

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ НАЗЕМНОЙ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОЙ ПЛАТФОРМОЙ ДЛЯ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА

П. В. Балабанов¹, А. С. Егоров², С. А. Сенкевич²✉,
А. Д. Миронов¹, В. О. Буланова², Д. А. Бобров², В. А. Бугров²

*Кафедра «Мехатроника и технологические измерения» (1),
НИИЛ «Интеллектуальные беспилотные робототехнические платформы»
Управления фундаментальных и прикладных исследований (2),
thegreatarchitect1424@gmail.com; ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия*

Ключевые слова: мобильные робототехнические платформы; моделирование; модели управления электроприводами; регулятор; система автоматического управления.

Аннотация: Представлен обзор используемых в сельском хозяйстве мобильных робототехнических платформ и моделей управления их электроприводами. Проведено моделирование электропривода постоянного тока. Получены оптимальные настройки параметров системы управления электроприводом. Разработана модель перемещения платформы на плоскости и показан алгоритм управления ею, обеспечивающий заданную траекторию движения.

Введение

Сельское хозяйство сталкивается с необходимостью повышения эффективности производства и качества растительной продукции. Традиционные методы мониторинга состояния растений трудоемки, ресурсоемки, часто не обеспечивают достаточной точности. В ответ на эти вызовы активно развиваются технологии точного земледелия, в том числе использование робототехнических платформ для автоматизированного мониторинга.

Данная статья посвящена разработке системы управления мобильной робототехнической платформой, предназначенной для проксимального зондирования растений.

Цель работы – определение оптимальных параметров (настроек) системы управления, обеспечивающей позиционирование платформы на местности. Для достижения цели поставлены и решены следующие задачи:

- 1) обзор существующих мобильных робототехнических платформ в сельском хозяйстве и анализ моделей управления их электроприводами;
- 2) моделирование системы управления электроприводами платформы;
- 3) разработка модели пространственного перемещения платформы и алгоритма управления, обеспечивающего заданную траекторию движения.

Результаты проведенного исследования позволяют оценить эффективность разработанной системы управления и ее потенциал применительно к задачам проксимального зондирования растений. Статья содержит описание используемых методов, полученных результатов моделирования и экспериментальные данные, подтверждающие работоспособность представленной системы.

Обзор существующих робототехнических платформ и систем управления электроприводами

Робототехнические платформы для механической и химической прополки сорняков представлены следующими типами: HortiBot, Aarhus University (Дания) [1], Vitirover, NaïoTechnologies (Франция) [2], EcoRobotix (Швейцария), BoniRob (Deep field Robotics, Германия) [3], FarmWise (США), AgBot II, Digital Farmhand (Австралия), FarmDroid (Германия). По утверждению исследователей и разработчиков, эффективность механической прополки средствами робоплатформ достигает 90 %, а обработка гербицидами – 100 % благодаря точному нацеливанию на сорняки с применением системы Drop-on-Demand (DoD) [4]. Следует отметить, что для существующих робототехнических платформ мало сведений о фактической производительности и адаптируемости для культур с другими эксплуатационными требованиями. Для расширения сферы коммерческого использования таких робоплатформ требуется увеличение их рабочей скорости и производительности, площади обрабатываемой поверхности, а также повышение точности обнаружения сорняков.

Ряд исследований посвящены робототехническим технологиям обнаружения и идентификации болезней [5], а также насекомых-вредителей [6]. Исследователями предложены модели сверточной нейронной сети для множественной классификации насекомых, а также методы грубого обнаружения и подсчета YOLO (You Only Look Once), методы классификации и точного подсчета на основе SVM (Support Vector Machines) с использованием глобальных функций. Предложенные алгоритмы позволили детектировать симптомы мучнистой росы, вируса пятнистого увядания томатов, поражения бактерией *Xylella fastidiosa* и др.

Для фенотипирования посевов сахарной свеклы разработана автономная робототехническая платформа (Bernard, Франция), включающая колесный мобильный робот и манипулятор с шестью степенями свободы для колориметрических и геометрических измерений растений. Университетом Карнеги–Меллона разработана робототехническая наземная платформа высокопроизводительного фенотипирования пропашных культур сорго и кукурузы. Полностью автоматизированная платформа для фенотипирования (Rothamsted Research, Великобритания) включает в себя RGB-камеры высокого разрешения, а также камеры, детектирующие яркость флуоресценции хлорофилла и тепловизионные инфракрасные камеры, два гиперспектрометра и два лидара.

Создан ряд коммерчески доступных автономных и полуавтономных робототехнических платформ для сбора различных плодов (табл. 1).

Можно выделить *два основных подхода* к управлению робототехническими платформами.

Первый подход использует камеры и алгоритмы компьютерного зрения для восприятия окружающей среды. Робототехническая платформа анализирует изображения в реальном времени, чтобы определять свое положение, обнаруживать препятствия, распознавать объекты и следовать по заданной траектории. Преимущества включают возможность работы в динамичных и неструктурированных средах, а также адаптацию к меняющимся условиям. Однако такой подход зависит от качества освещения, может быть чувствителен к помехам и требует значительных вычислительных ресурсов для обработки изображений.

Второй подход базируется на использовании инерциальных измерительных блоков (IMU), которые регистрируют ускорение и угловую скорость платформы. На основе этих данных, с применением алгоритмов интеграции, вычисляется текущее положение и ориентация робота. Инерциальное управление обеспечивает автономность и независимость от внешних сенсоров, а также высокую точность при перемещении на короткие расстояния.

Таблица 1

Список коммерчески доступных автономных и полуавтономных робототехнических платформ

Продукт	Производитель робототехнической платформы	Страна
Яблоки	Abundant Robotics	США
	FF Robotics	Израиль
Клубника	Dogtooth Technologies	Великобритания
	Rubion Octinio	Бельгия
	Thorvald II	Норвегия
	Agrobot SW 6010	Испания
Сладкий перец	Sweeper	Нидерланды
Спаржа	Cerescon	Нидерланды
Томаты	Metomotion	Израиль
	Root-AI	США
Апельсины	Energid	США
	Agribot	Испания
Огурцы	VanHenten	Нидерланды
Баклажаны	Hayashi	Япония
Арбузы	Umeda	Япония
Грибы	Agaricus bisporus	Великобритания

В рамках данной статьи необходимо построить модель пространственного перемещения платформы и алгоритм управления ею.

При разработке или изучении алгоритмов нелинейного управления возникает сложность: их анализ возможен только в динамике и при взаимодействии с внешней средой. Использование реального объекта на ранних этапах проблематично, поэтому применяется компьютерное моделирование. Для корректности моделирования важно правильно ставить задачи. В данной работе рассматривается задача, к которой предъявляются требования наглядности и простоты для интуитивного понимания методологии без сложных вычислений.

Для моделирования системы управления платформой выбран отечественный программный продукт SimInTech (Simulation In Technic, моделирование в технических устройствах) компании ООО «3В Сервис». В отличие от иных средств симуляции математических моделей он обладает встроенным блоком «Оптимизатор». Данный блок позволяет определить тип регулятора и с заданной точностью параметры (составляющие) регулятора, которые обеспечивают наилучшее качество переходных процессов регулирования. Примеры подобных расчетов различных типов двигателей рассмотрены в работах [7 – 15].

Технические компоненты колесной робототехнической платформы

Общий вид разработанной платформы представлен на рис. 1. Особенностью платформы является мобильность и возможность использования устройств, которые можно на нее установить с целью мониторинга качества растительной продукции и растений в сельском хозяйстве.



Рис. 1. Колесная робототехническая платформа

Электродвигатели, вращающие колеса данной платформы посредством зубчатой передачи, позволяют осуществлять ее передвижение в разных направлениях. Повышенная проходимость позволяет использовать платформу не только на твердом грунте, например в теплицах, но и на грунтовых дорогах, например, в междурядье плодовых садов. Управление передвижением платформы осуществляется в автономном режиме и с пульта управления.

Автономный режим подразумевает автоматическое передвижение, которое контролируется промышленным компьютером, установленным внутри платформы. Структурная схема системы управления движением платформы представлена на рис. 2.

Колесная робототехническая платформа имеет возможность передвигаться автономно, при помощи программы, стереометрической камеры ZED2i и датчиков (US Sensors), а также при помощи пульта управления (RC transmitter). Переключение между режимами осуществляет реле (Relay). Управление электродвигателями (M1, M2) выполняет контроллер (VESC controller).

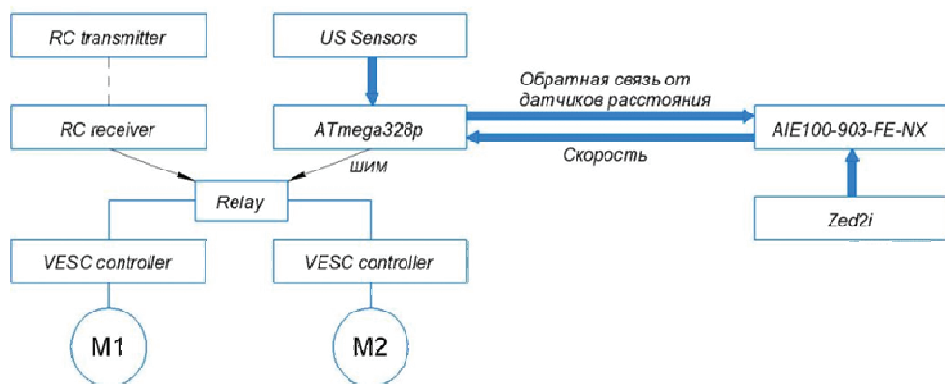


Рис. 2. Структурная схема системы управления движением платформы

Пульт управления посылает сигнал на приемник (RC receiver), который в свою очередь посылает сигнал на реле, тем самым переключает сигнал на управление колесной робототехнической платформой с пульта управления. В случае автономного перемещения, управление VESC-контроллерами выполняет промышленный компьютер (AIE100-903-FE-NX). Сигнал с компьютера поступает на ШИМ-контроллер (ATmega328p), после чего реле (Relay) переключает управление с пульта управления на компьютер. Компьютер получает информацию со стереометрической камеры ZED2i, установленной на платформе, а также сенсорных датчиков (US Sensors). Полученные данные с датчиков способствуют безопасному передвижению колесной робототехнической платформы. Непосредственно электродвигателем управляет VESC-контроллер.

Для повышения автономности платформы необходимо решить задачи разработки алгоритмов ее управления, прежде всего приводами платформы.

Моделирование системы управления приводами платформы

Упрощенная электрическая принципиальная схема системы управления приводом платформы показана на рис. 3 [16]. Модуль обеспечивает управление угловой скоростью вращения вала двигателя постоянного тока (ДПТ) в соответствии с заданным цифровым сигналом \tilde{U}_0 , который формируется программными средствами в микроконтроллере (МК). Аналого-цифровой преобразователь (АЦП) кодирует аналоговые сигналы обратной связи U_1 в цифровой сигнал \tilde{U}_1 , который поступает на вход МК; на другой его вход подается цифровой задающий сигнал \tilde{U}_0 ; в МК выполняются операции вычисления сигнала рассогласования и предписанного алгоритма управления; выходная величина микроконтроллера \tilde{U}_2 в двоичном коде подается на вход цифро-аналогового преобразователя (ЦАП), который преобразует цифровую величину \tilde{U}_2 в аналоговое значение напряжения U_2 . Затем этот сигнал поступает на усилитель (У), обозначенный на схеме как U_3 , после чего значение U_3 подается на силовой преобразователь (СП), который в зависимости от величины U_3 формирует напряжение на якоре ДПТ $U_{\text{я}}$. От значения $U_{\text{я}}$ зависит значение угловой скорости на валу ДПТ, которая передается на вал рабочего органа (РО) помощью редуктора (Р). Датчик угловой скорости вращения вала двигателя (ДС) регистрирует ее значения, которые преобразует в аналоговый сигнал напряжения $U_{\text{ДС}}$.

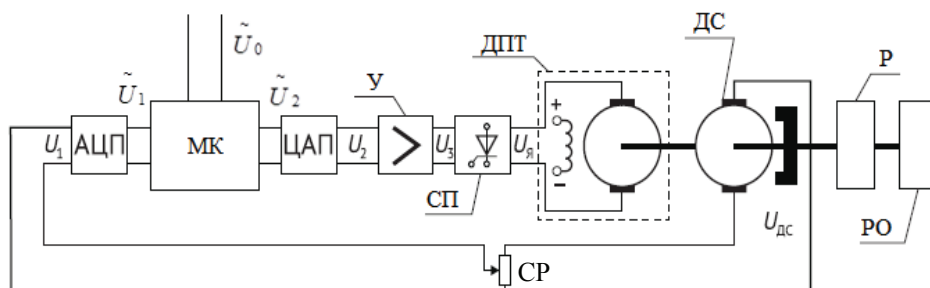


Рис. 3. Упрощенная электрическая принципиальная схема системы управления приводом [16]

Сигнал $U_{\text{ДС}}$ подключен к АЦП через согласующий резистор СР, преобразующий сигнал $U_{\text{ДС}}$ во входной сигнал обратной связи АЦП U_1 .

При моделировании ДПТ использована система уравнений [16]:

$$U_{\text{я}} = L_{\text{я}} \frac{dI}{dt} + R_{\text{я}} I + E_{\text{я}}; \quad J \frac{d\omega_{\text{Д}}}{dt} = M - M_{\text{с}},$$

где $U_{\text{я}}$ – напряжение в цепи якоря; $L_{\text{я}}$ – индуктивность якоря; I – сила тока в цепи якоря; t – время; $R_{\text{я}}$ – сопротивление обмоток якоря; $E_{\text{я}}$ – обратная электродвижущая сила в цепи якоря; J – эквивалентный момент инерции модуля движения, приведенный к валу ДПТ; $\omega_{\text{Д}}$ – угловая скорость вращения вала ДПТ; M – крутящий момент на валу ДПТ; $M_{\text{с}}$ – постоянный момент сопротивления, эквивалентный номинальному крутящему моменту ДПТ; $\varphi_{\text{Д}}$ – угол поворота вала ДПТ; k_e, k_M – коэффициент противоЭДС и моментный коэффициент соответственно, определяемые из выражений $E_{\text{я}} = k_e \omega_{\text{Д}}$, $M = k_M I$.

Для реализации модели системы управления (рис. 4) электроприводом использован программный продукт SimInTech 64, с помощью которого найдены оптимальные настройки системы управления электроприводом.

Результатом моделирования являются полученные оптимальные значения параметров регулятора: пропорциональной $K_p = 0,549$, интегральной $K_i = 11,725$ и дифференциальной $K_d = 0,008$ составляющих, обеспечивающие характеристики переходного процесса в электроприводе, характеризуемые графиком на рис. 5.

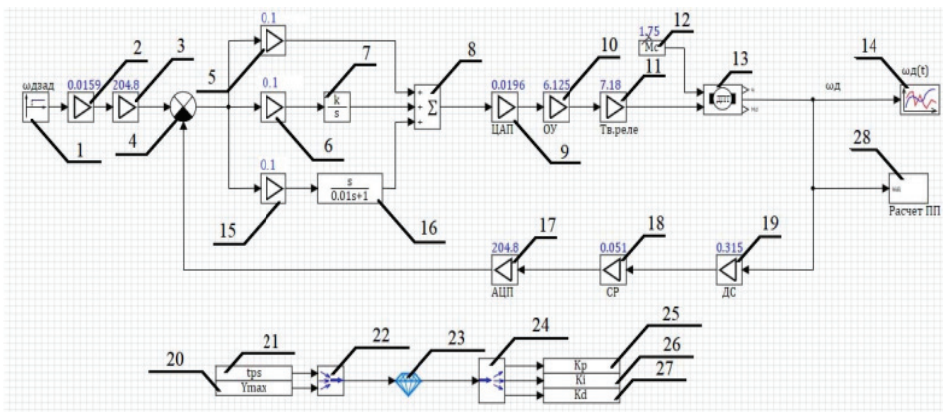


Рис. 4. Модель системы регулирования одного из двух двигателей платформы с использованием ПИД-регулятора:

1 – входное задающее значение угловой скорости вращения $\omega_{\text{зад}}$; 2, 3 – усилители; 4 – сумматор; 5, 6, 15 – значения пропорциональной (П), интегральной (И) и дифференциальной (Д) составляющих регулятора; 7 – интегратор; 8 – сумматор; 9 – ЦАП; 10 – значение пропорционального коэффициента усиления ДПТ; 11 – передаточный коэффициент управляющего реле; 12 – значение момента сопротивления $M_{\text{с}}$; 13 – ДПТ; 14 – осциллограф; 16 – передаточная функция дифференциальной составляющей ПИД-регулятора; 17 – АЦП; 18 – согласующий резистор СР; 19 – датчик угловой скорости вращения вала двигателя ДС; 20, 21 – блок чтения сигналов времени t_{ps} и максимального значения при регулировании Y_{max} ; 22 – мультиплексор; 23 – оптимизатор; 24 – демultipлексор; 25 – 27 – запись оптимизированных значений П, И и Д составляющих регулятора; 28 – блок расчета параметров переходного процесса

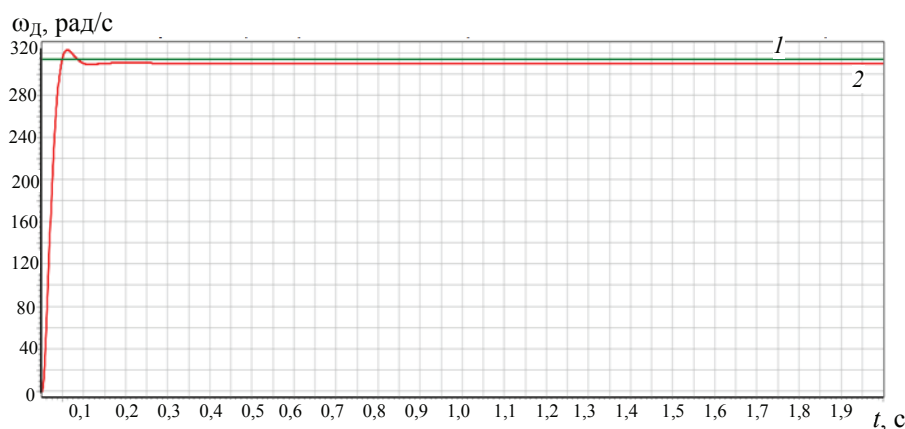


Рис. 5. График переходного процесса модели, включающей двигатель и ПИД-регулятор:
1 – $\omega_D(t)$; 2 – $\omega_{D\text{ зад}}(t)$

Моделирование пространственного перемещения платформы и алгоритма управления, обеспечивающего заданную траекторию движения

Для моделирования пространственного перемещения платформы модель управления электроприводом дополнена моделью пространственного положения, основанной на системе уравнений [17]:

$$\begin{cases} V_x = (r w_1 + a \theta) \sin \theta; \\ V_y = (r w_2 + a \theta) \cos \theta; \\ \theta = \frac{r w_2 - r w_1}{2a}, \end{cases}$$

где V_x и V_y – скорости платформы вдоль осей x и y соответственно, причем ось y направлена от центра масс платформы в сторону ее передней части, то есть по ходу движения, а ось x – вправо от центра масс; w_1 и w_2 – угловые скорости вращения колес платформы, полученные путем приведения угловых скоростей вращения выходных валов двигателей с помощью коэффициента передачи двух последовательных цепных передач

$k_{\text{цеп}} = \frac{1}{8,5} = 0,118$, рассчитанного как произведение

двух отношений (между валами двигателя и колес установлено последовательно две цепные передачи) количества зубьев на ведомой звездочке к количеству на ведущей; θ – текущий угол между положительным направлением оси x и направлением прямого движения платформы; r – радиус колеса платформы; $2a$ – расстояние между центральными осями левых и правых колес платформы.

На рисунке 6 показана структурная модель, выполненная в программе SimInTech, входными сигналами которой являются угловые скорости w_1 и w_2 вращения колес платформы. Выходные параметры модели – линейные скорости V_x и V_y перемещения платформы вдоль осей x , y соответственно, а также координаты положения платформы.

Указанная модель позволила разработать алгоритм управления, включающий операции:

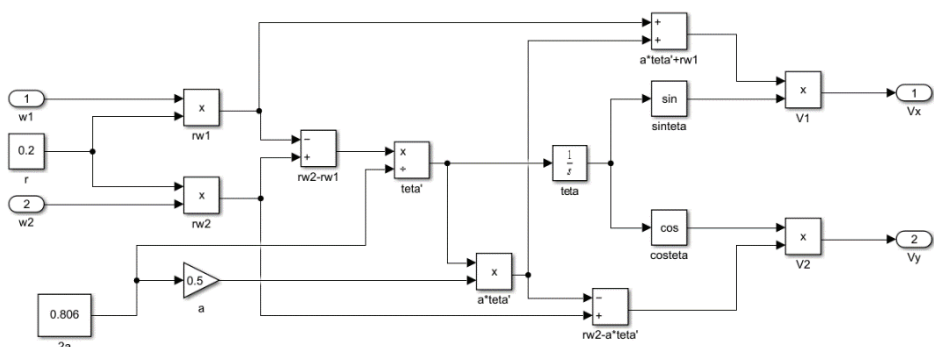


Рис. 6. Модель пространственного перемещения платформы

- поворот платформы на заданный угол, необходимый для достижения конечной точки пути;
- прямолинейное движение от стартовой до конечной точки.

Пример реализации алгоритма представлен на рис. 7. В начальный момент времени центр масс (ЦМ) платформы находится в точке A с координатами $(0; 0)$, система координат платформы – XY показана стрелками на рис. 7. При движении из точки A в точку B с координатами $(0; 1)$ угол поворота платформы $\theta = 0$, а прямолинейное перемещение составляет $S = 1$ м. Согласно полученным результатам моделирования, для перемещения в указанную точку длительность импульсов управляющих сигналов, подаваемых на электроприводы, должна составлять $\tau = 3,53$ с при амплитуде $+12$ В.

Для задания необходимого угла поворота требуется подавать на двигатели сигналы разной полярности амплитудой -12 В и $+12$ В. Для поворота на угол $\theta = 90^\circ$ по часовой стрелке необходимо подавать сигнал $+12$ В на двигатель, приводящий в движение колеса с левой стороны платформы, и -12 В – с правой. Длительность импульса должна составлять $\tau = 2,235$ с. Это обеспечивает перемещение платформы по траектории движения b из точки A с координатами $(0; 0)$ в точку C с координатами $(1; 0)$.

Для поворота платформы против часовой стрелки полярность управляющих сигналов необходимо инвертировать и в течение времени $\tau = 2,235$ с подавать сигнал $+12$ В на правый двигатель и -12 В – на левый. Примером реализации движения с предварительным поворотом платформы на угол $\theta = -90^\circ$, то есть против часовой стрелки, является движение по траектории из начальной точки A с координатами $(0; 0)$ в конечную точку D с координатами $(-1; 0)$.

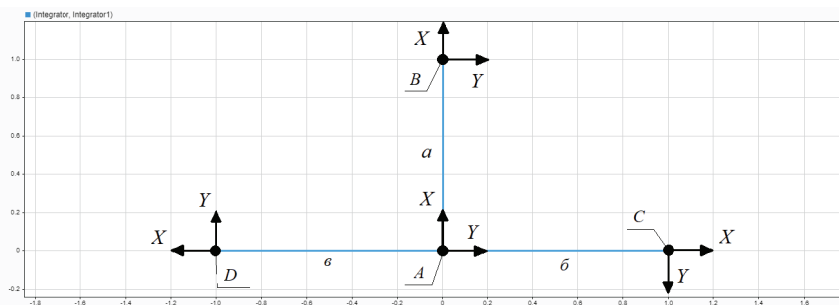


Рис. 7. Траектории движения платформы:

$A(0; 0)$ – начальное положение ЦМ платформы;
 $B(0; 1)$; $C(1; 0)$; $D(-1; 0)$ – конечные положения ЦМ платформы после движения по траекториям $a - c$ соответственно; XY – система координат платформы

Заключение

Таким образом, проведен обзор используемых в сельском хозяйстве мобильных робототехнических платформ и моделей управления их электроприводами. Выделены два основных подхода к управлению робототехническими платформами. Выбрана инерционная модель благодаря автономности и независимости от внешних сенсоров. Данный подход позволяет платформе ориентироваться даже в условиях недостаточной освещенности. Проведено моделирование работы выбранного двигателя постоянного тока. Аналитическим методом рассчитаны составляющие ПИД-регулятора для управления работой выбранного двигателя и осуществлен синтез такого регулятора. Построена модель пространственного перемещения платформы и представлен алгоритм управления ею, обеспечивающий заданную траекторию движения.

Проведенные исследования применимы для перемещения роботизированной платформы в теплицах и на складах. Робототехническая платформа при перемещении по пересеченной местности сталкивается с такими проблемами, как сильные вибрации и пониженная энергоэффективность, загрязнения. Предметом дальнейших разработок является совершенствование модели для снижения требований к качеству дорожного покрытия в местах применения платформы.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках проекта «Разработка роботизированного комплекса наземной и воздушной беспилотных платформ для применения в агротехнологиях» (ЕГИСУ НИОКТР: 124062100023-3).

Список литературы

1. HortiBot: A System Design of a Robotic Tool Carrier for High-tech Plant Nursing / R. N. Jørgensen, C. G. Sørensen, J. Maagaard, I. Havn, K. Jensen, H. T. Søgaard, L. B. Sørensen. – Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal. Manuscript ATOE 07 006. Vol. IX. July, 2007. – URL : <https://ecommons.cornell.edu/server/api/core/bitstreams/c3b6b8af-aaa5-4ac5-a62e-b5624b432fab/content> (дата обращения: 16.06.2025).
2. Vineyard Vigilant & INNovative Ecological Rover (VVINNER): an autonomous robot for automated scoring of vineyards / B. Keresztes, C. Germain, J.-P. Da Costa, G. Grenier, X. D. Beaulieu // Proceedings International Conference of Agricultural Engineering, Zurich, 06–10 July 2014. – URL : <https://geyseco.es/geystiona/adjs/comunicaciones/304/C04230001.pdf> (дата обращения: 16.06.2025).
3. Navigation System of the Autonomous Agricultural Robot “BoniRob” / P. Biber, U. Weiss, M. Dorna, A. Albert // Workshop on Agricultural Robotics: Enabling Safe, Efficient, and Affordable Robots for Food Production (Collocated with IROS 2012), Vilamoura, Portugal. – 2012. – Vol. 10. – URL: <https://www.cs.cmu.edu/~mberger/agrobotics2012/01Biber.pdf> (дата обращения: 16.06.2025).
4. Robotic in-row weed control in vegetables / T. Utstumo, F. Urdal, A. Brevik, J. Dørum, J. Netland [et al.] // Computers and Electronics in Agriculture. – 2018. – Vol. 154. – P. 36 – 45. doi: 10.1016/j.compag.2018.08.043
5. Ampatzidis, Y. iPathology: Robotic Applications and Management of Plants and Plant Diseases / Y. Ampatzidis, L. De Bellis, A. Luvisi // Sustainability (Switzerland). – 2017. – Vol. 9, No. 6. doi: 10.3390/su9061010 – URL :

<https://scispace.com/pdf/ipathology-robotic-applications-and-management-of-plants-and-m5o620q9fa.pdf> (дата обращения: 16.06.2025).

6. Liu, H. Proximal detecting invertebrate pests on crops using a deep residual convolutional neural network trained by virtual images / H. Liu, J. S. Chahl // *Artificial Intelligence in Agriculture*. – 2021. – Vol. 5, No. 5. – P. 13 – 23. doi: 10.1016/j.aiia.2021.01.003

7. Božek, P. The development of an optimally-tuned PID control for the actuator of a transport robot / P. Božek, Y. Nikitin // *Actuators*. – 2021. – Vol. 10, No. 8. – P. 195. doi 10.3390/act10080195

8. Using the SimInTech dynamic modeling environment to build and check the operation of automation systems / A. A. Abalov, S. V. Nosachev, V. P. Zharov, V. A. Minko // *MATEC Web of Conferences*, Rostov-on-Don, 12–14 Sept. 2018. – Vol. 226. – P. 04003. doi: 10.1051/mateconf/201822604003

9. Афоничев, Д. Н. Особенности моделирования электрических машин в программе SimInTech / Д. Н. Афоничев, С. Н. Пиляев // *Моделирование информационных систем : материалы Междунар. науч.-практ. конф., Воронеж, 19–20 мая 2021 года*. – Воронеж, 2021. – С. 340 – 345. doi: 10.34220/MIS340-345

10. Корзников, М. Э. Применение среды динамического моделирования SimInTech для исследования и анализа технических систем / М. Э. Корзников, Е. А. Овчаренко, И. В. Ершова // *Актуальные вопросы инновационного развития арктического региона РФ : сб. ст. V Всерос. науч.-практ. конф., Северодвинск, 20 – 30 ноября 2023 года*. – Северодвинск, 2024. – С. 619 – 623.

11. Синтез ПИД-регуляторов для объектов третьего порядка с запаздыванием: сравнение программ Altair Embed и SimInTech / Н. А. Журавлев, А. И. Уберт, В. Г. Шахтштейндер, О. П. Русаков // *Автоматика и программная инженерия*. – 2020. – № 2(32). – С. 43 – 50. – URL : http://jurnal.nips.ru/sites/default/files/AaSI-2-2020-5_0.pdf (дата обращения: 16.06.2025).

12. Афоничев, Д. Н. Использование программного комплекса SimInTech для проектирования мехатронных систем / Д. Н. Афоничев, С. Н. Пиляев, С. В. Кузьменко // *Наука и образование на современном этапе развития: опыт, проблемы и пути их решения : материалы нац. науч.-практ. конф., Воронеж, 26–27 ноября 2019 года*. – Воронеж, 2019. – С. 335 – 339.

13. Петуховская, В. Р. Разработка нечеткого регулятора в среде динамического моделирования SimInTech / В. Р. Петуховская, А. С. Александрова // *Химия. Экология. Урбанистика*. – 2020. – Т. 4. – С. 294 – 297.

14. Лыткин, С. В. Исследование возможностей SimInTech для моделирования автоматизированных и мехатронных систем / С. В. Лыткин // *Modern Science*. – 2021. – № 7. – С. 319 – 323.

15. Лекомцев, П. В. Моделирование гибридного шагового двигателя в пространстве состояний при переменном моменте сопротивления нагрузки / П. В. Лекомцев, Ю. Р. Никитин, С. А. Трефилов // *Интеллектуальные системы в производстве*. – 2020. – Т. 18, № 3. – С. 58 – 63. doi: 10.22213/2410-9304-2020-3-58-63

16. Герман-Галкин, С. Г. Модельное проектирование электромеханических мехатронных модулей движения в среде SimInTech / С. Г. Герман-Галкин, Б. А. Карташов, С. Н. Литвинов. – Москва : ДМК Пресс, 2021. – 494 с.

17. Бартенев, В. В. Математическая модель движения мобильного робота с двумя независимыми ведущими колесами по горизонтальной плоскости / В. В. Бартенев, С. Ф. Яцун, А. С. Аль-Еззи // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. – 2011. – Т. 13, № 4-1. – С. 288 – 293.

Simulation of the Control System for a Ground-Based Robotic Platform for Agriculture

P. V. Balabanov¹, A. S. Egorov², S. A. Senkevich²✉,
A. D. Mironov¹, V. O. Bulanov², D. A. Bobrov², V. A. Bugrov²

*Department of Mechatronics and Technological Measurements (1),
Research Laboratory "Intelligent unmanned robotic platforms"
of Department of Fundamental and Applied Research (2),
thegreatarchitect1424@gmail.com; TSTU, Tambov, Russia*

Keywords: mobile robotic platforms; modeling; electric drive control models; controller; automatic control system.

Abstract: The article provides an overview of mobile robotic platforms which are used in agriculture and control models for their electric drives. A simulation of a DC electric drive was carried out; optimal settings were obtained for the parameters of the electric drive control system. A model of moving the platform on a plane was developed, and an algorithm for controlling it was presented, which allows to ensure a given trajectory of movement.

References

1. Jørgensen R.N., Sørensen C.G., Maagaard J., Havn I., Jensen K., Søgaard H.T., Sørensen L.B. HortiBot: A System Design of a Robotic Tool Carrier for High-tech Plant Nursing, *Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal*. Manuscript ATOE 07 006, vol. IX, July, 2007, available at: <https://ecommons.cornell.edu/server/api/core/bitstreams/c3b6b8af-aaa5-4ac5-a62e-b5624b432fab/content> (accessed 06 June 2025).
2. Keresztes B., Germain C., Da Costa J.-P., Grenier G., Beaulieu X.D. Vineyard Vigilant & INNovative Ecological Rover (VVINNER): an autonomous robot for automated scoring of vineyards, *Proceedings International Conference of Agricultural Engineering*, Zurich, 06-10 July 2014, available at: <https://geyseco.es/geystional/adjs/comunicaciones/304/C04230001.pdf> (accessed 06 June 2025).
3. Biber P., Weiss U., Dorna M., Albert A. Navigation System of the Autonomous Agricultural Robot "BoniRob", *Workshop on Agricultural Robotics: Enabling Safe, Efficient, and Affordable Robots for Food Production (Collocated with IROS 2012)*, Vilamoura, Portugal, 2012, vol. 10, available at: <https://www.cs.cmu.edu/~mbergerm/agrobotics2012/01Biber.pdf> (accessed 06 June 2025).
4. Utstumo T., Urdal F., Brevik A., Dørum J., Netland J. [et al.], Robotic in-row weed control in vegetables, *Computers and Electronics in Agriculture*, 2018, vol. 154, pp. 36-45. doi: 10.1016/j.compag.2018.08.043
5. Ampatzidis Y., De Bellis L., Luvisi A. iPathology: Robotic Applications and Management of Plants and Plant Diseases, *Sustainability (Switzerland)*, 2017, vol. 9, no. 6. doi: 10.3390/su9061010, available at: <https://scispace.com/pdf/ipathology-robotic-applications-and-management-of-plants-and-m5o620q9fa.pdf> (accessed 06 June 2025).
6. Liu H., Chahl J.S. Proximal detecting invertebrate pests on crops using a deep residual convolutional neural network trained by virtual images, *Artificial Intelligence in Agriculture*, 2021, vol. 5, no. 5, pp. 13-23. doi: 10.1016/j.aiia.2021.01.003

7. Božek P., Nikitin Y. The development of an optimally-tuned PID control for the actuator of a transport robot, *Actuators*, 2021, vol. 10, no. 8, pp. 195. doi: 10.3390/act10080195
8. Abalov A.A., Nosachev S.V., Zharov V.P., Minko V.A. Using the SimInTech dynamic modeling environment to build and check the operation of automation systems, *MATEC Web of Conferences*, Rostov-on-Don, 12–14 Sept. 2018, vol. 226, pp. 04003. doi: 10.1051/mateconf/201822604003
9. Afonichev D.N., Pilyayev S.N. *Modelirovaniye informatsionnykh sistem: materialy Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Modeling of information systems: Proc. Int. scientific-practical. conf.], Voronezh, 19–20 May 2021, Voronezh, 2021, pp. 340–345. doi: 10.34220/MIS340-345 (In Russ., abstract in Eng.)
10. Korznikov M.E., Ovcharenko Ye.A., Yershova I.V. *Aktual'nyye voprosy innovatsionnogo razvitiya arkticheskogo regiona RF: sb. st. V Vseros. nauch.-prakt. konf.* [Actual issues of innovative development of the Arctic region of the Russian Federation: Coll. Art. V All-Russian scientific-practical. conf.], Severodvinsk, 20–30 November 2023, Severodvinsk, 2024, pp. 619–623. (In Russ., abstract in Eng.)
11. Zhuravlev N.A., Ubert A.I., Shakhtshneyder V.G., Rusakov O.P. [Synthesis of PID controllers for third-order objects with delay: comparison of Altair Embed and SimInTech programs], *Avtomatika i programmnaya inzheneriya* [Automation and software engineering], 2020, no. 2(32), pp. 43–50. available at: http://jurnal.nips.ru/sites/default/files/AaSI-2-2020-5_0.pdf (accessed 06 June 2025). (In Russ., abstract in Eng.)
12. Afonichev D.N., Pilyayev S.N., Kuz'menko S.V. *Nauka i obrazovaniye na sovremennom etape razvitiya: opyt, problemy i puti ikh resheniya: materialy nats. nauch.-prakt. konf.* [Science and education at the present stage of development: experience, problems and ways to solve them: materials of the national scientific and practical conf.], Voronezh, 26–27 November 2019, Voronezh, 2019, pp. 335–339. (In Russ., abstract in Eng.)
13. Petukhovskaya V.R., Aleksandrova A.S. [Development of a fuzzy controller in the SimInTech dynamic modeling environment], *Khimiya. Ekologiya. Urbanistika* [Chemistry. Ecology. Urban studies], 2020, vol. 4, pp. 294–297. (In Russ., abstract in Eng.)
14. Lytkin S.V. [Study of SimInTech Capabilities for Modeling Automated and Mechatronic Systems], *Modern Science*, 2021, no. 7, pp. 319–323. (In Russ., abstract in Eng.)
15. Lekomtsev P.V., Nikitin Yu.R., Trefilov S.A. [Modeling of a Hybrid Stepper Motor in State Space with a Variable Load Resistance Torque], *Intellektual'nyye sistemy v proizvodstve* [Intelligent Systems in Production], 2020, vol. 18, no. 3, pp. 58–63. doi: 10.22213/2410-9304-2020-3-58-63 (In Russ., abstract in Eng.)
16. German-Galkin S.G., Kartashov B.A., Litvinov S.N. *Model'noye proyektirovaniye elektromekhanicheskikh mekhatronnykh moduley dvizheniya v srede SimInTech* [Model design of electromechanical mechatronic motion modules in the SimInTech environment], Moscow: DMK Press, 2021, 494 p. (In Russ.)
17. Bartenev V.V., Yatsun S.F., Al'-Yezzi A.S. [Mathematical model of the motion of a mobile robot with two independent driving wheels along a horizontal plane], *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk* [Bulletin of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2011, vol. 13, no. 4-1, pp. 288–293. (In Russ., abstract in Eng.)

Simulation eines Steuerungssystems für eine bodengestützte Roboterplattform für die Landwirtschaft

Zusammenfassung: Dieser Artikel bietet einen Überblick über mobile Roboterplattformen in der Landwirtschaft und Regelungsmodelle für deren elektrische Antriebe. Ein Gleichstromantrieb ist simuliert. Optimale Einstellungen für die Parameter des Regelungssystems sind ermittelt. Ein Modell der Plattformbewegung auf der Ebene ist entwickelt und ein Regelungsalgorithmus zur Sicherstellung einer vorgegebenen Trajektorie ist vorgestellt.

Simulation du système de contrôle de plate-forme robotique terrestre pour l'agriculture

Résumé: Est présentée une vue d'ensemble des plates-formes robotiques mobiles utilisées dans l'agriculture et des modèles de contrôle de leur alimentation électrique. Est réalisée une simulation d'entraînement électrique à courant continu. Sont optimisés les paramètres du système de commande électrique. Est développé un modèle de déplacement de la plate-forme sur le plan; est montré un algorithme de contrôle pour fournir une trajectoire de mouvement donnée.

Авторы: *Балабанов Павел Владимирович* – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Мехатроника и технологические измерения»; *Егоров Андрей Сергеевич* – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Интеллектуальные беспилотные робототехнические платформы» Управления фундаментальных и прикладных исследований; *Сенкевич Сергей Алексеевич* – инженер научно-исследовательской лаборатории «Интеллектуальные беспилотные робототехнические платформы» Управления фундаментальных и прикладных исследований; *Миرونнов Александр Дмитриевич* – студент; *Буланова Валентина Олеговна* – кандидат технических наук, инженер научно-исследовательской лаборатории «Интеллектуальные беспилотные робототехнические платформы» Управления фундаментальных и прикладных исследований; *Бобров Даниил Александрович* – инженер научно-исследовательской лаборатории «Интеллектуальные беспилотные робототехнические платформы» Управления фундаментальных и прикладных исследований; *Бугров Вадим Александрович* – инженер научно-исследовательской лаборатории «Интеллектуальные беспилотные робототехнические платформы» Управления фундаментальных и прикладных исследований, ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия.