

## ПРИБОРЫ, СИСТЕМЫ И ИЗДЕЛИЯ МЕДИЦИНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

УДК 621.389, 681.586.2  
doi:10.21685/2307-5538-2021-2-6

### БЛОК УПРАВЛЕНИЯ РОБОТИЗИРОВАННОЙ КИСТЬЮ РУКИ

Е. В. Буньгин<sup>1</sup>, В. М. Чайковский<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Пензенский государственный университет, Пенза, Россия  
<sup>1,2</sup> rtech@pnzgu.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Механические операции в различной среде, агрессивной для кожи человека, успешно могут быть выполнены роботизированной кистью руки, управляемой специальным блоком. Последний содержит перчатку с тензорезистивными датчиками, управляющими работой роботизированной кистью руки человека, с помощью сервоприводов, обрабатывающих сигналы датчиков и повторяющих все движения перчатки с данными датчиками на кисти руки человека. Причем конструкция перчатки не вызывает дискомфорта, не сковывает движения кисти руки человека и не нарушает ее естественного движения. *Материалы и методы.* Разработка блока управления роботизированной кистью руки проведена с использованием 3D-печати с последующим схемотехническим макетированием всей сопутствующей электронной части. *Результаты.* Изготовлен действующий вариант предплечья руки с роботизированной кистью, управляемой по Bluetooth-каналу сигналами от тензорезистивных датчиков перчатки, одетой на кисть руки человека. *Выводы.* Сравнительный анализ данного устройства с существующими аналогами: робот-манипулятор компании «Birdi» [1], линейный робот-манипулятор отечественной компании «АРКОДИМ-Про» [2] и другие – показывают его достоинства, достигаемые как за счет использования современных методов реализации, с экологичностью производства его компонентов, так и в возможности достаточно широкой перспективы в разработке на его основе подобных устройств, решающих аналогичные задачи.

**Ключевые слова:** тензорезистивный датчик, роботизированное устройство, радиоуправление

**Для цитирования:** Буньгин Е. В., Чайковский В. М. Блок управления роботизированной кистью руки // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2021. № 2. С. 47–52. doi:10.21685/2307-5538-2021-2-6

### ROBOTICK HAND CONTROL UNIT

E.V. Bunygin<sup>1</sup>, V.M. Chaykovskiy<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Penza State University, Penza, Russia  
<sup>1,2</sup> rtech@pnzgu.ru

**Abstract.** *Background.* Mechanical operations in an environment aggressive to human skin can be successfully performed by a robotic arm controlled by a special unit. The latter contains a glove with tensorresistive sensors that control a robotic human hand, using servo drives, processing sensor signals and repeating the movements of the glove with these sensors on the human hand. Moreover, the design of the glove does not cause discomfort, does not constrain the movement of the human hand and does not disrupt its natural movement. *Materials and methods.* The development of the control unit for the robotic hand was carried out using 3D printing, followed by an electronic layout of the entire accompanying electronic part. *Results.* A working version of the forearm of the hand with a robotic hand, controlled via a Bluetooth-channel by signals from strain-resistive sensors of a glove, worn on a human hand, has been made. *Findings.* A comparative analysis of this device with existing analogues: robotic manipulator of «Birdi» company [1], linear robotic manipulator of domestic company ARKODIM-Pro [2], etc. Shows its advantages, achieved both through the use of modern methods of implementation, environmental friendliness of production of its components, as well as the possibility of a fairly broad perspective in the development of similar devices on its basis that solve similar problems.

**Keywords:** tensorresistive sensor, robotic device, radio control

**For citation:** Bunygin E.V., Tchaikovskiy V.M. Robotic hand control unit. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control.* 2021;2: 47–52. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2021-2-6

Целью работы является разработка блока управления роботизированным устройством (механической кистью руки в виде перчатки), созданной с помощью 3D-печати, с использованием тензорезистивных датчиков [3], расположенных на объекте управления. Предлагаемая система позволяет удаленно обеспечивать управление устройством посредством радиосвязи через Bluetooth-модуль. Работа системы осуществляется следующим образом:

1) при сгибании пальцев перчатки поступает сигнал с закрепленных на них тензорезистивных датчиков;

2) проходя по цепи передающего блока, сигнал усиливается, оцифровывается, подвергается программной обработке в узле микроконтроллера и передается в радиоканал через оконечное устройство – Bluetooth-модуль;

3) полученный сигнал на аналогичном Bluetooth-модуле приемной части так же обрабатывается и поступает на сервоприводы, находящиеся в конструкции предплечья руки, обеспечивающие подвижность роботизированной кисти.

Основные задачи, стоящие перед робототехникой, – это разработка теоретических методов и технологических приемов для реализации функций человека в виде конкретных устройств, обеспечивающих эффективное выполнение определенного технологического процесса. Использование аддитивных технологий для создания элементов конструкций позволяет значительно сокращать время и затраты на производство, материалы и рабочую силу.

Структурная схема предлагаемого блока управления представлена на рис. 1. Она содержит две части, передающую и приемную, в состав которых входят: пять тензорезистивных датчиков (ТД1-5), пять усилителей напряжения (УН1-5), мультиплексор, аналого-цифровой преобразователь, два микроконтроллера, два Bluetooth-модуля, ШИМ-контроллер, понижающий преобразователь напряжения, два стабилизатора напряжения, аккумулятор и схему его заряда. Также в состав приемной части входят пять серводвигателей, выполняющих функцию оконечного исполнительного устройства.

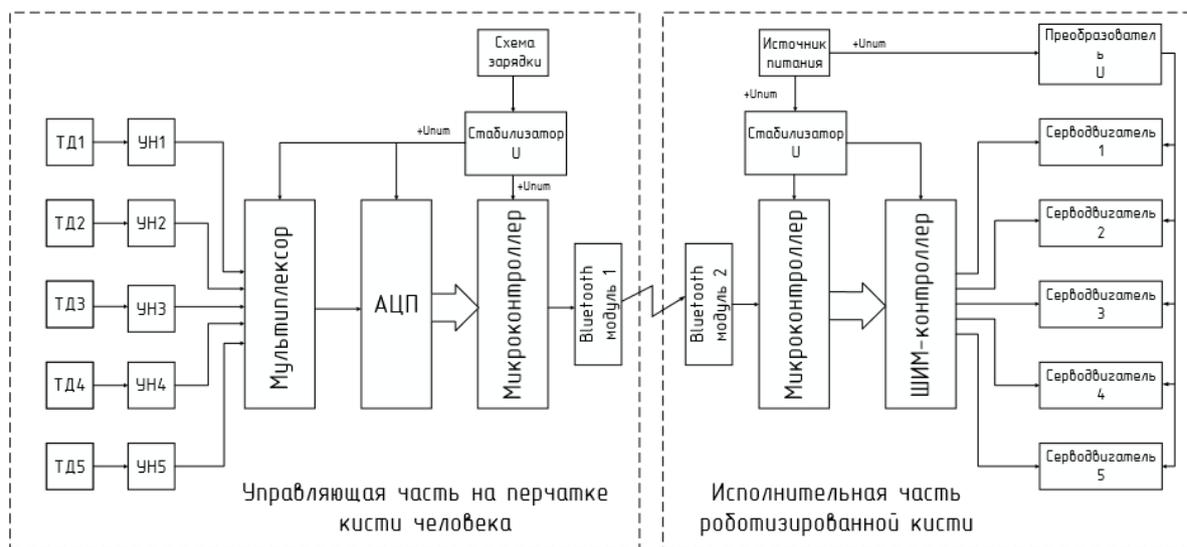


Рис. 1. Структурная схема блока управления роботизированной кистью

Работа предлагаемого блока осуществляется следующим образом. Тензорезистивные датчики [4], входящие в состав перчатки на кисти руки оператора, за счет воздействия на них механического воздействия (изгиба пальцев кисти руки оператора), формируют электрические сигналы в виде изменения значения амплитуды своего выходного напряжения. Далее эти сигналы через усилители напряжения поступают на входы аналогового мультиплексора, после чего коммутированные поступают с выхода мультиплексора на вход АЦП. Далее они уже в виде дискретных сигналов поступают на микроконтроллер, где проходят обработку про-

граммным комплексом. Программное обеспечение микроконтроллера компилирует полученную информацию с датчиков и после ее преобразования отправляет ее уже в виде сигнала на Bluetooth-модуль для последующей передачи по радиоканалу.

В микроконтроллере приемной части полученный сигнал проходит программную обработку, после чего он через ШИМ-контроллер поступает на серводвигатели, отвечающие за подвижность роботизированной кисти.

Понижающий преобразователь напряжения вырабатывает основное напряжение питания для нормальной работы серводвигателей. Питание передающего блока осуществляется от аккумулятора напряжением 12 В, приемного блока – от батареи напряжением 12 В. Зарядка аккумулятора осуществляется от внешнего источника питания через встроенную схему заряда.

Для обеспечения стабильной работы в цепях питания элементов схемы используются отдельные стабилизаторы напряжения.

В предлагаемой конструкции для регистрации положения пальцев руки человека используется тензометрический датчик, преобразующий величину деформации в удобный для измерения электрический сигнал. При сгибании пальцев деформация упругого элемента происходит вместе с тензорезистором. Изменение значения сопротивления тензорезистора позволяет судить о силе воздействия на датчик, а следовательно, и об угле сгибания пальца. В качестве чувствительного элемента датчика используется материал Velostat (велостат) [5] – тензорезистивный материал, изготавливаемый из полиолефина (полимерной пленки), пропитанный сажей.

Данный материал обладает следующими преимуществами перед другими тензорезистивными датчиками давления и сгибания, заключающимися в низкой стоимости, компактных размерах, стойкости к изменениям температуры окружающей среды (от  $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $65\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), объемным сопротивлением более 500 Ом/см и поверхностным сопротивлением более 31 кОм/см<sup>2</sup>.

Изменение значения выходного напряжения с датчика лежит в узком диапазоне, поэтому для точного определения положения пальцев рук требуется усилить напряжение выходного сигнала и привести его уровень к значению входного напряжения аналогово-цифрового преобразователя.

В качестве усилительного элемента используется распространенная микросхема «четверенного» ОУ – LM358 [6], отличительными свойствами которой являются высокое быстродействие, высокое входное сопротивление, обеспечиваемое наличием на его входе полевых транзисторов, малое энергопотребление, низкий уровень шума, а также возможность работать с входными напряжениями, близкими по уровню к напряжению питания.

Сигналы от тензорезистивных датчиков ТД<sub>1</sub> – ТД<sub>5</sub> поступают на мультиплексор, используемый для коммутации входных сигналов на единый АЦП. В данном случае используется аналоговый мультиплексор. Оптимальным вариантом по количеству входов/выходов используется мультиплексор 74НС4051, позволяющий использовать его в качестве мультиплексора и демультимплексора [7].

Для дальнейшей обработки значения напряжений от ТД<sub>1</sub> – ТД<sub>5</sub> преобразуются в цифровой код с помощью аналого-цифрового преобразователя, реализованного на микросхеме ADC121C021 [8, 9], представляющего собой 12-битный АЦП, работа которого основана на регистре последовательного приближения. В свою очередь, микросхема ADC121C021 за счет низкого энергопотребления и малых габаритов корпуса является весьма удачным для использования данного преобразователя в составе оборудования, работающего с маломощными источниками питания.

В связи с тем, что технические условия в нашем случае не предъявляют особых требований к микроконтроллеру, то выбор последнего определяется в основном только критериями разрабатываемого устройства, т.е. требуется, чтобы используемый контроллер с интерфейсом I2C для подключения АЦП обладал достаточным количеством выводов для подключения прочей периферии. Предпочтительным в данном случае является 8-битный AVR микроконтроллер ATtiny85, обладающий к тому же низким энергопотреблением [9].

Питание отдельных узлов стабилизируемым напряжением обеспечивается стабилизатором напряжения линейного типа, основным требованием выбора которого является “малое” падение напряжения и фиксированный уровень его выходного напряжения. В нем также должно быть обеспечено ограничение по силе потребляемого тока и тепловая защита в виде

отключения при его перегреве. Указанным требованиям соответствует стабилизатор на микросхеме LM1117-ADJ [10], являющийся линейным стабилизатором с выходным напряжением 3,3 В, падением напряжения 1,2 В при токе нагрузки до 800 мА.

В качестве зарядного устройства используется TP4056 [11], являющееся линейным зарядным устройством напряжения постоянного тока для одноэлементных литий-ионных аккумуляторов.

В качестве приемного и передающего устройств используется Bluetooth модуль HC-05 [12], подходящий по всем параметрам. Модуль также может использоваться для передачи данных с аналогичным Bluetooth-модулем.

В отличие от микроконтроллера, используемого в передающей части, в приемной части необходимо использовать более функциональный микроконтроллер, обладающий большим набором подключаемых периферийных устройств, а также большим числом выводов и объемом памяти. Данный микроконтроллер взят из линейки AVR фирмы Atmel и используется модель ATmega328P [13], являющаяся маломощным 8-разрядным КМОП-микроконтроллером, основанным на улучшенной архитектуре.

Для регулирования значения выходных параметров, передаваемых на сервоприводы с выхода микроконтроллера приемной части, используется ШИМ-контроллер [14] с питающим напряжением 3,3–5 В, тактовой частотой 25 МГц. Обладающий к тому же возможностью подключения к нему не менее пяти сервоприводов с типом интерфейса I2C, обеспечивающего их когерентную работу с микроконтроллером, с учетом сказанного предпочтение в использовании отдано ШИМ-контроллеру PCA9685 [15].

Для обеспечения подвижности роботизированной кисти используются серводвигатели типа MG995 [16], управляемые выходными сигналами ШИМ-контроллера, представляющие собой сигнал с широтно-импульсной модуляцией. Выбор последних также осуществлялся с учетом их веса и размера.

Для формирования исходных управляющих сигналов была разработана перчатка с тензорезистивными датчиками и конструкция роботизированной кисти руки человека, оснащенной сервоприводами, обрабатывающими сигналы датчиков, в результате чего происходит повторение роботизированной кистью движений перчатки с датчиками. Последняя не вызывает дискомфорта, не сковывает движения кисти руки и не нарушает ее естественного движения. Готовые тензорезистивные датчики фиксируются клейкой лентой к наружной поверхности кисти руки человека – оператора. Размеры электронной платы передающей части системы позволяют зафиксировать ее корпус непосредственно на наружной поверхности перчатки. Внешний вид перчатки с датчиками и корпусом передающей части представлен на рис. 2.



Рис. 2. Внешний вид перчатки с датчиками

Изготовление роботизированной кисти и руки осуществлено на 3D-принтере с последующей сборкой. Печать осуществлялась на 3D-принтере марки CuberX [17] поэлементно с использованием файлов stl формата, предназначенных для хранения трехмерных моделей объектов, используемых в аддитивных технологиях, спроектированных в программах моделирования «Компас 3D» и ADEM CAD [18]. Элементы крепятся друг к другу шарнирами. Сборка конструкции производилась с помощью стандартных инструментов: отверток, ключей, при этом узлы сочленения обеспечивают минимальное трение. Движение элементами кисти (фалангами пальцев) механической руки осуществляется серводвигателями путем изменения длины капроновой нити, пропущенной внутри элементов, попеременно увеличивающих или сокращающих ее длину в строгом соответствии с положением датчиков на перчатке кисти че-

ловека – оператора. Соответственно сервоприводы подключаются к микроконтроллеру и источнику питания.

Вид роботизированного устройства, алгоритм работы которого описан выше, представлен на рис. 3.



Рис. 3. Внешний вид роботизированной кисти руки

### *Заключение*

В ходе работы был разработан блок управления роботизированным устройством, позволяющий дистанционно управлять роботизированной кистью руки. Также были разработаны необходимые электрические схемы, состоящие из современных аналоговых устройств и элементов, цифровых интегральных микросхем и микроконтроллеров, произведен выбор методов и компонентов для практической реализации предлагаемого блока управления.

Отличительными достоинствами последнего среди аналогов являются: современные методы реализации и экологичность производства компонентов, дешевизна используемых средств связи и программной обработки информации и сигналов управления, а также весьма достаточная перспектива использования его в качестве прототипа при разработке аналогичных устройств, решающих подобные задачи.

### *Список литературы*

1. Промышленный робот-манипулятор «Birbi М». URL: <https://bid.life/?yclid=674174233512011652#birbi>
2. Сайт производителя промышленных роботов «АРКОДИМ-Про». URL: <https://www.arkodimpro.ru/>
3. Буньгин Е. В., Петрунин А. Р., Чайковский В. М. Устройство обработки сигналов тензорезистивного датчика // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2019. Т. 1. С. 232–234.
4. Датчики : справочное пособие / под общ. ред. В. М. Шарапова, Е. С. Полищука. М. : Техносфера, 2012. 624 с.
5. Технология flex sensor. URL: [https://radal.ru/manufacturer/adafruit\\_industries\\_llc/](https://radal.ru/manufacturer/adafruit_industries_llc/)
6. Авербух В. Д. Операционные усилители и компараторы. М. : Додэка-XXI, 2001. 560 с.
7. Усольцев А. А. Общая электротехника : учеб. пособие. СПб. : СПбГУ ИТМО, 2009. 301 с.
8. Волович Г. И., Ежов В. Б. Микросхемы АЦП и ЦАП : справочник. М. : Додэка-XXI, 2005. 423 с.
9. Топильский В. Б. Схемотехника аналого-цифровых преобразователей. М. : Техносфера, 2014. 288 с.
10. Технический паспорт LM1117-ADJ. URL: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm1117.pdf> ts = 1608758805612
11. Сайт производителя зарядного модуля TP4056. URL: <http://www.tp-asic.com/>
12. Сайт производителя Bluetooth-модуля HC-05. URL: <https://amperka.ru/product/troyka-bluetooth-hc-05>
13. Белов А. В. Конструирование устройств на микроконтроллерах. СПб. : Наука и Техника, 2005. 256 с.
14. Гельман М. В., Дудкин М. М., Преображенский К. А. Преобразовательная техника : учеб. пособие. Челябинск : Изд. центр ЮУрГУ, 2009. 425 с.
15. ШИМ-контроллер PCA9685. URL: <https://www.nxp.com/products/power-management/lighting-driver-and-controller-ics/ic-led-controllers/16-channel-12-bit-pwm-fm-plus-ic-bus-led-controller:PCA9685>
16. Сервопривод MG995. URL: <https://3d-diy.ru/wiki/arduino-mechanics/servo-mg995/>
17. Описание и технические характеристики 3D-принтеров марки CuberX. URL: <https://3dtoday.ru/3d-printers/3d-systems/cubex/>
18. Официальный сайт программы моделирования «Компас 3D». URL: <https://kompas.ru/>

## References

1. *Promyshlennyy robot-manipulyator «Birbi M»* = Industrial robot manipulator "Birbi M". (In Russ.). Available at: <https://bid.life/?yclid=674174233512011652#birbi>
2. *Sayt proizvoditelya promyshlennykh robotov «ARKODIM-Pro»* = Website of the manufacturer of industrial robots "ARKODIM-Pro". (In Russ.). Available at: <https://www.arkodimpro.ru/>
3. Bunygin E.V., Petrunin A.R., Chaykovskiy V.M. Signal processing device of a strain-resistive sensor. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality. 2019;1:232–234. (In Russ.).
4. Sharapov V. M., Polishchuk E. S. (eds.). *Datchiki: spravochnoe posobie* = Sensors : a reference guide. Moscow: Tekhnosfera, 2012:624. (In Russ.).
5. *Technology flex sensor*. Available at: [https://radal.ru/manufacturer/adafruit\\_industries\\_llc/](https://radal.ru/manufacturer/adafruit_industries_llc/)
6. Averbukh V.D. *Operatsionnye usiliteli i komparatory* = Operational amplifiers and comparators. Moscow: Dodeka-XXI, 2001:560. (In Russ.).
7. Usol'tsev A.A. *Obshchaya elektrotehnika: uchebnoe posobie* = General electrical engineering: a textbook. Saint-Petersburg: SPbGU ITMO, 2009:301. (In Russ.).
8. Volovich G.I., Ezhov V.B. *Mikroskhemy ATsP i TsAP: spravochnik* = ADC and DAC chips: reference. Moscow: Dodeka-XXI, 2005:423. (In Russ.).
9. Topil'skiy V.B. *Skhemotekhnika analogo-tsifrovyykh preobrazovateley* = Circuit design of analog-to-digital converters. Moscow: Tekhnosfera, 2014:288. (In Russ.).
10. *Tekhnicheskij pasport LM1117-ADJ* = Technical data sheet LM1117-ADJ. (In Russ.). Available at: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm1117.pdf> ts = 1608758805612
11. *Sayt proizvoditelya zaryadnogo modulya TP4056* = Website of the manufacturer of the TP4056 charging module. (In Russ.). Available at: <http://www.tp-asic.com/>
12. *Sayt proizvoditelya Bluetooth-modulya HC-05* = Website of the manufacturer of the HC-05 Bluetooth module. (In Russ.). Available at: <https://amperka.ru/product/troyka-bluetooth-hc-05>
13. Belov A.V. *Konstruirovaniye ustroystv na mikrokontrollerakh* = Designing devices on microcontrollers. Saint-Petersburg: Nauka i Tekhnika, 2005:256. (In Russ.).
14. Gel'man M.V., Dudkin M.M., Preobrazhenskiy K.A. *Preobrazovatel'naya tekhnika: ucheb. posobie* = Transformative technology: a textbook. Chelyabinsk: Izd. tsentr YuUrGU, 2009:425. (In Russ.).
15. *Shim-kontroller PCA9685*. Available at: <https://www.nxp.com/products/power-management/lighting-driver-and-controller-ics/ic-led-controllers/16-channel-12-bit-pwm-fm-plus-ic-bus-led-controller:PCA9685>
16. *Servoprivod MG995*. Available at: <https://3d-diy.ru/wiki/arduino-mechanics/servo-mg995/>
17. *Opisanie i tekhnicheskie kharakteristiki 3D-printerov marki CuberX* = Description and technical characteristics of CuberX brand 3D printers. (In Russ.). Available at: <https://3dtoday.ru/3d-printers/3d-systems/cubex/>
18. *Ofitsial'nyy sayt programmy modelirovaniya «Kompas 3D»* = Official website of the Compass 3D modeling program. (In Russ.). Available at: <https://kompas.ru/>

## Информация об авторах / Information about the authors

**Егор Валерьевич Буньгин**

студент,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: [rtech@pnzgu.ru](mailto:rtech@pnzgu.ru)

**Egor V. Bunygin**

Student,  
Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia )

**Виктор Михайлович Чайковский**

кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры радиотехники  
и радиоэлектронных систем,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: [rtech@pnzgu.ru](mailto:rtech@pnzgu.ru)

**Victor M. Chaykovskiy**

Candidate of technical sciences, associate professor,  
associate professor of sub-department  
of radio engineering and radio electronic systems,  
Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia )

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /  
The authors declare no conflicts of interests.**

**Поступила в редакцию / Received** 29.03.2021

**Поступила после рецензирования / Revised** 05.04.2021

**Принята к публикации / Accepted** 15.04.2021