

# МОДЕЛЬ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ МЕЖДУ СРЕДОЙ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И ЭКСОСКЕЛЕТНОЙ СИСТЕМОЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ОТКРЫТОГО ПРОТОКОЛА

## MODEL OF DATA TRANSMISSION BETWEEN THE SIMULATION ENVIRONMENT AND EXOSKELETON SYSTEM USING AN OPEN PROTOCOL

*N. Provotorov  
I. Taratonov*

*Summary.* The paper presents a solution for ensuring the interaction of software and hardware elements of an exoskeleton system with a simulation environment using an open data transmission protocol. The paper contains general model of interaction between systems and structural representation of the developed software module. The rationale and a brief description of the selected data transmission protocol are given, the results of simulation the software module real model are presented.

*Keywords:* data transmission model, protocol, intersystem interaction, exoskeleton system, simulation modeling.

**Провоторов Николай Васильевич**

Аспирант, Московский Политехнический  
Университет

provotorovworkmail@gmail.com

**Таратонов Илья Александрович**

Генеральный директор, ООО «Полдень. 21-й век»

ilya.taratonov@1221.su

*Аннотация.* В статье представлено решение по обеспечению взаимодействия программно-аппаратных элементов экзоскелетной системы со средой имитационного моделирования с применением открытого протокола передачи данных. В работе освещается общая модель взаимодействия между системами и структурное представление разработанного программного модуля. Приведено обоснование и краткое описание выбранного протокола передачи данных, представлены результаты симуляции реальной модели программного модуля.

*Ключевые слова:* модель передачи данных, протокол, межсистемное взаимодействие, экзоскелетная система, имитационное моделирование.

**В** работе представлена модель передачи данных (далее МПД) между средой имитационного моделирования (далее СИМ) и экзоскелетной системой (далее ЭС). Цель проработки модели заключается в построении механизмов двунаправленного взаимодействия между СИМ и программно-аппаратными элементами ЭС с применением открытого протокола передачи данных.

Актуальность проработки МПД обусловлена необходимостью проведения имитационного моделирования совместно с программно-аппаратной частью ЭС для построения и оценки управляющих алгоритмов.

Существующие модели передачи данных ЭС ориентированы на применение в условиях физического моделирования робототехнических систем. В таких системах основными критериями качества обмена данными является помехозащищенность канала, гарантия контроля целостности и доставки сообщений между узлами. Применяемые модели не ориентированы на высокую скорость передачи данных, имеют слабую поддержку коммуникационных интерфейсов для внешних систем

и используют узкоспециализированные протоколы передачи данных.

В условиях имитационного моделирования основными критериями качества передачи данных являются:

- ♦ скорость обмена по каналу передачи;
- ♦ поддержка большого спектра современных коммуникационных технологий;
- ♦ гибкость системы транспортного уровня для поддержки большого набора существующих протоколов передачи данных.

Модель передачи данных рассматривается с точки зрения открытой системы, придерживающейся стандартов сетевой модели DOD (TCP/IP) [7]. Она включает в себя стек протоколов, обеспечивающих функции межсетевое взаимодействие, используя для обработки полезной нагрузки сетевых пакетов внешний протокол.

Разработка модели передачи данных состоит из следующих основных этапов:

1. разработка концептуальной схемы передачи данных между СИМ и ЭС;

Таблица 1. Сравнительный анализ выбранных протоколов прикладного уровня.

Название протокола	Топология	Зависимость от сетевой модели	Масштабируемость системы (кол-во устройств)	Размер пакета полезной нагрузки (байт)	Производительность передачи	Стоимость реализации
MQTT	звезда	да	ограничено аппаратной реализацией (брокера)	0–255	зависит от канала передачи	не требует дополнительного оборудования
ModbusTCP	звезда	нет (модификации Modbus rtu и ASCII)	ограничено сегментом сети TCP/IP	0–252	низкая	не требует дополнительного оборудования
CIP Ethernet/IP	кольцо, звезда, дерево или шина	да	ограничено сегментом сети TCP/IP	12–1472	высокая	не требует дополнительного оборудования
MAVLink	не привязан к топологии	нет	до 256 подсистем, включающих 256 компонентов.	0–255	зависит от канала передачи	не требует дополнительного оборудования
EtherCAT	кольцо	да	(практически неограниченно) 65535	12–1472	высокая	необходимы специальные микросхемы для ведомого устройства

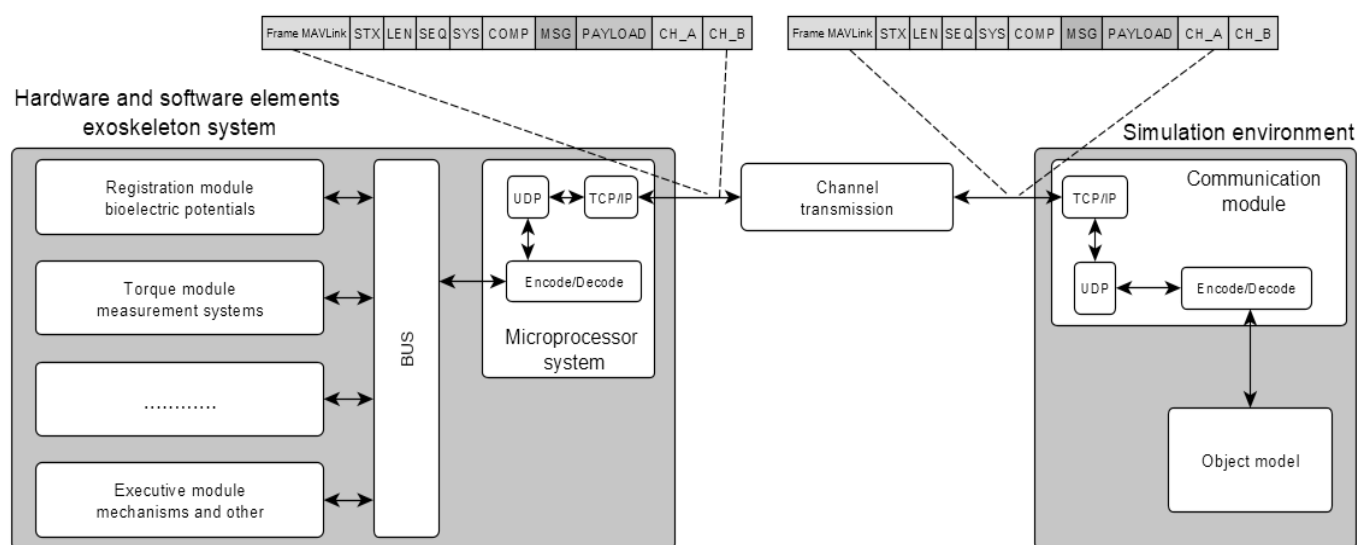


Рис. 1. Общая модель передачи данных

2. анализ открытых протоколов передачи данных;
3. выбор протокола на основании проведенного сравнительного анализа;
4. разработка модели узла, реализующего двунаправленный обмен между СИМ и ЭС;
5. построение узла двунаправленной передачи средствами графического языка программирования в СИМ;

6. апробация построенной модели, используя СИМ с поддержкой графического языка программирования.

Основной принцип взаимодействия между СИМ и программно-аппаратными элементами ЭС представлен в виде общей модели передачи данных (см. рис. 1).

Таблица 2. Качественные оценки атрибутов рассматриваемых протоколов.

Вес атрибута (h)	0,1	0,3	0,1	0,1	0,2	0,2
Название протокола	Топология	Зависимость от сетевой модели	Масштабируемость системы (кол-во устройств)	Размер пакета полезной нагрузки (байт)	Производительность передачи	Стоимость реализации
MQTT	2	0	3	2	4	4
ModbusTCP	2	3	4	2	0	4
CIP Ethernet/IP	3	0	4	4	3	4
MAVLink	4	4	2	2	4	4
EtherCAT	0	0	3	4	3	0

Такая модель отражает основные узлы, участвующие в передаче данных, и их структурную организацию.

В качестве основного рассматриваемого узла ЭС выступает блок микропроцессорной системы (далее МПС). Этот блок является главным вычислительным узлом, который выполняет функции: сбора данных с шины от периферийных узлов системы, обработки данных, прием/передачи информации по каналу связи.

Узлом передачи данных СИМ является коммуникационный модуль. Он представляет собой программный блок, выполняющий функции транспортировки данных между математической моделью объекта и каналом передачи.

Обмен данными между двумя рассматриваемыми системами осуществляется при помощи канала передачи данных, организация которого описывается стандартами протоколов выбранной сетевой модели.

Построение общей модели передачи данных позволило выделить основные узлы систем, участвующих в обмене, и сформировать требования к протоколу верхнего уровня сетевой модели. В перечень требований входят: возможность работы поверх стека TCP/IP, открытая лицензия, независимость от канального и физического уровней сетевой модели.

Для выбора протокола передачи данных необходимо провести анализ наиболее распространенных существующих решений. Отталкиваясь от требований, предъявляемых к стандарту передачи данных, можно выделить следующую группу: MQTT, ModbusTCP, MAVLink, CIP Ethernet/IP, EtherCAT. Наиболее значимые для данной задачи параметры протоколов представлены в таблице 1. Информация для сравнительного анализа получена из свободных источников [3, 4, 6,8]:

Параметры рассматриваемых протоколов, приведенных в таблице 1, имеют такие атрибуты, как вес (h) и качественная оценка. В соответствии с данными атрибутами была составлена таблица 2, характеризующая

в метрической шкале пригодность атрибута протокола для решения поставленной задачи.

Качественная оценка выражается в метрической шкале от 0 до 4, которая отражает полезность значения атрибута применительно к рассматриваемой модели. Значения применяемой шкалы имеют следующие эквиваленты в ранговом представлении:

0 — крайне неподходящее, оказывает негативное влияние на параметры системы, затрудняет дальнейшее развитие модели;

1 — не рекомендуется к применению. Параметр с такой оценкой создает потенциальные сложности для дальнейшего развития системы;

2 — применимо в случае отсутствия альтернативных решений. Параметр с данной оценкой накладывает незначительные ограничения на развитие системы;

3 — применим для решения поставленной задачи. Характеристики, отмеченные данным значением, положительно влияют на параметры эффективности и гибкости модели передачи данных;

4 — рекомендуемый к применению. Параметр, отмеченный данной оценкой, лучшим образом подходит для применения в разрабатываемой модели передачи данных. Такой параметр является перспективным с точки зрения дальнейшего развития системы.

Вес показывает насколько критично значение параметра для данной системы.

Применимость протокола для решения поставленной задачи выносится на основании рассчитанного по формуле 1 коэффициента пригодности (k).

$$k = \sum(h_i * b_i), \tag{1}$$

где  $h_i$  — вес качественной оценки параметра протокола;

$b_i$  — значение коэффициента качественной оценки.

Коэффициент имеет безразмерную величину и используется в качестве сравнительной характеристики

Таблица 3. Значения коэффициента пригодности для рассматриваемых протоколов.

Название протокола	Оценка пригодности для решения задачи
MQTT	2,3
ModbusTCP	2,5
CIP Ethernet/IP	2,5
MAVLink	3,6
EtherCAT	1,3

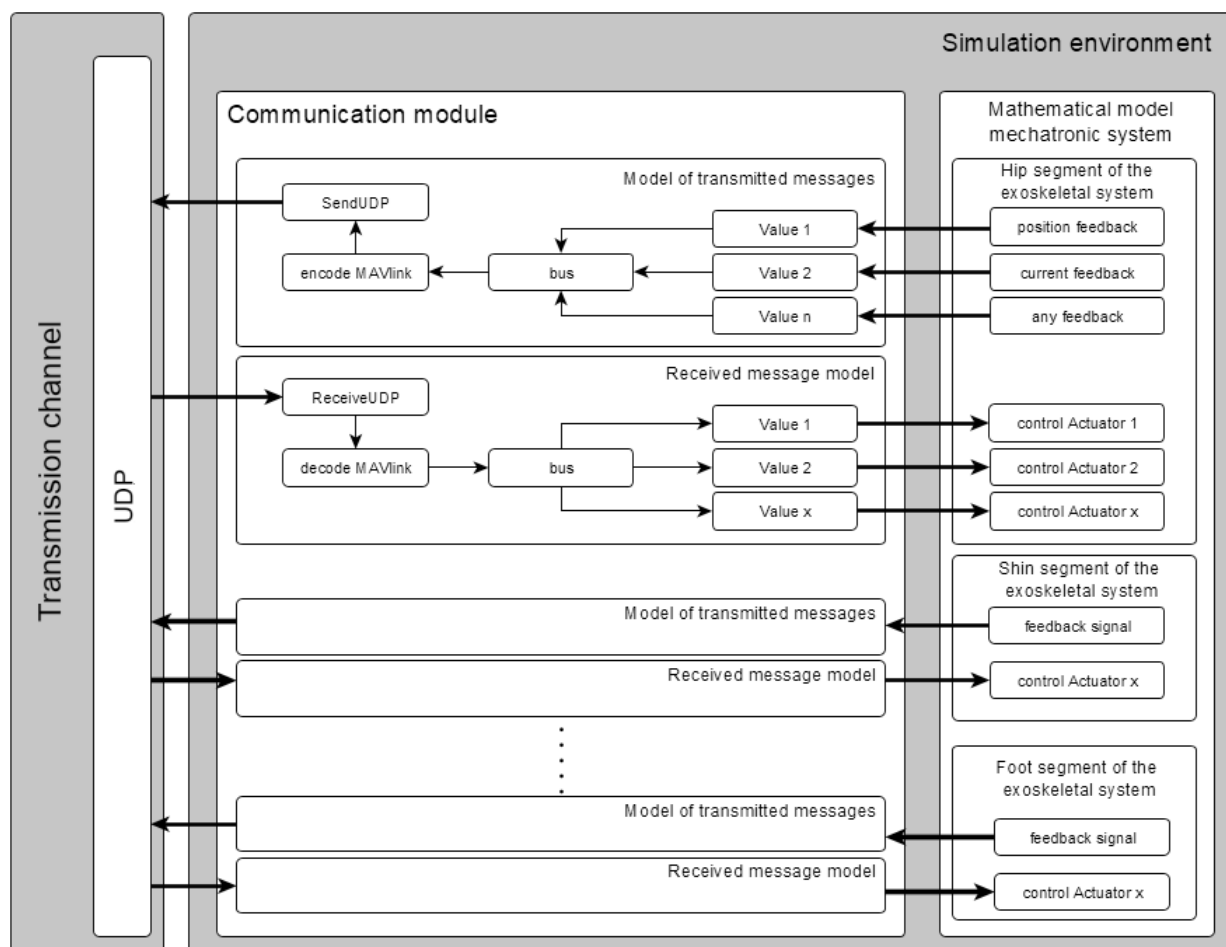


Рис. 2. Модель коммуникационного модуля

для обоснования выбора протокола. Значения коэффициента для каждого из протоколов представлены в таблице 3.

По результатам проведенного анализа наиболее предпочтительным является MAVLink. Протокол не набрал максимально возможную оценку из-за сравнительно небольшой длины передаваемых данных и ограничений по масштабируемости системы. Указанные атрибуты имеют небольшой вес, что означает незначительное отрицательное влияние на качество транспортировки данных.

Реализация модели передачи данных, представленной на рисунке 1, заключается: в создании программного модуля, обозначенного как «коммуникационный модуль», и обеспечении программным слоем ЭС, реализующим работу с MAVLink поверх протоколов выбранной сетевой модели.

Коммуникационный модуль (см. рис. 2), входящий в состав системы СИМ обеспечивает:

1. кодирование/декодирование данных согласно выбранному протоколу;

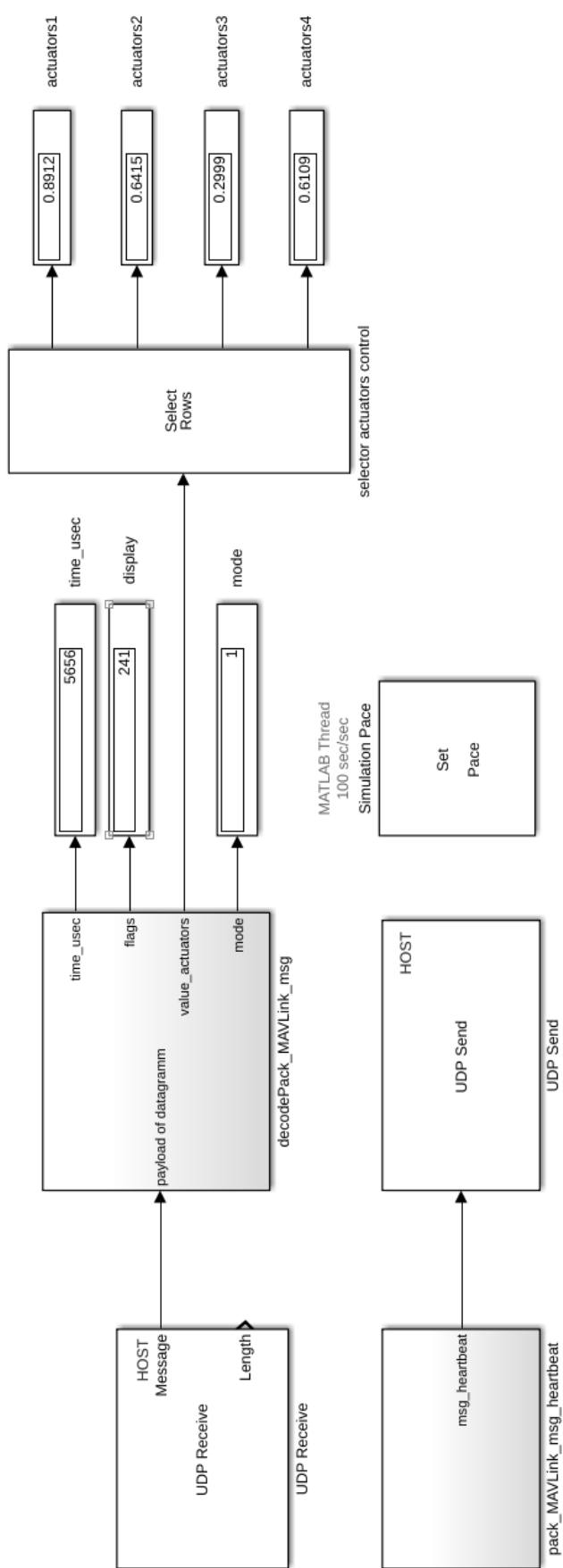


Рис. 3. Результат запуска симуляции модели совместно с программно-аппаратными элементами ЭС

2. обмен данными между математической моделью объекта и транспортным уровнем.

Для построения модели коммуникационного модуля необходимо конкретизировать транспортный уровень выбранной сетевой модели. Принято решение применить протокол управления передачей UDP, поскольку при проведении имитационного моделирования и работы с программно-аппаратными элементами ЭС необходимо поддерживать активным соединение между устройствами при кратковременных сбоях в канале связи.

Основными блоками коммуникационного модуля являются модели принимаемых и передаваемых сообщений. Эти модели предназначены для взаимодействия с транспортным уровнем передачи данных и выполняют функции упаковки/распаковки сообщений протокола. На рисунке 2 изображено общее представление моделей блоков для передачи и приема сообщений. Каждая модель передаваемого сообщения содержит в себе:

1. блок для передачи данных на удаленное устройство — «SendUDP»;
2. блок s-function, в который помещается скомпилированный код С для упаковки данных в сообщение MAVLink — «encodeMAVLink»;
3. шину, осуществляющую преобразование входных значений в заданную последовательность массива данных — «bus».

Входы шины соединяются с соответствующими выходными линиями математической модели. Выход шины соединяется со входом блока s-function для упаковки массива данных в сообщение.

Модель принимаемого сообщения содержит в себе:

1. блок для приема данных от удаленного устройства — «UDPReceive»;
2. блок s-function, в который помещается скомпилированный код С для декодирования входящего сообщения MAVLink — «decodeMAVLink»;
3. шину, осуществляющую преобразование массива данных в отдельные поля согласно ранее заданным типам — «bus».

Выходы шины соединяются с соответствующими входами модели объекта исследования. Вход шины соединяется с выходом блока s-function для преобразования массива данных принятого сообщения в отдельные независимые переменные.

Создание блоков s-function, осуществляющих работу по кодированию/декодированию сообщений протокола, выполняется с использованием набора библиотек, в число которых входят: mavlink/c\_library\_v2 и aditya00j/

simulink\_mavlink, предназначенная для генерации С кода и его последующей компиляции для использования в графическом языке программирования.

Для каждого принимаемого или передаваемого сообщения всегда создается один из блоков, описанных соответствующей моделью сообщений.

Структура представленного модуля имеет хорошую масштабируемость, поскольку модели принимаемых и передаваемых сообщений не зависят от типов передаваемых сообщений. Эти модели применимы для стандартных и пользовательских диалектов протокола. Диалект протокола представляет собой набор сообщений, доступных системе для передачи данных. Более подробная информация о диалектах MAVLink и о работе с ними представлена на страницах официальных источников [11, 12].

Представленная на рисунке 2 модель коммуникационного модуля была реализована средствами среды графического языка программирования. Ее внешний вид представлен на рисунке 3.

Модель коммуникационного модуля, построенного в СИМ, содержит в себе передаваемое и принимаемое сообщение.

Передаваемое сообщение представлено на рисунке 3 двумя блоками: «pack\_MAVLink\_msg\_heartbeat» и «UDP Send». Первый блок предназначен для упаковки данных в кадр протокола и передачи его в блок «Send UDP». Второй блок является реализацией транспортного уровня сетевой модели и служит для упаковки данных в пакеты и их отправку.

Принимаемое сообщение представлено тремя блоками: «UDP Receive», «decodePack\_MAVLink\_msg» и «select actuators control». Блок «UDP Receive» осуществляет прием сетевых пакетов и передачу их в «decodePack\_MAVLink\_msg» для разбора полезной нагрузки. Блок «decodePack\_MAVLink\_msg» предназначен для декодирования полученных данных согласно протоколу MAVLink и отправки их на вход математической модели. Применение блока «select actuators control» обусловлено спецификой принимаемых данных. Он осуществляет преобразования строки со значениями актуаторов в независимые каналы, которые подключаются к соответствующим входам математической модели.

В результате проработки МПД представлено одно из решений по обеспечению двунаправленного взаимодействия между СИМ и ЭС. Для этого были решены следующие задачи:

1. построена концептуальная модель передачи данных для описания общих этапов преобразования информации в процессе взаимодействия систем;
2. произведен анализ свободнолицензируемых протоколов, удовлетворяющих требованиям разрабатываемой модели, на основании которого в качестве протокола передачи данных выбран MAVLink;
3. создана модель коммуникационного блока СИМ, предназначенной для описания внутренней структуры и механизмов передачи данных между программно-аппаратными элементами ЭС и ее математической моделью;
4. синтезирована модель коммуникационного блока средствами графического языка программирования в СИМ;
5. произведена апробация представленной МПД между СИМ и ЭС, которая показала ее пригодность для взаимодействия программно-аппаратных элементов ЭС и математической моделью объекта, представленного средствами графического языка программирования в СИМ. Также апробация показала, что для разработанной МПД в качестве СИМ может использоваться пакет MATLAB Simulink.

Взаимодействие СИМ и ЭС позволяет исследовать предиктивную модель управления экзоскелетной системой [6] при помощи имитационного моделирования [1] с участием программно-аппаратных элементов ЭС. Такой способ моделирования позволяет:

1. дать оценку динамических параметров объекта исследования при непосредственном взаимодействии с физической моделью блока управления ЭС;
2. выполнить сравнительный анализ моделей управления ЭС;
3. упростить разработку и отладку программных алгоритмов системы управления путем итерационного тестирования модели управления на математической модели ЭС;
4. валидировать предиктивную модель на предмет коррелирования траекторий, полученных эмпирическим путем, и траекторий, полученных в результате имитационного моделирования [2, 9], минуя дорогостоящий процесс физического моделирования ЭС;
5. стандартизировать механизмы взаимодействия между модулями ЭС при помощи существующего открытого протокола и осуществить разработку унифицированного протокола передачи с учетом специфики области ЭС.

Таблица соответствий условных сокращений в статье на русском языке и обозначений на рисунках:

Условные обозначения используемые в тексте работы	Обозначения на рисунках
СИМ	Simulation environment
ЭС	exoskeletal system
МПС	Microprocessor system

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Власов М.В. / Имитационное моделирование: учебно-методическое пособие для подготовки к лекционным и практическим занятиям; Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова. Новочеркасск: ЮРГПУ(НПИ). — 2016. — 60 с.
2. Микони С.В., Соколов Б.В., Юсупов Р.М. Квалиметрия моделей и полимодельных комплексов, монография // М.: РАН, 2018. — 314 с.
3. Обзор современных протоколов в системах промавтоматики. [Электронный ресурс] — URL: [https://habr.com/ru/post/473992/]
4. Описание протокола Modbus TCP. [Электронный ресурс] — URL: [https://ipc2u.ru/articles/prostye-resheniya/modbus-tcp/]
5. Провоторов Н.В, Таратонов И.А. Алгоритмы управления экзоскелетной системой нижних конечностей человека // Материалы XII международной научной конференции «Системный анализ в медицине» (САМ 2018) ф/ под общ. ред. В.П. Колосова. Благовещенск, 2018. С. 68–72.
6. Протокол MQTT описание и применение в IoT. [Электронный ресурс] — URL: [https://ipc2u.ru/articles/prostye-resheniya/chto-takoe-mqtt/]
7. Сетевая модель модель TCP/IP (DOD). [Электронный ресурс] — URL: [https://www.oslogic.ru/knowledge/245/modeli-osi-i-tcp-ip/]
8. Технология EtherCAT как инструмент реализации передовой архитектуры управления. [Электронный ресурс] — URL: [https://isup.ru/articles/3/665/]
9. Яцкив И.В. Проблема валидации имитационной модели и ее возможные решения. [Электронный ресурс] — URL: http://gps.ru/immod'03/043.html.
10. MAVLink Developer guide. [Электронный ресурс] — URL: https://mavlink.io/en/guide/ (Дата обращения: 03.01.2019 г.).
11. MAVLink Message Signing. [Электронный ресурс] — URL: https://mavlink.io/en/guide/message\_signing.html (Дата обращения: 02.01.2019 г.).

© Провоторов Николай Васильевич (provotorovworkmail@gmail.com), Таратонов Илья Александрович (Ilya.taratonov@1221.su).

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»