

МЕТОДИКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ РЕГИСТРАЦИИ КИНЕМАТИКИ ДВИЖЕНИЯ ОПЕРАТОРА ЭКЗОСКЕЛЕТА

METHOD FOR AUTOMATED REGISTRATION OF THE KINEMATICS OF THE MOVEMENT OF THE EXOSKELETON OPERATOR

*I. Samsonov
I. Taratonov*

Summary. The article is devoted to the consideration of the methodology for automated registration and monitoring of the kinematics of the movement of the operator of the exoskeleton of the lower extremities. The requirements for the developed software and hardware complex are described, the applied hardware solutions are described. The developed software and hardware complex is described for automated monitoring and evaluation of the kinematics of the movement of the operator of the passive exoskeleton of the lower extremities. The applied solutions for the hardware implementation of an autonomous recording module, focused on obtaining the current values of the position sensors and storing them in the database, are described. The article presents the main provisions of the methodology for registering the position angle of the musculoskeletal system of the exoskeleton operator. The complex includes an accelerometer and a gyroscope as position angle sensors. During the approbation of the method, the values of the angles of the position of the waist, lower leg and thigh of the exoskeleton operator during the step were obtained and recorded. The results made possible to determine the critical values of the angle of deviation of the center of gravity of the exoskeleton operator.

Keywords: automated monitoring, exoskeleton, monitoring, motion kinematics, software and hardware registration system.

Самсонов Илья Владимирович

Аспирант, ФГАОУ ВО «Московский политехнический университет»

i.v.samsonov@bk.ru

Таратонов Илья Александрович

Старший преподаватель, ФГАОУ ВО «Московский политехнический университет»

Аннотация. Статья посвящена рассмотрению методики автоматизированной регистрации и мониторинга кинематики движения оператора экзоскелета нижних конечностей. Описаны требования к разрабатываемому программно-аппаратному комплексу, описаны применяемые аппаратные решения. Описан разрабатываемый программно-аппаратный комплекс, для автоматизированного мониторинга и оценки кинематики движения оператора пассивного экзоскелета нижних конечностей. Описаны применяемые решения аппаратной реализации автономного модуля регистрации, ориентированного на получение текущих значений датчиков положения и сохранение их в базе данных. В статье приводятся основные положения методики проведения регистрации угла положения опорно-двигательного аппарата оператора экзоскелета. В состав комплекса, в качестве датчиков углов положения включены акселерометр и гироскоп. В ходе апробации методики были получены и зарегистрированы значения углов положения поясницы, голени и бедра оператора экзоскелета при шаге. Полученные результаты позволили определить критические значения угла отклонения центра тяжести оператора экзоскелета.

Ключевые слова: автоматизированный мониторинг, экзоскелет, мониторинг, кинематика движения, программно-аппаратный комплекс регистрации.

Введение

На сегодняшний день, в промышленности активно применяются экзоскелеты нижних конечностей. Они служат для компенсации нагрузки, повышения производительности труда, работы в положениях, создающих высокую нагрузку на опорно-двигательный аппарат. Для повышения безопасности эксплуатации экзоскелетов необходимо контролировать положение центра тяжести, поскольку его отклонение может привести к падению оператора. Для предупреждения аварийных ситуаций возможно производить постоянную

автономную регистрацию углов положения опорно-двигательного аппарата, сравнивая значения положения центра масс в сочетании с ускорением, что позволит предугадывать приближение к критическим значениям при стрессе, утомлении, нарушении функционального состояния оператора или повышении загрузки внимания при использовании.

Осуществление мониторинга углов положения опорно-двигательного аппарата одновременно с психофизиологическими параметрами может позволить выявить признаки наступления неблагоприятного функциональ-

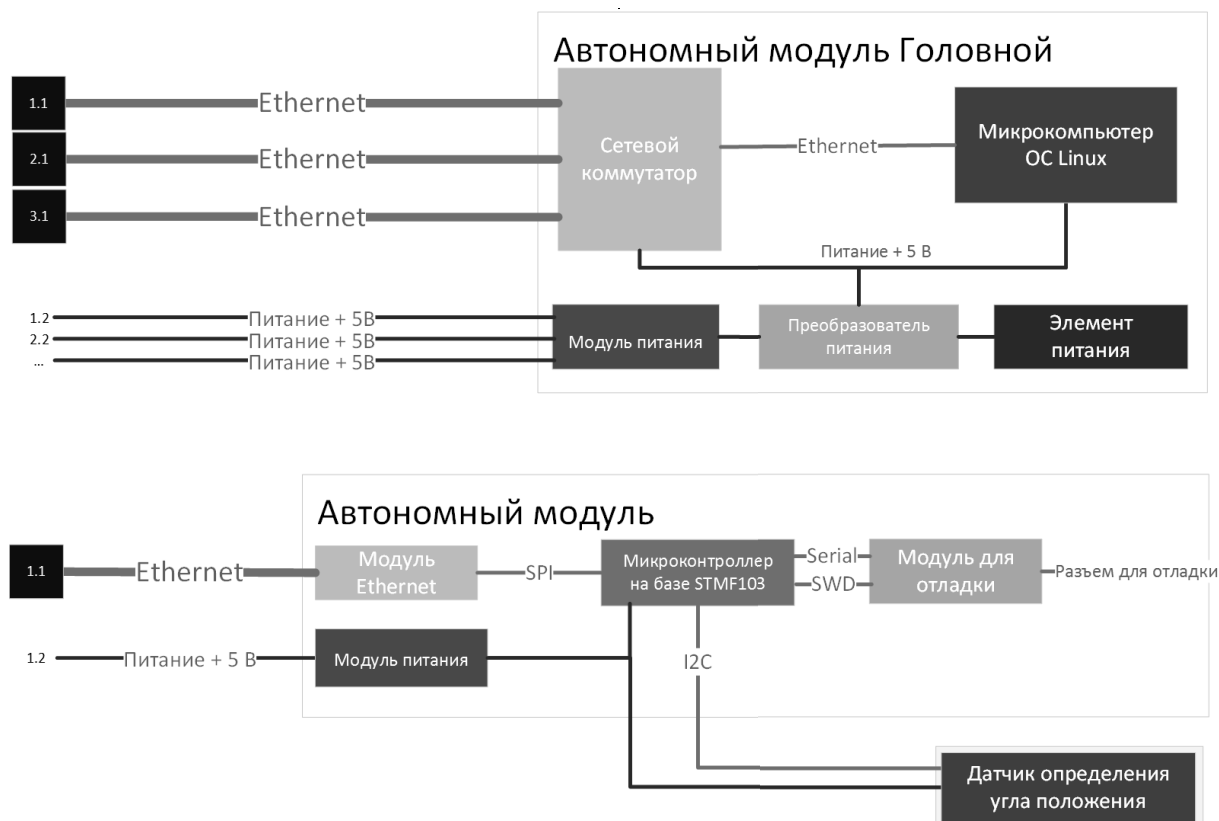


Рис. 1. Архитектура системы регистрации

ного состояния оператора, например, приближение к критическим значениям положения общего центра масс, что может привести к падению.

Материалы и методы

Автономный модуль регистрации показателей датчиков выполнен с использованием отладочной платы на базе микроконтроллера STM32F103. Она позволяет получать значения при наличии у подключаемых датчиков следующих интерфейсов: CAN, I2C, SPI, UART, USB. Есть возможность оцифровывать получаемые значения с помощью АЦП 12 бит. На рис. 1, представлена архитектура системы регистрации.

В качестве элемента питания используется Li-Ion аккумулятор, для повышения напряжения используется модуль питания на базе bq2407x [4]. Данное решение позволяет подключать модули от напряжения 5 В.

Для регистрации углового положения и ускорений использовались следующие датчики: модуль MPU6050 и HMC5883L [2,3]. Подключение датчиков к микроконтроллеру осуществляется по интерфейсу I2C, их питание осуществляется через микроконтроллер. Они являются функциональными измерительными системами, вклю-

чающими в себя гироскоп, магнитометр, акселерометр и датчик температуры.

В используемых датчиках частота записи новых данных внутренним аналогово-цифровым преобразователем зависит от выбранного пользователем диапазона измерений, что ограничивается исключительно чувствительностью сенсора. Как следствие, нужно правильно подбирать необходимую частоту для получения искомого результата. Установка многоосевого компаса используется для фильтрации и обработки данных с применением альфа-бета фильтра. Регистрируемые микроконтроллером параметры с датчика формируют пакет, содержащий тайм-код, получаемый с аппаратных часов реального времени микроконтроллера, который используется для синхронизации регистрируемых значений, а также значение регистрируемого в этот момент времени параметра датчика. Для представления данных использован 16-битный целый знаковый тип (int16). Угол положения регистрируется в диапазоне от -90° до 90° , при необходимой точности измерения в 0,1 долю, получаемое значение угла передается в виде $M \cdot 10$, где M — значение угла. Угол наклона фиксируется относительно оси 0X. Показания температуры предполагается регистрировать в диапазоне от 0°C до 50°C , точность датчика составляет $\pm 1^\circ\text{C}$.

Таблица 1. Формат пакета регистрируемых значений

	ID (1 байт)	TIMCODE (2 байта)	DATA1 (2 байта)	DATA2 (2 байта)	DATA3 (2 байта)
MPU6050			0X	0Y	0Z
			TEMPERATURE	-	-
HMC5883L			0X	0Y	0Z

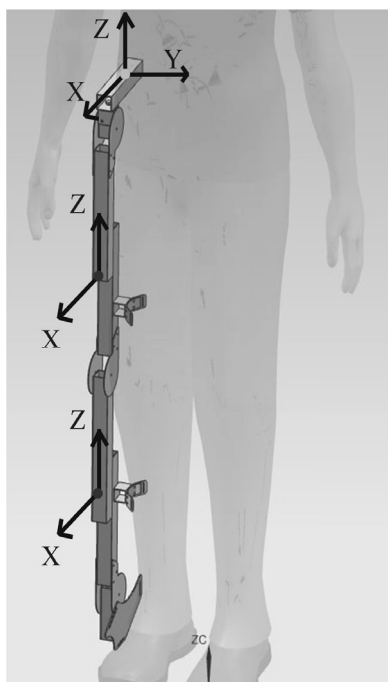


Рис. 2. Схема расположения автономных модулей регистрации кинематики движения

Формат пакета регистрируемых данных имеет следующий вид (Таблица 1): ID — уникальный номер датчика, TIMCODE — показания аппаратных часов реального времени.

Модуль Ethernet выполнен на базе W5500 [5]. В качестве транспортного протокола используется UDP; для обеспечения более быстрой передачи большого объема информации на головной модуль — микрокомпьютер на базе ОС Linux с основным пользовательским приложением, осуществляющее управление остальными модулями, для регистрации и обработку получаемых значений. Модульная реализация программного обеспечения и наличие открытого протокола обмена данными позволяет получать значения и из других систем, регистрирующих положение опорно-двигательного аппарата [6,7,8].

Сформированный пакет, представлен в табл. 3, поступает в модуль регистрации, пользовательского приложения и заносится в базу данных.

Автономные модули, с интегрированным трехосевым гироскопом и акселерометром, фиксируются, на каждый подвижный элемент экзоскелета: бедро, голень, поясница, расположение приведено на рис. 2. Ось Z должна быть направлена перпендикулярно поверхности земли, а вектора X и Y — параллельно земли.

Перед началом измерения, оператору необходимо произвести точную регулировку элементов крепления экзоскелета с учетом индивидуальной антропометрии. Основные элементы экзоскелета должны в точности повторять углы наклона оператора. Фиксация системы крепления не должна иметь люфтов. Оси изгиба коленного сустава оператора должны находиться на одной прямой с осью изгиба элемента системы экзоскелета. Для более точного позиционирования необходимо перед началом эксплуатации экзоскелета, задать нулевое положение углов: надев экзоскелет, оператору необходимо занять позу стоя, чтобы ноги были выпрямлены и находились на одной линии и нажать кнопку “ЗАДАТЬ НОЛЬ”, таким образом текущие значения, получаемые с гироскопа, будут взяты за нулевую точку отсчета.

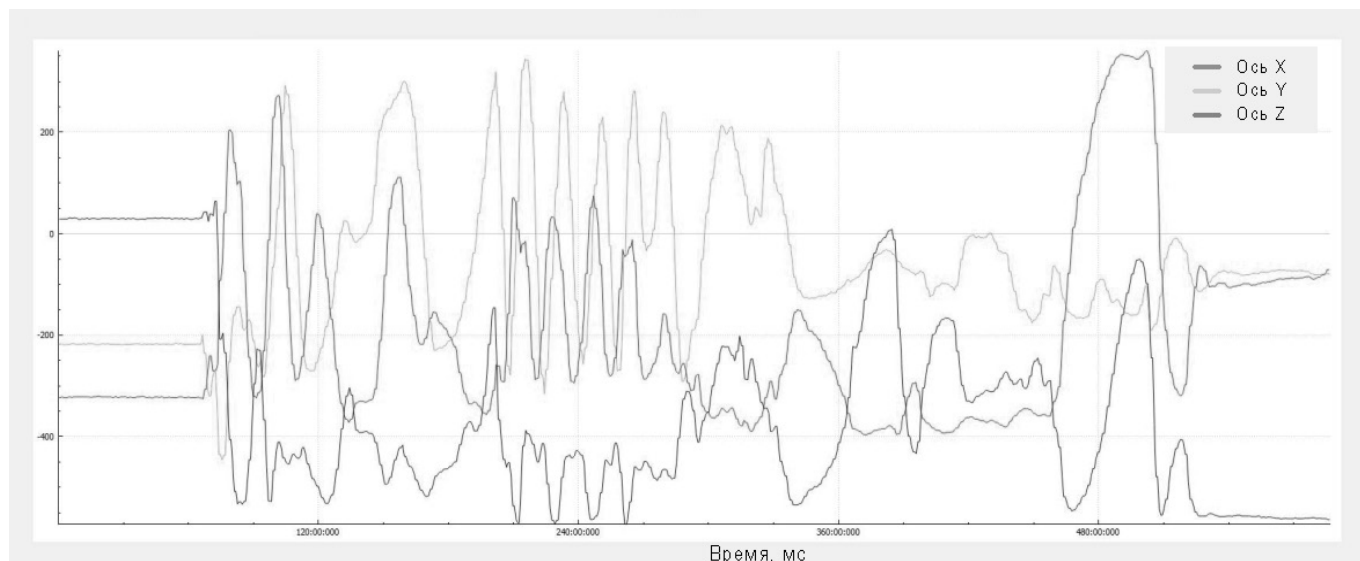


Рис. 3. Отображение регистрируемых значений датчиков, определяющих положение, после работы модуля фильтрации

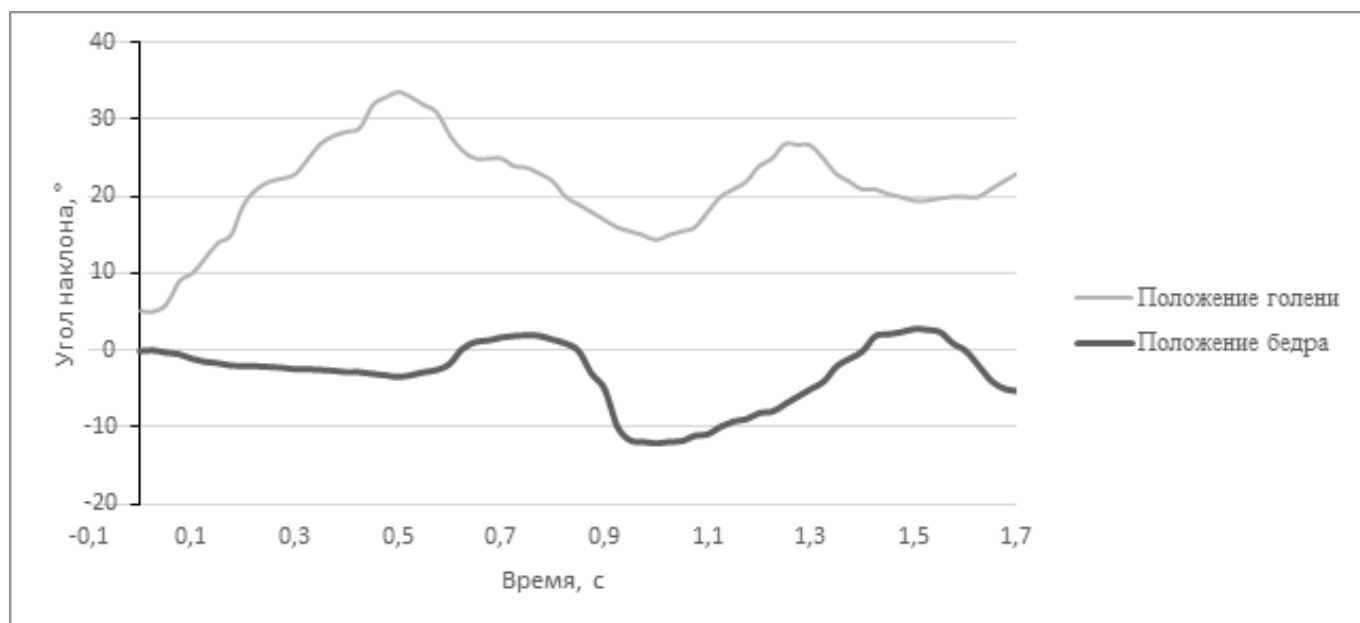


Рис. 4. Угол положения голени и бедра

При начале движения оператор нажимает аппаратную кнопку, расположенную на автономном модуле “СТАРТ”. Программное обеспечение формирует команду старта о начале измерений.

Данные с микроконтроллера поступают на основной вычислитель в программный модуль обработки поступающих сигналов для их фильтрации с последующим отображением текущих значений в виде графиков, отображаемые значения, в режиме тестирования,

показаны на рис. 3, и их регистрацией в файл в формате.csv.

В состоянии покоя измеряемые гироскопом значения имеют шум в 40 отсчетов из допустимых 65536, таким образом, уровень шума составляет $\pm 0,06\%$, что оказывает незначительное воздействие на полезный сигнал.

Из полученных данных при ходьбе по прямой, значения положения бедра, показаны на рис. 4, находятся

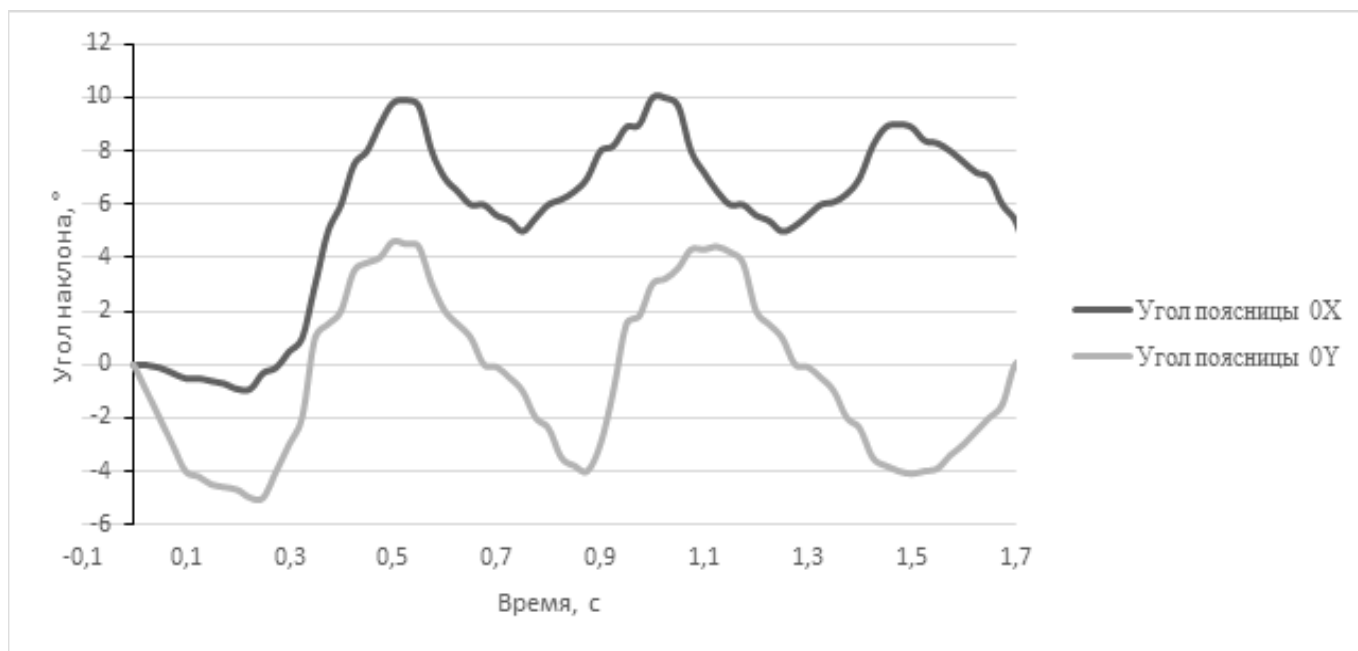


Рис. 5. Угол положения поясницы

в интервале от $-12,2^\circ$ до $2,9^\circ$, значения положения голени, показаны на рис. 4, находятся в интервале от 5° до $33,7^\circ$, значения положения поясницы, показаны на рис. 5 по оси OX находятся в интервале от $-0,9^\circ$ до 10° , преимущественно значения находятся в интервале от 5° до 10° , поскольку при движении прямо оператору необходимо значительно сместить центр масс вперед для загрузки системы пневмоупоров экзоскелета, когда значения положения поясницы по оси OY находятся в интервале от -5° до $4,6^\circ$.

Опытным путем было установлено, что при превышении 10° по оси OX и 15° по оси OY, центр масс оператора смещается на критические значение, что может привести к потере равновесия.

Значения температуры на протяжении всего эксперимента составляли 21°C , что позволяет свидетельствовать о комфортных условиях температуры микроклимата помещения при проведении эксперимента.

Представленная система регистрации параметров является функциональной измерительной системой, включающей в себя гироскоп, акселерометр, датчик температуры, программное обеспечение, благодаря которым возможно производить мониторинг и запись углов положения в пространстве: определить угловую скорость и линейные ускорения. Вычисление угла путем интегрирования угловой скорости является неточным из-за накопления ошибки (низкочастотный шум). Показания акселерометра поступают с высокочастотной по-

мехой. Для получения более точных показателей необходимо получать значения с акселерометра и гироскопа с последующей их обработкой фильтром Калмана или альфа-бета фильтром.

Заключение

Разработанный программно-аппаратный комплекс позволяет регистрировать значения угла, получаемые от акселерометров и гироскопов, для определения положения нижних конечностей оператора экзоскелета.

Описана архитектура применяемых аппаратных решений разработанного экспериментального образца программно-аппаратного комплекса.

Методика

апробирована на примере получения значений углов положения поясницы, голени и бедра оператора экзоскелета при шаге. Было выявлено: при превышении 10° по оси OX и 15° по оси OY, центр масс оператора смещается на критические значение, что может привести к потере равновесия.

Теоретические и экспериментальные исследования разработанного экспериментального образца программно-аппаратного комплекса свидетельствуют о возможности его применения в качестве инструмента объективного контроля количественных характеристик движения опорно-двигательного аппарата.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шаль А.В. Технологии больших данных в статистике // Учет и статистика. 2017. № 2 (46) [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tehnologii-bolshih-dannyh-v-statistike> (дата обращения: 19.01.2022).
2. MPU-6050 Datasheet (PDF) — List of Unclassified [Электронный ресурс]. URL: <https://invensense.tdk.com/wp-content/uploads/2015/02/MPU-6000-Datasheet1.pdf> (дата обращения: 22.03.2022).
3. HMC5883L Datasheet (PDF) — 3-Axis Digital Compass IC [Электронный ресурс]. URL: https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/HMC5883L_3-Axis_Digital_Compass_IC.pdf (дата обращения: 01.02.2022).
4. bq2407x Single-Chip Li-Ion Charge and System Power-Path Management IC [Электронный ресурс]. URL: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/bq24070.pdf?ts=1651838257095&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FBQ24070 (дата обращения: 01.02.2022).
5. W5500 Datasheet [Электронный ресурс]. URL: https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Dev/Arduino/Shields/W5500_datasheet_v1.0.2_1.pdf (дата обращения: 23.04.2022).
6. Лобанов А.А., Провоторов Н.В., Самсонов И.В. Платформенный подход как средство объединения исследовательских систем // Техника и технологии, политика и экономика: проблемы и перспективы: материалы V Международной научно-практической конференции, Коломна, 30 апреля 2018 года. — Коломна: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский политехнический университет», 2018. — С. 134–142.
7. Taratov, I.A. Development of engineering-ergonomic requirements for design of multi-phase controls for helicopters // 38th European Rotorcraft Forum 2012, ERF 2012, Amsterdam, 04–07 сентября 2012 года. — Amsterdam, 2012. — P. 671–681.
8. Провоторов, Н.В., Таратов И.А. Алгоритмы управления экзоскелетной системой нижних конечностей человека // Материалы XII международной научной конференции «Системный анализ в медицине» (САМ 2018), Благовещенск, 18–19 октября 2018 года / Под общ. ред. В.П. Колосова. — Благовещенск: Дальневосточный научный центр физиологии и патологии дыхания, 2018. — С. 68–72.

© Самсонов Илья Владимирович (i.v.samsonov@bk.ru), Таратов Илья Александрович.

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»



Московский политехнический университет