

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ АВТОНОМНОЙ РАБОТЫ КОНЕЧНЫХ УСТРОЙСТВ ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ

А. Р. МАХМУТОВ, А. М. ВУЛЬФИН, К. В. МИРОНОВ

Аннотация. Данная статья выполняется в рамках проекта разработки защищенной системы передачи данных в распределенных сенсорных сетях. В статье представлены расчеты времени автономной работы разных вариаций конечных устройств от одной аккумуляторной батареи формата 18650. В статье представлены результаты проведенного тестирования на время автономной работы различного аппаратного обеспечения для прототипирования устройств. Приведены состав и характеристики используемого оборудования, состав аппаратных сборок и способы коммутации. Рассмотрена использованная методика определения времени автономной работы каждой аппаратной сборки. Выделены способы увеличения времени автономной работы используемых аппаратных сборок. Приведены экспериментальные данные.

Ключевые слова: микроконтроллер; автономность; интернет вещей; сенсорные сети; энергопотребление.

ВВЕДЕНИЕ

В современном мире стремительно растет объем сетей интернета вещей. Причем заметный рост характерен как потребительскому сегменту (Consumer IoT), так и промышленному (Industrial IoT). На рисунке 1, а приводится прогноз объема рынка интернета вещей в России в период с 2018 по 2022 годы в миллиардах рублей. На рисунке 1, б приводится прогноз объема рынка интернета вещей в мире за этот же период в миллиардах долларов. Российский прогноз содержит как оптимистичные значения (оранжевый цвет), так и пессимистичные (серый цвет) [1]. Стоит отметить, что даже при пессимистичном варианте развития событий по прогнозу сохраняется тренд на рост объема рынка.

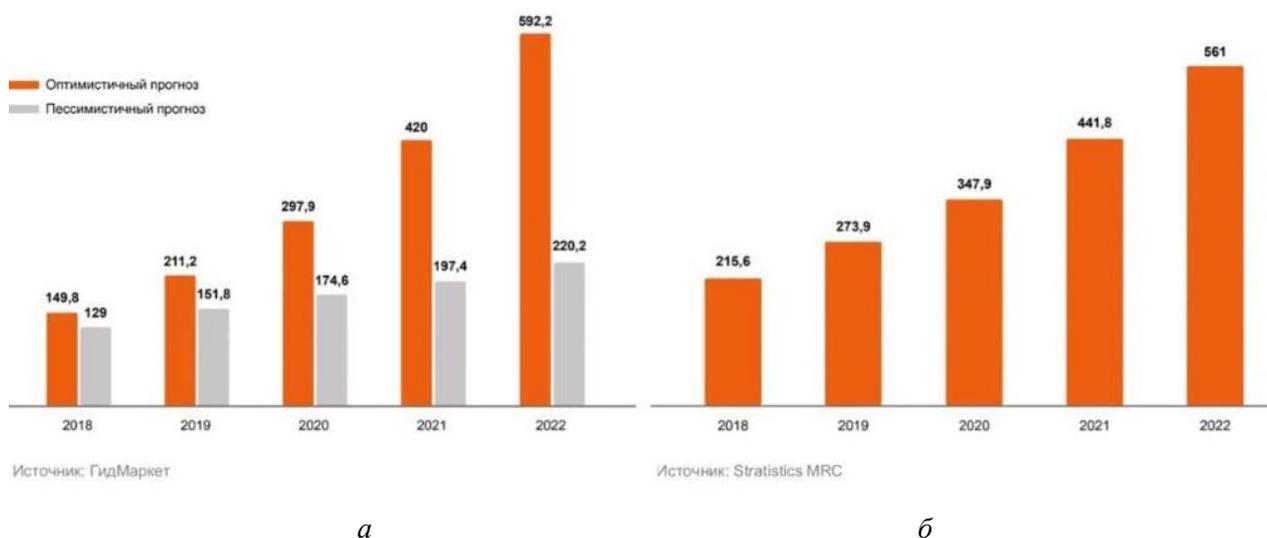


Рис. 1 Прогноз объема рынка интернета вещей в России (а) и мире (б)

Ключевыми отраслями для развития промышленного интернета вещей в России являются:

- газовая;
- нефтедобывающая и перерабатывающая;
- атомная;
- медицинская;
- энергетическая.

Среди наиболее важных показателей для различных сценариев применения устройств интернета вещей следует выделить следующие:

- скорость передачи данных;
- качество и надежность связи;
- время автономной работы устройств;
- компактность устройств;
- безотказность;
- низкая стоимость обслуживания и содержания;
- высокая степень автоматизации.

В зависимости от разных сценариев применения важность каждого показателя варьируется.

Данная работа посвящена проблеме автономности конечных устройств интернета вещей. К примеру, российская компания «Стриж», занимающаяся производством и реализацией устройств интернета вещей в жилищно-коммунальной сфере заявляет средние показатели потребления питания до 10 мкА в режиме «сна» и до 50 мА в режиме передачи (оценка по верхней планке) [2]. Заявляется лишь, что устройства «Стриж» используют протокол XNB и передают радиосигнал мощностью до 25 мВт. На сайте производителя указан автономный срок работы XNB-счетчиков «Стриж» в 6 лет. К сожалению, не предоставляется информация об используемом аппаратном обеспечении и аккумуляторе. В данной статье представлены результаты проведенного тестирования на время автономной работы различного аппаратного обеспечения для прототипирования устройств.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБОРУДОВАНИЯ И СПОСОБЫ КОММУТАЦИИ

Для тестирования использовались АКБ формата 18650 под брендом LiitoKala модели NCR18650B. Заявленная емкость составляет 3,4 А·ч, напряжение 3,7 В и мощность 12,6 Вт·ч. Фактическая емкость оказалась порядка 3,1 А·ч, что составляет 0,912 от заявленной. Соответственно, фактическая мощность составляет порядка 11,47 Вт·ч. Зарядка аккумуляторов производилась сетевым зарядным устройством LiitoKala Lii-500 током в 0,3 А·ч. Также при помощи этого устройства было определено значение фактической емкости аккумуляторов.

Датчик атмосферного давления, влажности и температуры BME280 является неплохим выбором для проектов, в которых требуется универсальный метеодатчик. Основные характеристики следующие:

- интерфейс подключения: SPI, I2C;
- напряжение питания: 5,0 В;
- диапазон измерений давления: 300–1100 гПа;
- диапазон измерений температуры: от – 40 до + 85 °С;
- диапазон измерений влажности: 0–100 %;
- погрешность измерений: $P = 0,01$ гПа (менее 10 см); $T = 0,01$ °С; $H = 3\%$.

Использованная схема подключения контактов по протоколу I2C приводится далее в таблице 1. Стоит отметить, что в данной работе все элементы сборок, подключенные по протоколу I2C имеют подключение к одним и тем же контактам одноплатных микроконтроллеров. Соответственно, для всех таких элементов используется единая схема подключения, приведенная в таблице 1.

Таблица 1

Коммутация контактов

Контакт элемента конечного устройства	Контакт одноплатного микроконтроллера
GND	GND
VCC	+5V
SDA	A4
SCL	A5

Для работы с датчиками требуется установка двух библиотек: Adafruit BME280 Library и Adafruit Sensor. Для работы по протоколу I2C необходимо определить I2C-адрес устройства. В данной работе они имели адрес 0x77.

В работе применялись дисплеи LCD2004 и LCD1602 с I2C модулем PCF8574 на базе HD44780. Для работы с дисплеями требуется установка библиотеки LiquidCrystal I2C. По умолчанию дисплеи поддерживают латиницу, имеется возможность настройки на использование кириллицы. Контрастность символов изменяется при помощи потенциометра. В данной работе дисплеи имели I2C адрес 0x27. Характеристики LCD1602 (LCD2004):

- напряжение питания: 5 В;
- тип дисплея: 2 строки по 16 символов (4 строки по 20 символов);
- цвет подсветки: синий/зеленый;
- цвет символов: белый/черный;
- размеры модулей: 80×35×11 мм (98×60×24 мм).

Для беспроводной передачи данных использовался радиомодуль HC-12. Основные характеристики:

- рабочая частота – нелицензируемый диапазон радиочастот 433,4–473,0 МГц;
- дальность передачи информации до 1000 м;
- мощность передатчика до 100 мВт;
- количество каналов передачи данных 100;
- четыре рабочих режима;
- встроенный микроконтроллер STM8S003F3;
- интерфейс для коммуникации с внешними устройствами UART;
- потребляемый ток от 3,6 мА до 16 мА в зависимости от режима работы, пиковое потребление тока до 100 мА (передача данных);
- потребление тока в ждущем режиме 80 мкА;
- напряжение питания от 3,2 В до 5,5 В.

Параметры модуля по умолчанию:

- UART: 9600, 8N1;
- канал 001 (433,4 МГц);
- мощность передачи 100 мВт.

В качестве вычислительного элемента в аппаратных сборках использовался одноплатный микроконтроллер Arduino Nano. Далее в таблице 2 приводятся его характеристики.

Таблица 2

Характеристики Arduino Nano

Микроконтроллер	ATmega328
Рабочее напряжение (логическая уровень)	5 В
Входное напряжение (рекомендуемое)	7–12 В
Входное напряжение (предельное)	6–20 В
Цифровые входы/выходы	14 (6 из которых могут использоваться как выходы ШИМ)

Так как выходное напряжение АКБ менее 5 В и изменяется в процессе разряда, существует необходимость в его поднятии и стабилизации на уровне 5 В. Для этих целей использовался регулируемый повышающий модуль постоянного тока МТ3608. Характеристики модуля следующие:

- входное напряжение: 2–24 В;
- выходное напряжение: 5–28 В, регулировка с помощью потенциометра;
- макс. выходной ток: 2 А;
- КПД: 93%;
- размер: 36×17×14 мм;
- диапазон рабочей температуры: от – 45 до + 85 градусов Цельсия;
- масса 6 г.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Использованная методика определения времени автономной работы каждой аппаратной сборки:

1. АКБ заряжается до 100%;
2. Замеряется напряжение на его клеммах;
3. АКБ подключается к нагрузке, включается цепь питания КУ на все время тестирования;
4. На макетной плате отдельно выводятся отдельные силовые контакты с повышающего трансформатора для контроля стабильности напряжения, от которого питается вся нагрузка;
5. Периодическое измерение напряжения на клеммах АКБ и силовых контактах с выхода трансформатора;
6. После окончания тестирования АКБ отключается от нагрузки и подключается к зарядному устройству;
7. АКБ заряжается током 300 мА до 100%. Зарядное устройство отображает переданную АКБ энергию, это значение записывается в таблицу результатов для конкретной вариации КУ. Записанное значение является потребленной КУ энергией за время тестирования;
8. Для получения среднего потребления энергии в час потребленная энергия делится на время непрерывной работы КУ;
9. Для получения полного времени автономной работы конкретной вариации КУ полная емкость АКБ делится на рассчитанное потребление энергии в час.

Сборка 1. Данная сборка состояла из одноплатного микроконтроллера Arduino Uno, трансивера HC12, дисплея формата 1602 и датчика ВМЕ280. Сборка была сконфигурирована следующим образом: непрерывное подключение к питанию всего состава, осуществление опроса датчика и вывод показаний на экран каждые 5 сек, постоянное прослушивание радиоэфира и передача показаний датчика каждые 15 мин. Подсветка экрана была включена первые 5 сек работы сборки. Напряжение на выходе трансформатора установлено на уровне 5,14 В. В таком режиме сборка проработала непрерывно без сбоев 9 часов, напряжение на контактах аккумулятора изменялось от 4,17 В до 4,05 В. За это время было потрачено 526 мА, энергопотребление составило 58,4 мА·ч. Расчетное время автономной работы от используемого аккумулятора составляет 53 час.

Сборка 2. Данная сборка состояла из одноплатного микроконтроллера Arduino Uno, дисплея формата 1602 и датчика ВМЕ280. Сборка была сконфигурирована следующим образом: непрерывное подключение к питанию всего состава, осуществление опроса датчика и вывод показаний на экран каждые 5 сек. Подсветка экрана была включена первые 5 секунд работы сборки. Напряжение на выходе трансформатора установлено на уровне 5,14 В. В таком режиме сборка проработала непрерывно без сбоев 24 часа, напряжение на контактах аккумулятора изменялось от 4,17 В до 3,88 В. За это время было потрачено 883 мА, энергопотребление составило 36,8 мА·ч. Расчетное время автономной работы от используемого аккумулятора составляет 84 часа.

Сборка 3. Данная сборка идентична по настройке и составу второй сборке. Единственное отличие в настройке в том, что напряжение на выходе трансформатора установлено на уровне 5,0 В. В таком режиме сборка проработала непрерывно без сбоев 46,3 часов, напряжение на контактах аккумулятора изменялось от 4,16 В до 3,7 В. За это время было потрачено 1552 мА, энергопотребление составило 33,5 мА·ч. Расчетное время автономной работы от используемого аккумулятора составляет 92,5 часа.

Сборка 4. Данная сборка состояла из одноплатного микроконтроллера Arduino Nano, трансивера HC12, дисплея формата 2004 и датчика ВМЕ280. Сборка была сконфигурирована следующим образом: непрерывное подключение к питанию всего состава, осуществление опроса датчика и вывод показаний на экран каждую секунду, постоянное прослушивание радиоэфира и передача показаний датчика каждые 15 минут. Подсветка экрана была включена первые 5 секунд работы сборки. Напряжение на выходе трансформатора установлено на уровне 5,0 В. В таком режиме сборка проработала непрерывно без сбоев 46,3 часов, напряжение на контактах аккумулятора изменялось от 4,16 В до 3,33 В. За это время было потрачено 2557 мА, энергопотребление составило 55,2 мА·ч. Расчетное время автономной работы от используемого аккумулятора составляет 56 часов.

Сборка 5. Данная сборка состояла из одноплатного микроконтроллера Arduino Nano, трансивера HC12 и датчика ВМЕ280. Сборка была сконфигурирована следующим образом: непрерывное подключение к питанию всего состава, осуществление опроса датчика каждую секунду, постоянное прослушивание радиоэфира без передачи показаний датчика. Напряжение на выходе трансформатора установлено на уровне 5,0 В. В таком режиме сборка проработала непрерывно без сбоев 46,3 часов, напряжение на контактах аккумулятора изменялось от 4,16 В до 3,53 В. За это время было потрачено 2073 мА, энергопотребление составило 44,8 мА·ч. Расчетное время автономной работы от используемого аккумулятора составляет 69,2 часа.

Сборка 6. Данная сборка идентична по настройке и составу пятой сборке. Единственное отличие в настройке в том, осуществляется передача показаний датчика каждые 15 минут. В таком режиме сборка проработала непрерывно без сбоев 60 часов, напряжение на контактах аккумулятора изменялось от 4,16 В до 3,2 В. За это время было потрачено 2775 мА, энергопотребление составило 46,25 мА·ч. Расчетное время автономной работы от используемого аккумулятора составляет 67 часов. На рисунке 2 приведены сравнительные графики энергопотребления и расчетного времени автономной работы для каждой из шести протестированныхборок.

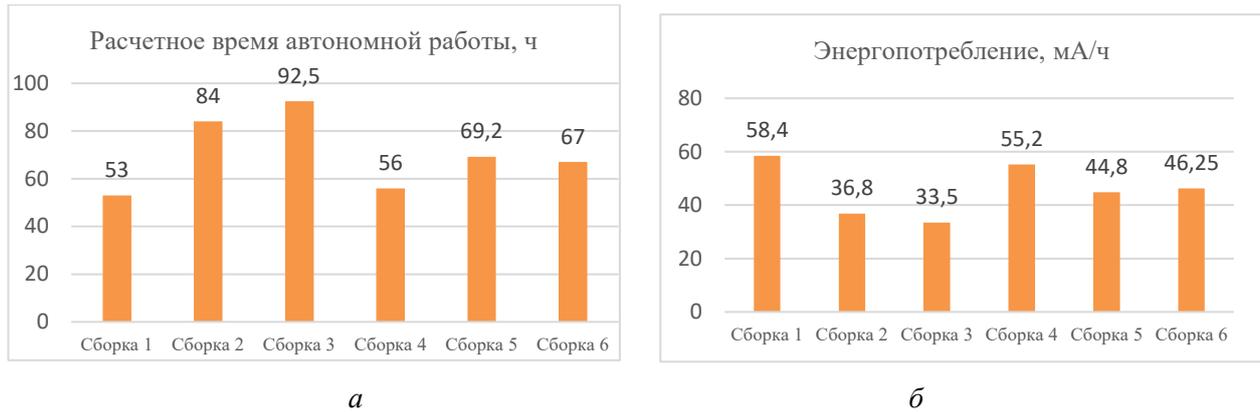


Рис. 2 Расчетное время автономной работы (а) и энергопотребление сборок (б)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье отображены результаты определения времени автономной работы аппаратных сборок на основе одноплатных микроконтроллеров Arduino, имитирующих работу конечных устройств в сети интернета вещей. В работе представлены данные об энергопотреблении конкретных вариаций конечных устройств.

Полученные значения энергопотребления и автономной работы не являются лучшими и должны считаться как ориентир в подобного рода исследованиях.

Также стоит отметить, что имеющиеся аппаратные сборки могут быть оптимизированы с точки зрения энергопотребления путем исключения впаянных индикаторных светодиодов из цепи питания. немаловажным фактом является то, что питание каждой сборки осуществлялось от одного аккумулятора формата 18650 емкостью 3,1 А·ч.

В рамках данной работы были выделены способы увеличения времени автономной работы используемых аппаратных сборок:

- использование нескольких аккумуляторов формата 18650, подключенных последовательно. Данный способ позволиткратно увеличить общую емкость батареи, что также кратное продлит время автономной работы;
- оптимизация энергопотребления путем удаления из цепи питания необязательных элементов схемы;
- организация работы сборок по расписанию, либо отключение части наиболее энергоемкой нагрузки. К примеру, включение питания радиомодуля по расписанию;
- переход на другие компоненты с идентичным или схожим функционалом и меньшим энергопотреблением;
- понижение выходного напряжения с трансформатора. Эффективность данного метода подтверждается результатами тестирования сборок 2 и 3.

При этом необходимо провести дополнительные испытания по определению минимально допустимого напряжения питания как микроконтроллера, так и остальных элементов сборки, так как ниже порогового напряжения работа будет некорректной.

В зависимости от различных требований иных проектов может быть изменен источник питания на батареи или аккумуляторы формата AA, AAA, 18650 и любых иных вариаций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Попова Е. Промышленный интернет вещей. практическое применение [Электронный ресурс]. URL: https://smartgopro.com/novosti2/IoT_tech/ (дата обращения: 01.09.2021). [[E. Popova (2021, Sep. 01). IIoT Applied Usage [Online]. Available: https://smartgopro.com/novosti2/IoT_tech/ (in Russian)]]
2. «СТРИЖ». Сравнение LPWAN-технологий: XNB от «СТРИЖ» и NB-IoT [Электронный ресурс]. URL: <https://strij.tech/publications/tehnologiya/lpwan-xnb-nbiot.html> (дата обр. 10.09.2021). [[strij.tech (2021, Sep. 10). Comparison of LPWAN technologies: XNB from Strizh and NB-IoT [Online]. Available: <https://strij.tech/publications/tehnologiya/lpwan-xnb-nbiot.html> (in Russian)]]
3. ПАО «Ростелеком». Индустриальный интернет вещей: перспективы российского рынка [Электронный ресурс]. URL: https://www.company.rt.ru/projects/IIoT/study_IDC.pdf (дата обращения 10.09.2021). [[JSC Rostelecom (2021, Sep. 10). IIoT. Russian market perspectives. [Online]. Available: https://www.company.rt.ru/projects/IIoT/study_IDC.pdf (in Russian)]]
4. ELECROW. Характеристики HC-12 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.elecrow.com/download/HC-12.pdf> (дата обращения 11.09.2021). [[ELECROW (2021, Sep. 11). HC-12 Specifications [Online]. Available: <https://www.elecrow.com/download/HC-12.pdf> (in Russian)]]
5. 3DiY. Датчик атмосферного давления, влажности и температуры BME280 [Электронный ресурс]. URL: <https://3d-diy.ru/wiki/arduino-datchiki/datchik-bme280/> (дата обращения 11.09.2021). [[3DiY (2021, Sep. 11). BME280 specifications [Online]. Available: <https://3d-diy.ru/wiki/arduino-datchiki/datchik-bme280/> (in Russian)]]
6. Micro-pi.com. Подключение LCD1602 к Arduino [Электронный ресурс]. URL: https://micro-pi.ru/подключение-lcd1602-к-arduino-i2c/#PCF8574_8212_I2C_LCD_HD44780 (дата обр. 15.09.2021). [[micro-pi.com (2021, Sep. 15). Connecting LCD1602 to Arduino via I2C (HD44780/PCF8574) [Online]. Available: https://micro-pi.ru/%D0%BF%D0%BE%D0%B4%D0%BA%D0%BB%D1%8E%D1%87%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5-lcd1602-%D0%BA-arduino-i2c/#PCF8574_8212_I2C_LCD_HD44780 (in Russian)]]
7. Arduino.ru (2021, Sep. 15). Arduino Nano [Online]. Available: <https://arduino.ru/Hardware/ArduinoBoardNano>
8. AEROSEMI (2021, Sep. 15). MT3608 Specifications [Online]. Available: <https://static.chipdip.ru/lib/977/DOC002977116.pdf>

Поступила в редакцию 8 мая 2023 г.

МЕТАДАННЫЕ / METADATA

Title: Research of the autonomous operation time of IoT end devices.

Abstract: This article is being developed as part of a project to develop a secure system for data transmission in distributed sensor networks. The article presents calculations of the battery life of different variations of end devices from a single 18650 battery. The article provides the characteristics of the equipment used, the composition of hardware assemblies and experimental data.

Key words: microcontroller, autonomy, internet of things, sensor networks, power consumption

Язык статьи / Language: русский / Russian.

Поддержка/Support: Уфимский университет науки и технологий / Ufa University of Science & Technologies.

Об авторах / About authors:

Махмутов Амир Рашитович

ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий», Россия. Асп. каф. вычислительной техники и защиты информации. Дипл. спец-т по защите инф. (Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т, 2020). Готовит дис. о защите инф. в интернете вещей. E-mail: makhmutovamir15@gmail.com

Makhmutov Amir Rashitovich

Ufa University of Science & Technologies, Russia. Postgrad. (PhD) student, Dept. of Computing Equipment and Information Security. Dipl. Information Security Specialist (Ufa State Aviation Technical University, 2020) . E-mail: makhmutovamir15@gmail.com

Вульфин Алексей Михайлович

ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий», Россия. Проф. каф. вычислительной техники и защиты информации. Дипл. инж.-прогр. (Уфимск. гос. нефт. техн. ун-т, 2008). Д-р техн. наук (Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т, 2021). Иссл. в обл. оценки рисков безопасности крит. информ. инфраструктуры. E-mail: vulfin.alexey@gmail.com
ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5857-2413>
URL: https://elibrary.ru/author_profile.asp?authorid=1051942

Vulfin Alexey Mikhailovich

Ufa University of Science & Technologies, Russia. Prof. Dept. Comp. Equipment & Information Security. Dipl. Software Engineer (Ufa State Oil Tech. Univ., 2008). Dr. Tech. Sci. (Ufa State Aviat. Tech. Univ., 2022). Critical information infrastructure security risk assessment. E-mail: vulfin.alexey@gmail.com
ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5857-2413>
URL: https://elibrary.ru/author_profile.asp?authorid=1051942

Миронов Константин Валерьевич

ФГАОУ ВО «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)», Россия. Ст. науч. сотр. центра когнитивного моделирования. Дипл. спец. по защите инф-и (Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т, 2012). PhD (Техн. ун-т Вены, 2016). Иссл. в обл. робототехники, искус. интеллекта в техн. системах. E-mail: mirovovconst@gmail.com
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4828-1345>
URL: https://elibrary.ru/author_profile.asp?authorid=939814

Mironov Konstantin Valeryevich

Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Russia. Senior researcher, Center of Cognitive Modelling. Information Security Specialist (Ufa State Aviation Tech. Univ., 2012). PhD (Vienna University of Technology, 2016). Robotics and Intelligent Control. E-mail: mirovovconst@gmail.com
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4828-1345>
URL: https://elibrary.ru/author_profile.asp?authorid=939814