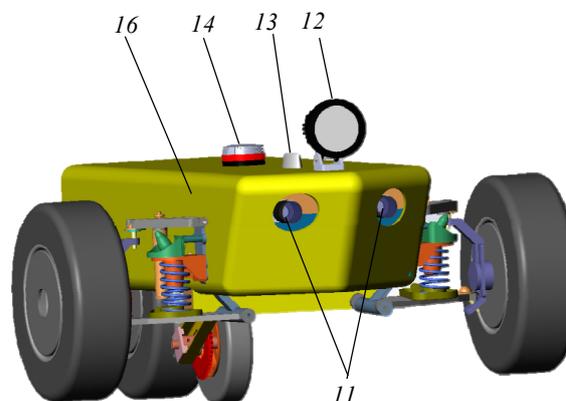


Рис. 3. Вид спереди на измеритель с установленным обтекаемым корпусом

Fig. 3. Front view of the friction coefficient tester with installed casing

В передней части измерителя расположены камеры 11, входящие в состав системы компьютерного зрения, прожектор 12, антенна 13, проблесковый маяк 14, блок управляющей электроники и аккумуляторная батарея 15, необходимые для реализации беспилотного управления движением. Для снижения аэродинамического сопротивления корпус измерителя 16 выполнен обтекаемым.

Структурная схема. Устройство беспилотно-го измерителя коэффициента сцепления показано на структурной схеме (рис. 4). Блок *Колесная платформа* объединяет системы рулевого и тягово-го электрических приводов, необходимых для движения беспилотно-го измерителя. Блок *Измерительная часть*, показанный в левой части рисунка, объ-единяет системы и устройства, участвующие в про-цессе измерения коэффициента сцепления – систему нагружения измерительного колеса и *Гене-*

раторную часть, состоящую из измерительного колеса ИК, цепной передачи связанного с тормозным генератором ТГ и *системы управления скольжением*. Обмотки статора тормозного генера-тора подключены к трехфазному неуправляемому выпрямителю. Выпрямленное напряжение через *преобразователь напряжения DC/DC* поступает в бортовую сеть измерителя, уменьшая потребляе-мый из *аккумуляторной батареи* ток.

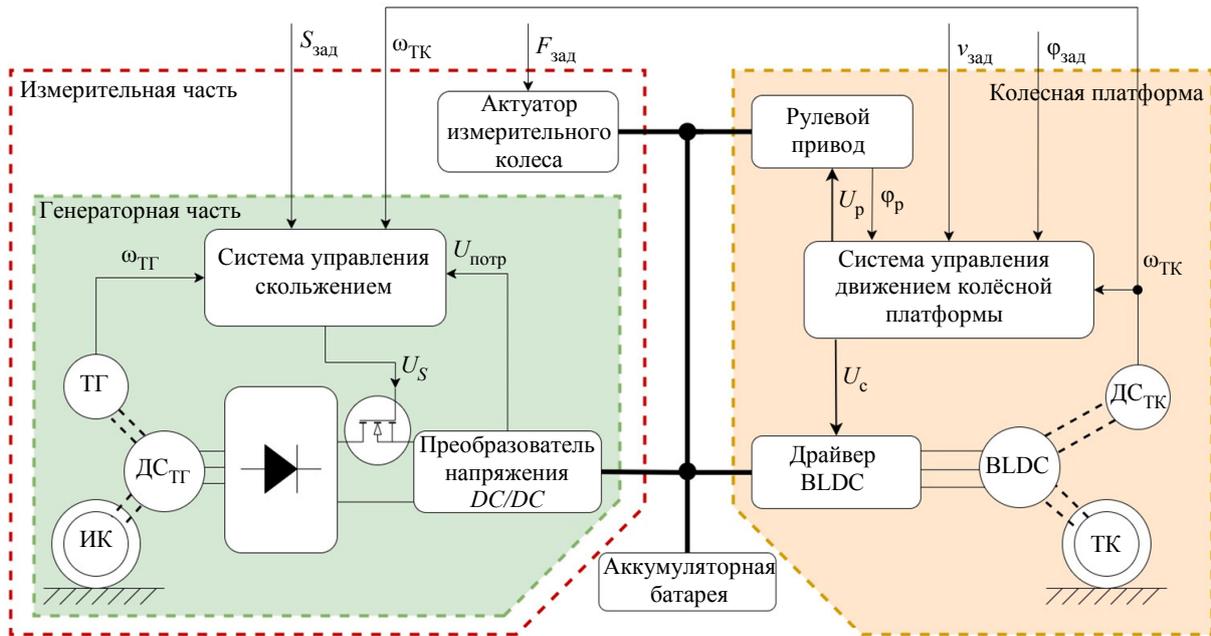


Рис. 4. Структурная схема беспилотно-го измерителя коэффициента сцепления
Fig. 4. Block diagram of the autonomous friction coefficient tester

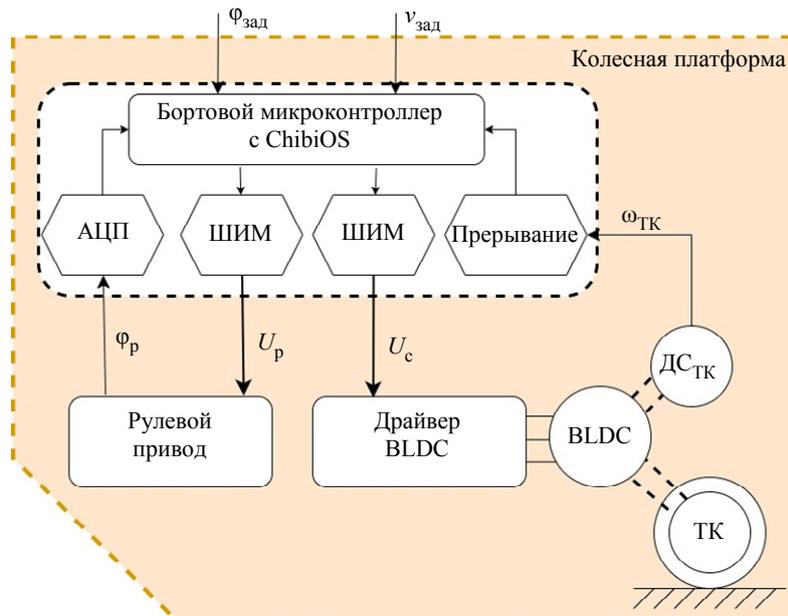


Рис. 5. Структурная схема системы управления движением колесной платформы
Fig. 5. Block diagram of the motion control system

Система управления движением колесной платформы управляет исполнительными устройствами колесной платформы рулевым сервоприводом и тяговым двигателем. На рис. 5 представлена структурная схема системы управления движением колесной платформы.

В качестве бортового микроконтроллера используется контроллер STM32F767ZI с установленной на нем операционной системой реального времени ChibiOS/RT [10], используемый для одновременного управления рулевым и тяговым электроприводами и обработки команд оператора. Управление электроприводами осуществляется при помощи широтно-импульсной модуляции (ШИМ), сигнал энкодера обрабатывается как аппаратное прерывание микроконтроллера, аналоговый сигнал потенциометра рулевого сервопривода поступает на встроенный аналого-цифровой преобразователь (АЦП). Система управления движением замкнута по скорости и положению за счет установки датчика скорости ДС_{ТК} на вал тягового двигателя BLDC, механически связанного с транспортным колесом (ТК), и использования датчика положения рулевого сервопривода.

Оператор при помощи пульта управления посылает в систему управления движением колесной платформы желаемые скорость движения $v_{зад}$ и угол поворота рулевых колес $\varphi_{зад}$. Бортовой контроллер формирует задание скорости движения U_c и задание положения рулевого привода

U_p , получает частоту вращения транспортных колес $\omega_{ТК}$ и угол поворота колес φ_p , затем передает результат исполнения задания в пульт оператора. Однако из-за возможности проскальзывания колес по поверхности и наличия люфтов в рулевом механизме точное исполнение задания не гарантирует движение по заданной траектории, поэтому для решения задачи беспилотного движения были добавлены дополнительные источники информации. Для определения положения измерителя в инерциальной системе отсчета используется стандартный инерциальный измерительный модуль IMU (Inertial Measurement Unit), функции которого частично дублирует система компьютерного зрения, также определяющая направления движения по взлетно-посадочной полосе относительно линий разметки.

Для корректной работы измерительной части оператор должен задать требуемое скольжение измерительного колеса в процессе измерения $S_{зад}$ и вертикальную силу $F_{зад}$, действующую на измерительное колесо. В процессе проведения измерений в измерительной части формируется протокол измерения, содержащий значение коэффициента сцепления, и положение измерителя в момент снятия точки, необходимое для идентификации измеренного участка взлетно-посадочной полосы.

На рис. 6 показана структурная схема измерительной части беспилотного измерителя.

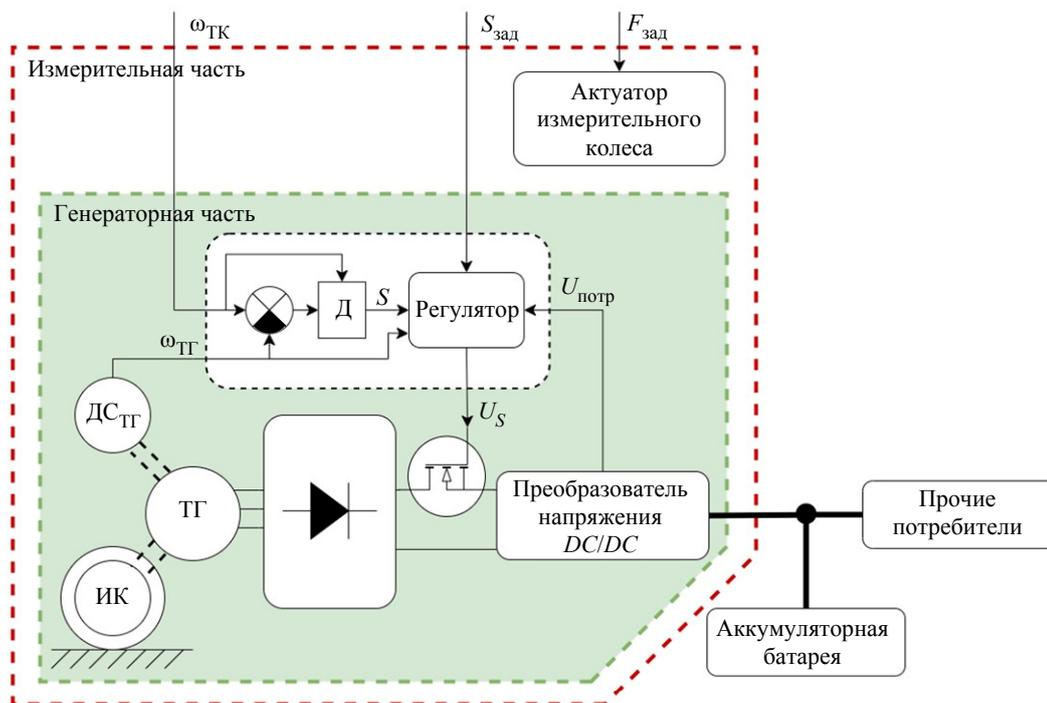


Рис. 6. Структурная схема измерительной части беспилотного измерителя
Fig. 6. Block diagram of the measuring system

В процессе работы измеритель движется по взлетно-посадочной полосе, что заставляет вращаться измерительное колесо (ИК), присоединенное к тормозному генератору (ТГ). На валу генератора установлен датчик скорости (ДС_{ТГ}), сигнал которого $\omega_{ТГ}$ поступает в систему управления скольжением. Тормозной генератор подключен к трехфазному диодному мосту, на выходе которого возникает выпрямленное напряжение, значение которого зависит от скорости вращения измерительного колеса. При замыкании транзистора сигналом U_S в цепи тормозного генератора появляется электрическая нагрузка, что создает тормозной момент на измерительном колесе и замедляет последнее. Преобразователь напряжения служит для поддержания неизменного выходного напряжения, равного напряжению бортовой сети, при изменяющемся входном напряжении, зависящем от скорости вращения измерительного колеса. В систему управления скольжением от преобразователя напряжения поступает сигнал о потребляемом токе $U_{потр}$, а от колесной платформы – о частоте вращения транспортных колес $\omega_{ТК}$, необходимой для вычисления значения скольжения.

Система компьютерного зрения. В беспилотном измерителе используется система компьютерного зрения, предназначенная для обнаружения линий разметки на взлетно-посадочной полосе и повышения точности автономного движения (рис. 7). Эта система необходима для коррекции накапливающейся ошибки определения направления движения относительно видимых линий разметки. Заметим при этом, что обнаружение препятствий на взлетно-посадочной полосе – это нештатная ситуация, при возникновении которой управление передается оператору, что избавляет от необходимости классифицировать и предсказывать поведение детектируемых препятствий средствами системы компьютерного зрения.



Рис. 7. Пример разметки взлетно-посадочной полосы
Fig. 7. The example of the runway markings

К аппаратному обеспечению предъявляются следующие требования:

- минимальный угол обзора – 110° , для того чтобы видеть боковые линии разметки взлетно-посадочной полосы, ширина которой может достигать 60 м;

- разрешение кадра – не ниже 1920×1080 пикселей;

- частота работы в выбранном режиме – не ниже 30 Гц.

Логика действия системы следующая: во время проезда по полосе система ищет сплошную боковую и центральную прерывистую линии. По положению точки схода этих линий определяется текущий курс измерителя и вырабатывается задание для системы рулевого привода.

Алгоритм работы системы обнаружения прерывистой линии следующий:

- исходное трехканальное изображение (RGB) бинаризуется с помощью метода порогового значения;

- применяется преобразование Хафа [11] и формируется массив кандидатов сплошных линий на бинаризованном изображении;

- массив кандидатов фильтруется, и выбирается линия, которая больше всего соответствует ожидаемой длине.

Описанный алгоритм основывается на предположении, что сплошная линия не имеет разрывов и занимает не менее половины высоты кадра. Таким образом, простая фильтрация позволяет отсортировать кандидатов в линии только по признаку длины линии, что не нагружает вычислитель дополнительными операциями и экономит ресурсы. Также предполагается, что камера работает с учетом ректификации кадра, т. е. после проведения калибровки, исключающей радиальные искажения на краях кадра.

Для обнаружения прерывистой линии необходимо проводить дополнительный анализ изображения, так как первый алгоритм использует лишь признак длины, а прерывистая линия строится из набора коротких линий. С этой целью был введен второй алгоритм для анализа положения на кадре и направления центрального сектора прерывистой линии. Алгоритм работы системы обнаружения прерывистой линии следующий:

- на основе базового изображения строится одноканальное изображение (оттенки серого) с применением размытия по Гауссу с ядром размером 5×5 ;

– на изображении вычисляются границы с помощью определения производных по двум осям с дальнейшей обработкой, описываемой алгоритмом «детектор границ Кенни» [12];

– по изображению границ (рис. 8) проводится поиск замкнутых контуров;

– набор контуров на изображении фильтруется по признаку прямоугольности, который определяется тем, насколько контур заполняет описывающий его прямоугольник;

– из всех кандидатов по ранее проведенным фильтрациям выбирается контур по соответствующему порогу его размера, который определяется эмпирически на основе параметров камеры.



Рис. 8. Пример поиска границ на изображении с помощью алгоритма «детектор границ Кенни»

Fig. 8. The result of the edge detection with a help of Canny algorithm

Предложенный алгоритм в рамках работы с разметкой без искажений позволяет оценить положение и направление прерывистой линии, что, в свою очередь, дает возможность экстраполировать обе линии на всю высоту кадра и определить точку схода линий.

Дальнейшая работа системы заключается в определении расхождения между ожидаемым положением точки схода и нынешней точкой пересечения найденных линий, что далее позволяет сгенерировать корректирующее задание для исправления направления движения движущегося измерителя.

На рис. 9 приведен результат применения фильтров цвета, формирующих бинаризованное изображение после применения перспективного преобразования кадра. В левой части кадра находится прерывистая линия разметки, в правой – сплошная линия.

На рис. 10 представлен результат действия подсистемы выработки задания угла поворота рулевого привода, где показаны две сходящиеся линии, а на основе положения точки схода формируется задание поворота.

Таким образом, алгоритм основывается на базовых операциях с изображениями и дает возможность встраивать его в недорогие микрокомпьютеры с малыми требованиями к ресурсам, что в дальнейшем позволяет экономить энергию для увеличения запаса хода.



Рис. 9. Представление кадра с распознанными полосами разметки

Fig. 9. Frame with a recognized markings patterns



Рис. 10. Представление кадра с распознанными полосами разметки и заданием угла поворота рулевого привода на 5° вправо

Fig. 10. Frame with a markings detection and a generated task to the motion control system 5° to the right

Заключение. В статье описан беспилотный измеритель коэффициента сцепления с электромеханическим торможением измерительного колеса и рекуперацией энергии торможения в бортовую сеть. Беспилотное движение реализуется при помощи замкнутой системы управления исполнительными устройствами шасси, системы компьютерного зрения и системы инерциальной навигации.

В измерительной подвеске для создания вертикального усилия на измерительное колесо используется электрический актуатор с обратной связью по значению нагружения, а для измерения тормозного усилия – датчик крутящего момента. В качестве тормозного генератора принята синхронная машина с постоянными магнитами, подключенная через трехфазный выпрямитель к преобразователю

постоянного напряжения, позволяющего электрическую энергию торможения колеса возвращать в бортовую сеть, тем самым снижая потребление энергии из аккумуляторной батареи.

Система компьютерного зрения предназначена для распознавания разметки на взлетно-посадочной полосе и выработки задания угла поворота колес.

Список литературы

1. Kleine-Beek W. Runway friction characteristics measurement and aircraft braking // *HindSight*. 2011. Vol. 12. P. 39–41.
2. Radó Z., Wambold J. C. Correlation of ground friction measurements to aircraft braking friction calculated from flight data recorders // *Proc. of the 4th Intern. Safer Roads Conf. UK: Cheltenham, 2014*. P. 18–21.
3. Modeling-based approach to relate ground friction measurements to aircraft braking performance / V. Cerezo, J. Gerthoffert, M. Bouteldja, M. T. Do // *J. of Aircraft*. 2016. Vol. 53, Iss. 1. P. 251–261. doi: 10.2514/1.c033309.
4. Метод и технические средства измерений коэффициента сцепления аэродромных покрытий и их корреляции с характеристиками торможения при посадке воздушных судов / В. В. Путов, А. В. Путов, А. Д. Стоцкая, В. Н. Шелудько, К. В. Игнатьев // *Сб. тр. XIII междунар. науч.-техн. конф. «Актуальные проблемы электронного приборостроения» (АПЭП 2016)*. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016. Т. 10. С. 223–229.
5. Автоматизированный электромеханический буксируемый комплекс для измерения коэффициента сцепления взлетно-посадочных полос / В. В. Путов, А. Д. Стоцкая, В. Н. Шелудько, К. В. Игнатьев // *Сб. тр. IX Междунар. (XX Всерос.) конф. по автоматизированному электроприводу АЭП-2016*. Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2016. С. 475–479.
6. Буксируемый измерительный комплекс с электромеханическим имитатором антиблокировочных режимов торможения колес воздушного судна при посадке / В. В. Путов, В. Н. Шелудько, А. В. Путов, А. Д. Стоцкая // *Сб. докл. Междунар. науч. конф. «Наука и образование: технология успеха»*. СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2016. С. 68–77.
7. Автоматически управляемая буксируемая электромеханическая установка для измерения коэффициента сцепления аэродромных и автодорожных покрытий ИКС-1 / В. Н. Шелудько, В. В. Путов, А. В. Путов, Т. Л. Русяева // *Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ»*. 2010. № 9. С. 67–74.
8. Шелудько В. Н. Создание нового поколения автоматизированных комплексов контроля и испытаний для обеспечения безопасности посадки воздушных судов // *Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ»*. 2013. № 3. С. 58–72.
9. Autonomous friction tester prototype design / A. R. Muzalevskiy, A. V. Devyatkin, E. V. Druian, M. M. Kopichev // *Conf. of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus), 2022*. P. 795–798. doi: 10.1109/ElConRus54750.2022.9755681.
10. Описание модуля «Threads» из документации ChibiOS. URL: http://chibiforge.org/doc/21.11/rt/group_threads.html (дата обращения 22.05.22).
11. Ballard D. H. Generalizing the Hough transform to detect arbitrary shapes // *Pattern Recognition*. 1981. Vol. 13, no. 2. P. 111–122. doi: 10.1016/0031-3203(81)90009-1.
12. Canny J. A computational approach to edge detection // *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 1986. Vol. PAMI-8, no. 6. P. 679–698. doi: 10.1109/TPAMI.1986.4767851.

Информация об авторах

Музалевский Александр Раймонович – ассистент кафедры САУ СПбГЭТУ «ЛЭТИ».
E-mail: muzal2010@yandex.ru

Друян Евгений Васильевич – канд. техн. наук, доцент кафедры САУ СПбГЭТУ «ЛЭТИ».
E-mail: druian@yandex.ru

Копычев Михаил Михайлович – ассистент кафедры САУ СПбГЭТУ «ЛЭТИ».
E-mail: kundyukov94@mail.ru

Путов Виктор Владимирович – д-р техн. наук, профессор, зам. зав. кафедрой САУ по развитию, СПбГЭТУ «ЛЭТИ».
E-mail: vvputov@etu.ru

Русяева Татьяна Леонидовна – канд. экон. наук, доцент кафедры САУ СПбГЭТУ «ЛЭТИ».
E-mail: tlrusyeva@etu.ru

Чернышев Максим Андреевич – магистр СПбГЭТУ «ЛЭТИ».
E-mail: m.a.mim@yandex.ru

References

1. Kleine-Beek W. Runway Friction Characteristics Measurement and Aircraft Braking. *HindSight*. 2011. Vol. 12. P. 39–41.
2. Radó Z., Wambold J. C. Correlation of Ground Friction Measurements to Aircraft Braking Friction Calculated from Flight Data Recorders // *Proc. of the 4th International Safer Roads Conf. UK: Cheltenham, 2014. P. 18–21.*
3. Cerezo V., Gerthoffert J., Bouteldja M., Do M. T. Modeling-Based Approach to Relate Ground Friction Measurements to Aircraft Braking Performance // *J. of Aircraft*. 2016. Vol. 53, Iss. 1. P. 251–261. doi: 10.2514/1.c033309.
4. Putov V. V., Putov A. V., Stockaya A. D., SHELud'ko V. N., Ignat'ev K. V. Metod i tekhnicheskie sredstva izmerenij koefficienta scepneniya aerodromnyh pokrytij i ih korrelyacii s harakteristikami tormozheniya pri posadke vozdušnyh sudov // *Sb. tr. XIII mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. «Aktual'nye problemy elektronnoho priborostroeniya» (APEP 2016). Novosibirsk: Izd-vo NGTU, 2016. T. 10. S. 223–229. (In Russ.)*.
5. Putov V. V., Stockaya A. D., SHELud'ko V. N., Ignat'ev K. V. Avtomatizirovannyj elektromekhanicheskiy buksiruemyj kompleks dlya izmereniya koefficienta scepneniya vzletno-posadochnyh polos // *Sb. tr. IX Mezhdunar. (XX Vseros.) konf. po avtomatizirovannomu elektroprivodu AEP-2016. Perm': Izd-vo PNIPU, 2016. S. 475–479. (In Russ.)*.
6. Putov V. V., SHELud'ko V. N., Putov A. V., Stockaya A. D. Buksiruemyj izmeritel'nyj kompleks s elektromekhanicheskim imitatorom antiblokirovochnyh rezhimov tormozheniya koles vozdušnogo sudna pri posadke // *Sb. dokl. Mezhdunar. nauch. konf. «Nauka i obrazovanie: tekhnologiya uspekha»*. SPb.: SPbGETU «LETI», 2016. S. 68–77. (In Russ.)
7. SHELud'ko V. N., Putov V. V., Putov A. V., Rusyaeva T. L. Avtomaticheski upravlyaemaya buksiruemaya elektromekhanicheskaya ustanovka dlya izmereniya koefficienta scepneniya aerodromnyh i avtodorozhnyh pokrytij IKS-1 // *Izv. SPbGETU «LETI»*. 2010. No. 9. S. 67–74. (In Russ.)
8. SHELud'ko V. N. Sozdanie novogo pokoleniya avtomatizirovannyh kompleksov kontrolya i ispytanij dlya obespecheniya bezopasnosti posadki vozdušnyh sudov // *Izv. SPbGETU «LETI»*. 2013. No. 3. S. 58–72. (In Russ.)
9. Muzalevskiy A. R., Devyatkin A. V., Druian E. V., Kopichev M. M. Autonomous Friction Tester Prototype Design // *Conf. of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus), 2022. P. 795–798. doi: 10.1109/ElConRus54750.2022.9755681.*
10. Opisanie modulya «Threads» iz dokumentacii ChibiOS. URL: http://chibiforge.org/doc/21.11/rt/group_threads.html (data obrashcheniya 22.05.22). (In Russ.)
11. Ballard D. H. Generalizing the Hough Transform to Detect Arbitrary Shapes // *Pattern Recognition*, 1981. Vol. 13, no. 2. P. 111–122. doi: 10.1016/0031-3203(81)90009-1.
12. Canny J. A Computational Approach to Edge Detection // *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1986. Vol. PAMI-8, no. 6. P. 679–698. doi: 10.1109/TPAMI.1986.4767851.

Information about the authors

Aleksandr R. Muzalevskiy – Assistant of the Department of Automatic Control Systems of Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: muzal2010@yandex.ru

Evgenii V. Druian – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, the Department of Automatic Control Systems of Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: druian@yandex.ru

Michael M. Kopichev – Assistant of the Department of Automatic Control Systems of Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: kundyukov94@mail.ru

Victor V. Putov – Dr Sci. (Eng.), Professor, the Department of Automatic Control Systems of Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: vvputov@etu.ru

Tatiana L. Rusyaeva – Cand. Sci. (Econ.), Associate Professor of the Department of Automatic Control Systems of Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: tlrusyaeva@etu.ru

Maksim A. Chernyshev – master of Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: m.a.mim@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 17.05.2022; принята к публикации после рецензирования 06.06.2022; опубликована онлайн 13.09.2022.

Submitted 17.05.2022; accepted 06.06.2022; published online 13.09.2022.