

Научная статья

УДК 004.725.7

DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-3-75-81



Разработка модельной сети и анализ сетевого трафика управления роботом-манипулятором

✉ **Любовь Сергеевна Горбачева**, gorbacheva.ls@sut.ru

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича,
Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

Аннотация: В статье рассматривается проблематика дистанционного управления роботами-манипуляторами по сети связи. Представлена структура разработанной модельной сети для перехвата и анализа сетевого трафика, генерируемого при дистанционном управлении роботами-манипуляторами, а также описаны ее основные компоненты. Представлены основные характеристики перехваченного сетевого трафика для четырех различных Приложений использования робота-манипулятора в базовом сценарии взаимодействия, а также с учетом использования предложенного автором улучшенного сетевого алгоритма управления роботами-манипуляторами или их кластерами. Проведена оценка коэффициента самоподобия полученного сетевого трафика.

Ключевые слова: промышленный Интернет Вещей, модельная сеть, робот-манипулятор, перехват и анализ сетевого трафика, характеристики сетевого трафика, коэффициент самоподобия

Источник финансирования: Научное исследование в ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича выполнено в рамках мегагранта Минобрнауки по соглашению № 075-15-2022-1137.

Ссылка для цитирования: Горбачева Л.С. Разработка модельной сети и анализ сетевого трафика управления роботом-манипулятором // Труды учебных заведений связи. 2023. Т. 9. № 3. С. 75–81. DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-3-75-81

Development of a Model Network and an Analysis of Network Traffic for Controlling Robot Manipulators

✉ **Lyubov Gorbacheva**, gorbacheva.ls@sut.ru

The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications,
St. Petersburg, 193232, Russian Federation

Abstract: The issue of controlling robotic manipulators remotely via a communication network is covered in the article. The built model network's structure is shown, and its key elements are detailed. It was designed to intercept and analyze network traffic generated during remote control of robotic manipulators. The main traits of the network traffic that was intercepted for four different applications of using a robot manipulator in the fundamental interaction scenario are presented. These traits also take into account the use of the author proposed improved network algorithm for controlling robot manipulators or their clusters. The self-similarity coefficient of the received network traffic was estimated.

Keywords: industrial Internet of Things, model network, robot manipulator, network traffic interception and analysis, network traffic characteristics, self-similarity coefficient

Funding: The studies at St. Petersburg State University of Telecommunications prof. M.A. Bonch-Bruevich were supported by the Ministry of Science and High Education of the Russian Federation by the grant 075-15-2022-1137

For citation: Gorbacheva L. Development of a Model Network and an Analysis of Network Traffic for Controlling Robot Manipulators. *Proc. of Telecommun. Univ.* 2023;9(3):75–81. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-3-75-81

Введение

В настоящее время в мире все более активно набирает обороты четвертая промышленная революция, в рамках которой в различные сферы деятельности человека интегрируются такие перспективные и наукоемкие технологии как искусственный интеллект, Интернет Вещей, робототехника, технологии распределенного реестра (блокчейн) и т. д. [1].

Безусловно из всего перечисленного роботы и робототехника являются одним из основных столпов дальнейшего технического прогресса, поскольку именно они могут заменить людей на опасных и вредных производствах, значительно увеличить производительность труда, существенно повысить качество изготавливаемой продукции и снизить ее стоимость.

По данным из открытых источников [2, 3] объемы рынка промышленной робототехники, а также ежегодные поставки различных типов промышленных роботов непрерывно увеличивались последние несколько лет, и эта тенденция будет сохраняться в ближайшие годы (рисунки 1 и 2).



Рис. 1. Объем мирового рынка промышленных роботов
 Fig. 1. The Volume of the Global Market for Industrial Robots



Рис. 2. Объем мировых поставок промышленных роботов
 Fig. 2. The Volume of World Supplies of Industrial Robots

Постановка задачи исследования

Большинство роботов и роботизированных систем в настоящее время управляются непосредственно операторами или программно-аппаратными комплексами в дистанционном режиме работы. При высокой концентрации роботов на некоторой ограниченной площади, например, в рамках цехов автоматизированных промышленных производств, неизбежно потребуются их кластеризация (например, по типу решаемых задач, по фактору взаимного расположения и т. д.). Также станет просто невозможным управление каждым отдельным роботом по собственной выделенной линии связи, а значит, управление отдельными роботами или их кластерами будет происходить с использованием локальных вычислительных сетей предприятий и т. д.

Сетевой трафик управления роботами неизбежно будет смешиваться с другими видами сетевого трафика: такими как трафик данных, речь, видео и т. д., что может создать проблемы при его доставке получателю. Поэтому необходимо тщательно изучить особенности сетевого управления роботами и роботизированными системами, определить характеристики генерируемого при этом сетевого трафика, а также – определить наиболее оптимальную архитектуру сети для управления роботами и разработать требования к качеству обслуживания [4, 5].

Разработка модельной сети

Для изучения особенностей сетевого управления роботами, а также перехвата и анализа генерируемого трафика на практике необходимо разработать и реализовать модельную сеть [6, 7]. Модельная сеть обычно представляет собой фрагмент сети связи, которому присущи все возможности и особенности существующих сетей (архитектура, сетевые протоколы, используемое для построения сети оборудование и кабели связи), а также некоторые дополнительные специфические функции – возможности генерации различных видов сетевого трафика по заданным параметрам, возможности ответвления/перехвата сетевого трафика, возможности внесения в каналы передачи данных помех (затухание сигнала, внесение дополнительной задержки, джиттера, потеря или дубликации сетевых пакетов), расширенные возможности мониторинга и протоколирования происходящих в сети событий и т. д.

Основным элементом модельной сети выбран робот-манипулятор «DOBOT Magician», который

представляет собой многофункциональный малогабаритный настольный робот-манипулятор для проведения исследований, обучения и тестирования в области робототехники [8]. К преимуществам данной модели робота можно отнести большое количество сменных модулей (вакуумная присоска, механический захват, лазерный гравер, держатель пишущего пера, блок FDM 3D-печати и др.), а также возможность использовать данную роботизированную платформу для собственных разработок и исследований, поскольку данная модель имеет 13 дополнительных интерфейсов ввода/вывода данных для управления навесным оборудованием. Робот поддерживает 20 различных языков программирования (включая наиболее распространенные сегодня Python, Java, C++ и др.).

Внешний вид робота-манипулятора со сменным модулем держателя пишущего пера представлен на рисунке 3.



Рис. 3. Внешний вид робота-манипулятора «DOBOT Magician»

Fig. 3. The Robot-Manipulator "DOBOT Magician"

Основные технические характеристики робота-манипулятора представлены в таблице 1.

ТАБЛИЦА 1. Технические характеристики робота-манипулятора «DOBOT Magician»

TABLE 1. Technical Characteristics of the Robot-Manipulator "DOBOT Magician"

Характеристика	Значение
Количество осей	4
Полезная нагрузка	500 г
Макс. Объект	320 мм
Повторяемость положения (управление)	0,2 мм
Интерфейсы	USB / Wi-Fi / Bluetooth
Источник питания	100 В–240 В, 50/60 Гц
Питание	12 В / 6,5 А постоянного тока
Потребление	60 Вт Макс.
Рабочая температура	-10–60°C

На рисунке 4 приведена структура разработанной модельной сети, которая состоит из сервера, клиента, шлюзов доступа и самого робота-манипулятора.

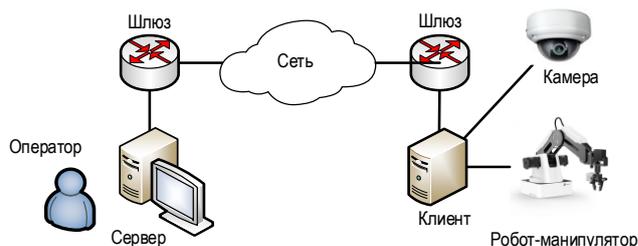


Рис. 4. Структура модельной сети

Fig. 4. The Model Network System Structure

Сервер передает команды управления через сеть связи к клиенту, который в свою очередь принимает поступающие команды и поочередно передает их на робота-манипулятора. Оператор осуществляет непрерывный контроль параметров работы сервера, клиента и сети связи, а также контроль состояния и качество выполнения поступающих команд роботом-манипулятором визуально или с помощью камеры видеонаблюдения, если визуальный контроль невозможен или по каким-то причинам затруднен.

В структуру модельной сети для внесения помех в канал передачи данных может быть добавлен специальный узел постановки помех, что позволит проводить многоплановое тестирование как самих робототехнических комплексов, так и возможностей дистанционного управления такими комплексами по сети связи [9]. Для управления роботом-манипулятором было разработано сетевое программное обеспечение (далее – ПО), которое позволяет передавать команды с сервера через клиентов как отдельным роботам-манипулятором, так и целым кластерам таких роботов. В этом случае клиент может выполнять функции контроллера или головного узла кластера.

Базовый сценарий обмена сообщениями и последовательность действий при управлении роботом-манипулятором для случая, когда в одном сетевом пакете передается одна команда, представлен на рисунке 5.



Рис. 5. Базовый сценарий обмена сообщениями

Fig. 5. Basic Scenario

Перехват генерируемого в процессе дистанционного управления роботом-манипулятором сетевого трафика осуществлялся на сетевом интерфейсе клиента. Для перехвата и последующего анализа сетевого трафика использовалось открытое и свободно-распространяемое ПО [10]. Последующая статистическая обработка результатов измерений проходила с помощью табличного процессора.

Перехват и анализ сетевого трафика

Перехват сетевого трафика осуществлялся для четырех Приложений:

- 1 (без модулей) – на роботе-манипуляторе не установлено никаких сменных модулей, осуществляется перемещение манипулятора робота в пространстве по заданным координатам;
- 2 (вакуумный захват) – на роботе-манипуляторе установлен модуль вакуумного захвата (присоска), осуществляется перемещение небольшого груза в рамках зоны действия робота;
- 3 (механический захват) – то же, но механического захвата;
- 4 (черчение) – на роботе-манипуляторе установлен модуль пишущего пера, осуществляется черчение геометрических фигур на поверхности листа бумаги.

Характеристики перехваченного в ходе экспериментов на базе модельной сети сетевого трафика представлены в таблице 2 (здесь и далее, время перехвата равняется 300 с).

ТАБЛИЦА 2. Трафик, поступающий от клиента на сервер / от сервера к клиенту

TABLE 2. Traffic Coming from Client to Server / from Server to Client

Характеристика	Приложение			
	1	2	3	4
Количество пакетов в секунду, п/с	2/2	2,8/2,8	3,1/3,1	12,7/12,7
Средний размер пакета, байт	55/96	55/96	55/94	55/85
Скорость передачи данных, бит/с	895/1565	1228/2118	1363/2354	5620/8625

Как видно из представленных характеристик, для сетевого трафика, передаваемого от клиента на сервер с целью подтверждения приема и выполнения команд, характерна фиксированная длина пакетов, а для трафика, поступающего от сервера к клиенту, длина пакета меняется в зависимости от Приложения.

Интенсивность отправки пакетов данных зависит от сложности, решаемых роботом-манипулятором, задач. С одной стороны, чем больше установленное количество точек в пространстве, между которыми должен перемещаться манипулятор, тем

более плавно он движется, что важно при перемещении ценных грузов, при проведении высокоточных манипуляций, а также при черчении геометрических фигур. С другой стороны, это увеличивает количество передаваемых команд.

Реализация улучшенного алгоритма управления

В результате проведенного тестирования и опытной эксплуатации роботов-манипуляторов было установлено, что разработанное ранее сетевое ПО управления роботами, сценарий работы которого представлен на рисунке 5, показало низкую эффективность. Фактически, процесс передачи команд управления с сервера к клиенту и подтверждения их приема в этом случае никак не связан с процессом выполнения поступающих команд роботом-манипулятором. В результате на клиенте за короткий период времени накапливается большой массив ожидающих выполнения команд, которые в случае возникновения ошибки выполнения конкретной команды роботом-манипулятором и необходимости дальнейшей перезагрузки клиента оказываются потерянными.

Было принято решение внести изменения в разработанное ПО и реализовать алгоритм, предложенный автором ранее [11]. Реализация алгоритма сетевого взаимодействия между сервером и клиентом с подключенными роботами-манипуляторами фактически является разработкой сетевого протокола прикладного уровня по модели OSI, который базируется на основе транспортного протокола TCP и в рамках исследований получил рабочее название SRMP (аббр. от англ. Simple Robot Management Protocol). Основная идея алгоритма заключается в передаче от сервера к клиенту не отдельных команд управления, а серий команд, при этом подтверждается как получение, так и выполнение серии команд. Сами же серии команд имеют переменную длину, которая зависит от вероятности возникновения ошибки выполнения конкретной команды роботом. Поскольку в рамках разработанного ПО проводится учет успешно выполненных команд и команд, выполненных с ошибкой, происходит постоянный перерасчет вероятности возникновения ошибки.

Тогда, если обозначить оптимальное количество команд в серии как b^* , размер одной команды (который зависит от Приложения) как S_{DC} , суммарный размер служебных сообщений, передаваемых в рамках одной серии команд как L , а вероятность ошибки выполнения отдельной команды как p_{er} , то решение может быть получено методом нахождения экстремума функции, что дает в результате выражение для b^* :

$$b^* = -\frac{L}{2S_{DC}} - \frac{\sqrt{L^2 \ln(1 - p_{er})^2 - 4LS_{DC} \ln(1 - p_{er})}}{2S_{DC} \ln(1 - p_{er})}. \quad (1)$$

При этом значения $p_{er}, S_{DC}, L, b^*_{нач}$ вводятся оператором ПО и/или рассчитываются автоматически в начале работы, например, исходя из решаемой роботом задачи (используемого Приложения). Далее по мере накопления информации о выполненных командах и возникающих ошибках происходит перерасчет b^* . Сценарий обмена сообщениями и последовательность действий для описанного алгоритма представлены на рисунке 6.

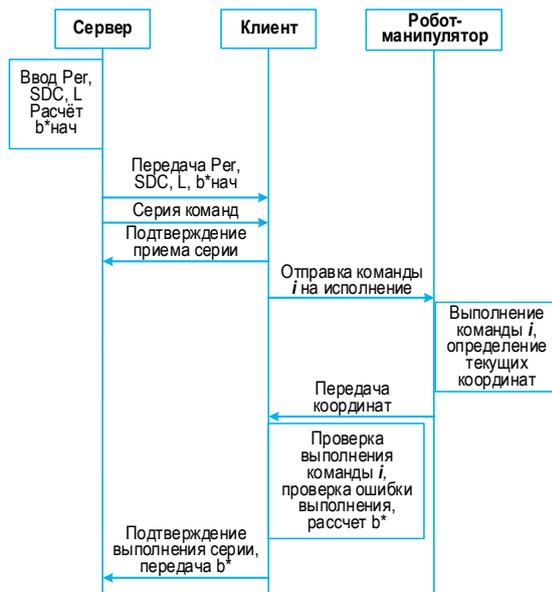


Рис. 6. Сценарий обмена сообщениями (с реализацией предложенного алгоритма)

Fig. 6. Scenario (with the Implementation of the Proposed Algorithm)

С учетом внесенных в ПО изменений согласно представленному алгоритму, был повторно произведен перехват и последующий анализ сетевого трафика. Результаты данных экспериментов представлены в таблице 3.

ТАБЛИЦА 3. Трафик, поступающий от клиента на сервер / от сервера к клиенту (с реализацией предложенного алгоритма)

TABLE 3. Traffic Coming from Client to Server / from Server to Client (with Implementation of the Proposed Algorithm)

Характеристика	Приложение			
	1	2	3	4
Количество пакетов в секунду, п/с	0,1/0,1	0,1/0,2	0,1/0,2	0,4/0,5
Средний размер пакета, байт	56/423	56/468	56/450	56/449
Скорость передачи данных, бит/с	44/541	53/609	56/622	162/1874

Чтобы более наглядно оценить изменение характеристик сетевого трафика после реализации в ПО управления роботом-манипулятором упомянутого выше алгоритма сетевого взаимодействия, было проведено сравнение данных из таблиц 2 и 3. Результаты сравнения представлены в таблице 4.

ТАБЛИЦА 4. Сравнение характеристик сетевого трафика

TABLE 4. Comparison of Network Traffic Characteristics

Приложение / характеристика	Трафик					
	от сервера к клиенту			от клиента на сервер		
	Количество пакетов в секунду, п/с					
	Было	Стало	Изменение	Было	Стало	Изменение
Приложение 1	2	0,1	-95 %	2	0,1	-95 %
Приложение 2	2,8	0,2	-93 %	2,8	0,2	-93 %
Приложение 3	3,1	0,2	-94 %	3,1	0,2	-94 %
Приложение 4	12,7	0,5	-96 %	12,7	0,5	-96 %
СРЕДНЕЕ			-94 %			-94 %
	Средний размер пакета, байт					
Приложение 1	96	423	+341 %	55	56	+2 %
Приложение 2	96	468	+388 %	55	56	+2 %
Приложение 3	94	450	+379 %	55	56	+2 %
Приложение 4	85	449	+428 %	55	56	+2 %
СРЕДНЕЕ			+384 %			+2 %
	Скорость передачи данных, бит/с					
Приложение 1	1565	451	-71 %	895	44	-95 %
Приложение 2	2118	609	-71 %	1228	53	-96 %
Приложение 3	2354	622	-74 %	1363	56	-96 %
Приложение 4	8625	1874	-78 %	5620	162	-97 %
СРЕДНЕЕ			-74 %			-96 %

Из представленных в таблице 4 результатов сравнения видно, что после реализации предложенного алгоритма значительно сократилась нагрузка на сеть при дистанционном управлении роботом-манипулятором. Так, например, скорость передачи данных от сервера к клиенту сократилась на 74 %, а средний размер пакета вырос на 384 %.

На рисунке 7 представлены распределения длин пакетов для сетевого трафика, генерируемого сервером и клиентом во время дистанционного управления роботом-манипулятором (интервал гистограммы равен 50 байт), а на рисунке 8 – распределения величин интервалов времени между отправкой пакетов в сеть для трафика, генерируемого сервером и клиентом во время дистанционного управления роботом-манипулятором (интервал гистограммы – 0,1 с).

Данные экспериментальные распределения величин интервалов времени между отправкой IP-пакетов могут быть аппроксимированы смешанным распределением, плотность вероятности которого определяется как:

$$f(x) = \eta_1 f_1(x) + \eta_2 f_2(x) \tag{2}$$

где $f_i(x)$ – плотность вероятности подходящего распределения, η_i – весовой коэффициент.

Сводные данные по вероятностным распределениям для сервера и клиента представлены в таблице 5.

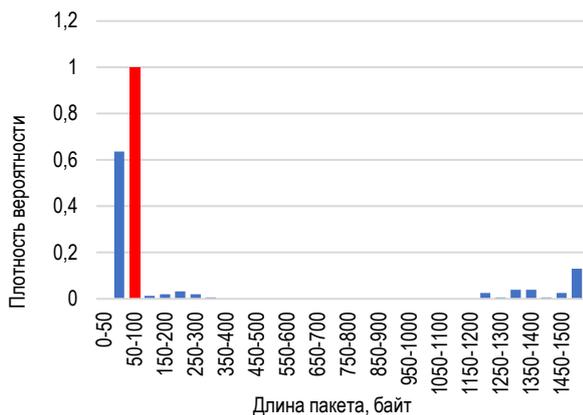
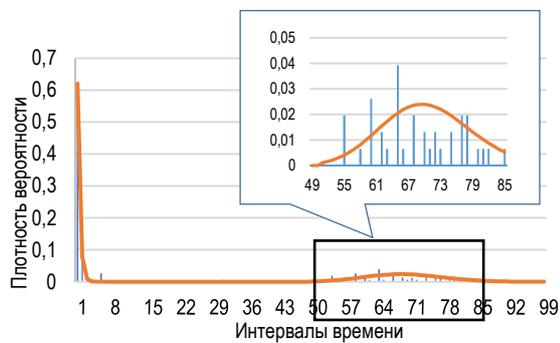
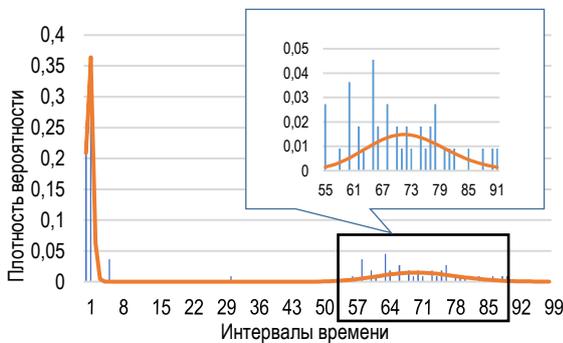


Рис. 7. Распределение длин генерируемых сервером (синим) и клиентом (красным) IP-пакетов

Fig. 7. Distribution of IP Packets Lengths Generated by the Server (in Blue) and Client (in Red)



а)



б)

Рис 8. Распределение величин интервалов времени между отправкой IP-пакетов от сервера (а) и от клиента

Fig. 8. Distribution of Time Intervals between sending IP Packets from the Server (a) and client (b)

ТАБЛИЦА 5. Вероятностные распределения, описывающие интервалы времени между отправкой пакетов в сеть

TABLE 5. Probability Distributions Describing the Time Intervals between Sending Packets to the Network

От сервера		От клиента	
Распределение	Коэффициенты	Распределение	Коэффициенты
Экспоненциальное	$\lambda = 20,69;$ $\eta_1 = 0,71$	Двухпараметрическое Гамма	$\alpha = 5,73;$ $\beta = 0,02;$ $\eta_1 = 0,64$
Двухпараметрическое Гамма	$\alpha = 70,01;$ $\beta = 0,11;$ $\eta_2 = 0,51$	Двухпараметрическое Гамма	$\alpha = 73,72;$ $\beta = 0,09;$ $\eta_2 = 0,31$

В качестве распределений для аппроксимации выбраны: экспоненциальное распределение (где λ – параметр интенсивности ($\lambda > 0$)); двухпараметрическое Гамма-распределение (где α – параметр формы ($\alpha > 0$), β – параметр скорости ($\beta > 0$)).

Оценка степени самоподобия сетевого трафика

Также для перехваченного сетевого трафика был рассчитан коэффициент самоподобия (коэффициент Херста (H)) методом изменения дисперсии [12]. Расчет производился на основе интервалов времени между отправкой пакетов от сервера к клиенту. Результаты оценки представлены в таблице 6.

ТАБЛИЦА 6. Оценка самоподобия сетевого трафика

TABLE 6. Self-Similarity Estimation of Network Traffic

	Приложение				Среднее значение	СКО
	1	2	3	4		
Базовый сценарий	0,41	0,49	0,53	0,58	0,5	0,07
С предложенным алгоритмом	0,59	0,56	0,56	0,48	0,55	0,05

Из результатов оценки коэффициента самоподобия (H) следует, что трафик, генерируемый при дистанционном управлении роботом-манипулятором при работе всех Приложений по предложенному алгоритму (протоколу) сетевого взаимодействия, имеет более самоподобный характер, чем в базовом сценарии.

Выводы

В работе описан реализованный и апробированный в ходе исследований усовершенствованный алгоритм сетевого управления роботами манипуляторами. В результате проведенного перехвата и анализа сетевого трафика установлено снижение интенсивности поступления пакетов в сеть связи, снижение используемой пропускной способности и увеличение среднего размера пакетов при условии использования предложенного алгоритма.

Проведена оценка коэффициента самоподобия сетевого трафика (H). Показано, что после реализации предложенного алгоритма степень самоподобия сетевого трафика возросла.

Представленные результаты могут быть использованы для проведения имитационного моделирования, совершенствования алгоритмов управления отдельными роботами или их кластерами, а также для планирования и развертывания автоматизированных производств.

Данные исследования необходимы для эффективного выполнения задач на различных производствах, освобождая людей от опасной и монотонной работы. Также возможно применение в организации телеконференций, например, при удаленном подписании документов.

Список источников

1. Шваб К. Технологии четвертой промышленной революции. Пер. с англ. М: Бомбора, 2018. 320 с.
2. Jocelyn V. Industrial robots worldwide // Statista Inc. 2022. URL: <https://www.statista.com/study/14872/industrial-robots-statista-dossier> (дата обращения 03.05.2023)
3. Аналитика // Национальная Ассоциация Участников Рынка Робототехники. 2023. URL: <https://robotunion.ru/services/documents> (дата обращения 10.05.2023)
4. Горбачева Л.С., Парамонов А.И. Модели показателей качества обслуживания для трафика (роботов-манипуляторов) // Информационные технологии и телекоммуникации. 2022. Т. 10. № 3. С. 13–19. DOI:10.31854/2307-1303-2022-10-3-13-19
5. Алзагир А.А., Парамонов А.И., Кучерявый А.Е. Исследование качества обслуживания в сетях 5G и последующих поколений // Электросвязь. 2022. № 6. С. 2–7. DOI:10.34832/ELSV.2022.31.6.001
6. МСЭ-Т Q.3900 (2006) Методы тестирования и архитектура модельных сетей для тестирования технических средств СПП, используемых в сетях электросвязи общего пользования.
7. Кучерявый А.Е., Маколкина М.А., Парамонов А.И., Выборнова А.И., Мутханна А.С., Матюхин А.Ю. и др. Модельная сеть для исследований и обучения в области услуг телеприсутствия // Электросвязь. 2022. № 1. С. 14–20. DOI:10.34832/ELSV.2022.26.1.001
8. Промышленные и образовательные решения // DOBOT. 2023. URL : <https://dobots.ru/magician> (дата обращения 10.05.2023)
9. Горбачева Л.С., Фам В.Д., Матюхин А.Ю., Кучерявый А.Е. Исследование влияния характеристик сети на функционирование многофункционального робота-манипулятора // Электросвязь. 2022. № 2. С. 37–41. DOI:10.34832/ELSV.2022.27.2.005
10. Wireshark Foundation // Wireshark. 2023. URL: <https://www.Wireshark.org> (дата обращения 10.05.2023)
11. Горбачева Л. С. Метод оптимального использования сетевых ресурсов для робота-манипулятора // Электросвязь. 2023. № 5. С. 10–15.
12. Шелухин О.И., Осин А.В., Смольский С.М. Самоподобие и фракталы. Телекоммуникационные приложения. М.: Физматлит, 2008. 368 с.

References

1. Schwab K. *Shaping the Fourth Industrial Revolution*. World Economic Forum; 2018. 287 p.
2. Jocelyn V. Industrial robots worldwide. *Statista Inc*. 2022. URL: <https://www.statista.com/study/14872/industrial-robots-statista-dossier> [Accessed 03.05.2023]
3. *Russian Association of Robotics*. Analytics. 2023. URL: <https://robotunion.ru/services/documents> [Accessed 10.05.2023]
4. Gorbacheva L., Paramonov A. Models of quality of service indicators for traffic (robots-manipulators). *Telecom IT*. 2022; 10(3):13–19. (in Russ.) DOI:10.31854/2307-1303-2022-10-3-13-19
5. Alzagir A.A., Paramonov A.I., Koucheryavy A.E. Study of Quality of Service in 5G and Next-Generation Networks. *Elektrosvyaz*. 2022;6:2–7. (in Russ.) DOI:10.34832/ELSV.2022.31.6.001
6. ITU-T Q.3900. *Test methods and architecture of model networks for testing NGN hardware used in public telecommunication networks*. 2006.
7. Koucheryavy A.E., Makolkina M.A., Paramonov A.I., Vybornova A.I., Muthanna A.S., Matyuhin A.Yu. Model network for research, training, and testing in the area of telepresence services. *Elektrosvyaz*. 2022;1:14–20. (in Russ.) DOI:10.34832/ELSV.2022.26.1.001
8. DOBOT. Industrial and educational solutions. 2023. URL: <https://dobots.ru/magician> [Accessed 10.05.2023]
9. Gorbacheva L.S., Fam V.D., Matyuhin A.Yu., Koucheryavy A.E. Investigation of the influence of network characteristics on the functioning of a multifunctional robotic arm. *Elektrosvyaz*. 2022;2:37–41. (in Russ.) DOI:10.34832/ELSV.2022.27.2.005
10. *Wireshark*. Wireshark Foundation. 2023. URL: <https://www.Wireshark.org> [Accessed 10.05.2023]
11. Gorbacheva L.S. Model network for research, training, and testing in the area of telepresence services. *Elektrosvyaz*. 2023;5:10–15. (in Russ.)
12. Shelukhin O.I., Osin A.V., Smolsky S.M. *Self-Similarity and Fractals. Telecommunication Applications*. Moscow: Fizmatlit Publ.; 2008. 368 p. (in Russ.)

Статья поступила в редакцию 21.06.2023; одобрена после рецензирования 22.06.2023; принята к публикации 28.06.2023.

The article was submitted 21.06.2023; approved after reviewing 22.06.2023; accepted for publication 28.06.2023.

Информация об авторе:

ГОРБАЧЕВА
Любовь Сергеевна

аспирант кафедры сетей связи и передачи данных Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича
 <https://orcid.org/0009-0001-2517-1370>