

Научная статья

УДК 004.055

DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-1-59-73



Тестирование облачных систем видеоконференцсвязи на основе параметра Хёрста

Руслан Валентинович Киричек¹, kirichek@sut.ru
Александр Александрович Берёзкин¹✉, berezkin.aa@sut.ru
Дмитрий Сергеевич Кукунин¹, kukunin.ds@sut.ru
Андрей Вячеславович Колесников², andrei@iotas.ru

¹Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. М.А. Бонч-Бруевича,
Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

²Ассоциация участников рынка интернета вещей
Москва, 101000, Российская Федерация

Аннотация: В статье рассматриваются вопросы тестирования популярных отечественных и зарубежных облачных систем видеоконференцсвязи (ВКС). Предложена методика тестирования и сравнения качественных параметров приложений ВКС на основе международного опыта. Оценка и сравнение услуг ВКС выполнены на основе вычисления параметра Хёрста потоков данных, формируемых исследуемыми облачными системами ВКС. Проведено тестирование различных приложений зарубежных и отечественных систем ВКС в различных режимах работы при разных параметрах качества канала связи.

Ключевые слова: качество восприятия, видеоконференцсвязь, параметр Хёрста, DION, Zoom, TrueConf, Webinar meetings, Cisco WebEx, Microsoft Teams, Discord

Ссылка для цитирования: Киричек Р.В., Берёзкин А.А., Кукунин Д.С., Колесников А.В. Тестирование облачных систем видеоконференцсвязи на основе параметра Хёрста // Труды учебных заведений связи. 2023. Т. 9. № 1. С. 59–73. DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-1-59-73

Analysis of Experience Quality Parameters of Cloud Video Conferencing Systems under Interference Conditions

Ruslan Kirichek¹, kirichek@sut.ru
Aleksandr Berezhkin¹✉, berezkin.aa@sut.ru
Dmitry Kukunin¹, kukunin.ds@sut.ru
Andrey Kolesnikov², andrei@iotas.ru

¹The Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunications,
St. Petersburg, 193232, Russian Federation

²Association of Internet of Things Market Participants
Moscow, 101000, Russian Federation

Abstract: The article deals with the testing of popular domestic and foreign cloud videoconferencing systems. A methodology for testing and comparing qualitative parameters of videoconferencing applications based on international experience is proposed. Assessment and comparison of videoconferencing services is based on the calculation of Hurst data flows, formed by the investigated cloud videoconferencing systems. Various applications of

foreign and domestic videoconferencing systems have been tested in different operation modes with different channel quality parameters.

Keywords: quality of experience, video conferencing, Hurst parameter, DION, Zoom, TrueConf, Webinar meetings, Cisco WebEx, Microsoft Teams, Discord

For citation: Kirichek R., Berezkin A., Kukunin D., Kolesnikov A. Analysis of Experience Quality Parameters of Cloud Video Conferencing Systems under Interference Conditions. *Proc. of Telecom. Universities*. 2023;9(1):59–73. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-1-59-73

Введение

Видеоконференции стали важным инструментом эффективного общения и сотрудничества для предприятий, школ и частных лиц. С появлением облачных систем видеоконференцсвязи (ВКС) крайне важно обеспечить, чтобы эти системы были должным образом протестированы перед развертыванием. Тестирование облачных систем ВКС помогает выявить и устранить любые потенциальные проблемы, которые могут повлиять на пользовательский опыт и качество восприятия. Например, система может быть протестирована, чтобы убедиться в ее способности обрабатывать большое количество пользователей, в соответствующем качестве звука и видео, а также в том, что она безопасна и защищена от киберугроз.

Кроме того, тестирование помогает оптимизировать производительность облачных систем ВКС. Его можно использовать для оценки пропускной способности сети, ресурсов сервера и других компонентов, которые имеют решающее значение для бесперебойной работы ВКС. Кроме того, это может помочь определить наиболее эффективные настройки приложений ВКС, такие как пропускная способность и сжатие, которые можно установить в соответствии с потребностями различных пользователей и вариантами использования.

Еще одним важным преимуществом тестирования облачных систем ВКС является то, что это может помочь улучшить общий пользовательский опыт. Хорошо спроектированная и должным образом протестированная система ВКС может обеспечить надежную и бесперебойную связь с минимальными техническими проблемами. Это может повысить удовлетворенность пользователей и стимулировать дальнейшее использование, что способствует более широкому внедрению и росту системы ВКС.

В настоящее время российским пользователям доступно множество облачных систем ВКС, причем некоторые из них, например, DION, Webinar meetings или TrueConf развиваются на основе отечественных разработок. Другая группа облачных ВКС представлена решениями западных IT-компаний – Cisco WebEx, Microsoft Teams, Zoom US и др.

Однако важно отметить, что в настоящее время не существует общего стандарта для тестирования

облачных систем ВКС. Это означает, что каждая компания или организация вынуждены разрабатывать свои собственные протоколы и процедуры тестирования.

В результате исследования рекомендаций ITU-T выявлено, что наиболее близкой к задаче тестирования облачных систем ВКС является Рекомендация ITU-T Q.3949 [1]: *Real-time multimedia service testing framework at the user-to-network interface of next generation networks*, где описываются процедуры, требования, физические конфигурации и стандартные комплекты документов для тестирования мультимедийных услуг в режиме реального времени на интерфейсе «пользователь – сеть» (UNI, аббр. от англ. User-to-Network Interface) сетей следующего поколения (NGN, аббр. от англ. Next Generation Networks), что может быть использовано как основа для тестирования облачных систем ВКС.

Облачные системы ВКС в терминологии NGN могут рассматриваться как «End-to-End»-услуги между терминалами абонентов, где тестируемые оконечные услуги (Test Subject) находятся по обе стороны канала связи. На рисунке 1 показана физическая конфигурация для тестирования услуги ВКС на основе [1], где Клиент 1 и Клиент 2 – оконечные устройства и ПО для проведения ВКС (Terminal-A, Terminal-B); сеть NGN – облачная система ВКС в сети интернет; UNI – интерфейс доступа оконечных устройств к сети интернет.



Рис. 1. Типовая физическая конфигурация для тестирования облачных систем ВКС в соответствии с Рекомендацией ITU-T Q.3949 [1]

Fig. 1. Typical Physical Configuration for Testing Video Conferencing Cloud Systems in Accordance with Recommendation ITU-T Q.3949 [1]

В [1] определены критерии тестирования протокола взаимодействия службы с услугами NGN, однако порядок тестирования сеанса аудио- и видеосвязи не определен. В предлагаемой методике тестирования выявляется порядок тестирования сценария 3 «сеанс аудио- и видеосвязи» Рекомендации Q.3949. Оценка качества услуги ВКС QoS (аббр. от англ. Quality of Service) определяется че-

рез оценку качества восприятия QoE (аббр. от англ. Quality of Experience)

Оценка качества восприятия

QoE – это мера удовольствия или раздражения клиента от использования услуги (например, системы ВКС), которая фокусируется на всем опыте обслуживания. QoE является новой междисциплинарной областью, основанной на социальной психологии, когнитивной науке, экономике и инженерных науках, ориентированной на понимание общих требований к качеству восприятия человеком. Качество восприятия зависит от нескольких факторов (рисунок 2) как субъективных, так и объективных [2]. В первом случае на оценку пользователя влияет его опыт работы с другими услугами.

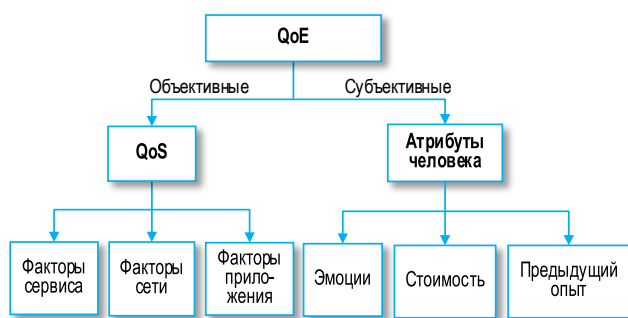


Рис. 2. Объективные и субъективные параметры оценки QoE

Fig. 2. Objective and Subjective Parameters of QoE Assessment

Главной метрикой объективных факторов QoE выступает QoS. В этом случае впечатления абонента формирует производительность и стабильность предоставляемой услуги, наличие/отсутствие артефактов при просмотре видео, задержки при взаимодействии с услугой, а также посторонние щелчки и шумы при передаче аудиоданных. Для тестирования систем ВКС необходимо определить измеримые показатели качества, которые позволяют связать QoE с QoS.

Применяемые на сегодняшний день методы оценки качества передачи видео, основанные на анализе характеристик сети, являются фактически теми же средствами, что используются для контроля качества передачи голосовой информации, т. е. они измеряют параметры транспортной сети [3–11]. В отличие от субъективных методов объективные не дают представления о том, что же на самом деле видит пользователь на экране, т. к. они не делают различия между пакетами, передающими видео, и пакетами, передающими другую информацию. Для того, чтобы измерить в количественном отношении качество услуг ВКС и сравнить их между собой, необходимо ввести определенную метрику. На сегодняшний день не разработано рекомендаций, определяющих введение какой-либо метрики, поэтому известен ряд методов, которые имеют существенные различия меж-

ду собой и базируются на разных подходах: Media Delivery Index (MDI), Video Quality Metric (VQM), Moving Pictures Quality Metric (MPQM), Noise Quality Measure (NQM) и т. д. Данные методы можно отнести к общим методам оценки работоспособности сети, в полной мере не учитывающих особенности приложения. Кроме того, предлагаемые подходы оценки QoE на основе E-модели [12] очень ресурсоемкие и имеют граничные условия использования.

Особенности передачи видео по IP-сетям требуют разработки новых показателей оценки QoE [13, 14]. Исследования показывают, что видеотрафик для большинства видов услуг является самоподобным [15–18]. Учет самоподобных свойств видеотрафика предоставляет возможность более точного оценивания видеопоследовательности, что, в свою очередь, позволяет улучшить методы оценки качества передачи видео и получить показатели QoE, близкие к реально наблюдаемым. Одним из показателей объективной оценки качества видео, так называемый V-фактор, по аналогии с R-фактором для речи, является параметр Хёрста [19–21], учитывающий степень самоподобия мультимедийного трафика, передаваемого в рамках функционирования облачных систем ВКС. Доказано, что видеотрафик обладает свойством самоподобия. Таким образом, отслеживая параметр Хёрста, можно наблюдать за наличием видеотрафика в сети, а по изменениям значений параметра прогнозировать изменения характеристик видеопотока, что может повлиять на оценку качества восприятия.

В предлагаемой методике тестирования оценка QoE и сравнение облачных систем ВКС проводится на основе вычисления параметра Хёрста потоков данных, формируемых исследуемыми системами.

Методика тестирования

В рамках исследования проводились испытания следующих приложений: Zoom, Cisco WebEx, DION, Discord, Microsoft Teams, TrueConf и Webinar meetings. Для проведения тестирования составлен чек-лист, включающий в себя возможные конфигурации системы приложения для конференций, а также значения параметров дополнительной искусственной задержки и потерь пакетов для осуществления тестирования надежности и отказоустойчивости системы. Дополнительная искусственная задержка и потери пакетов на приемной стороне тракта ВКС введены с целью реализации каналов связи различного качества. В рассматриваемых условиях данные параметры дополнительно применяются к естественным задержкам передачи данных в сети Интернет. Далее под параметрами «Задержка» и «Потери» понимается искусственные задержки и потери пакетов, добав-

ляющие дополнительные значения параметров к естественным задержкам в сети Интернет. При этом, значение параметра равно нулю означает отсутствие такого искусственного добавления.

Реализован дизайн тест-кейсов (ТК) с применением техник тестирования [22]. Параметры, различные значения которых необходимо протестировать, определены в таблице 1.

ТАБЛИЦА 1. Параметры тестирования

TABLE 1. Testing Parameters

№ п/п	Наименование показателя	Возможные значения
1	OS Terminal-A	[Windows, MacOS, Linux, IOS, Android]
2	OS Terminal-B	[Windows, MacOS, Linux, IOS, Android]
3	Тип приложения Terminal-A	[Desktop Windows, Desktop MacOS, IOS mobile App, Android mobile App, Web application]
4	Тип приложения Terminal-B	[Desktop Windows, Desktop MacOS, IOS mobile App, Android mobile App, Web application]
5	Задержка, мс	[0, 50, 100, 200, 300]
6	Потери, %	[0, 0,5, 1, 3, 5]

Для составления списка тест-кейсов на основе тестируемых параметров необходимо применить техники тест-дизайна. Параметр «Задержка» принимает значения от 0 до бесконечности. При тестировании облачных систем ВКС использовано значение 300 мс, как достаточно большое с учетом наличия дополнительных задержек в сети Интернет. Это в достаточной степени согласуется с известными нормами класса 1 QoS, к которому относятся услуги ВКС [23], допускающие задержку до 400 мс. Однако если задержка более 100 мс, то качество связи начинает падать. Следовательно, для параметра «Задержка» можно выделить 2 класса эквивалентности (таблица 2).

ТАБЛИЦА 2. Классы эквивалентности параметра «Задержка»

TABLE 2. Equivalence Classes of the "Delay" Parameter

Класс эквивалентности, мс	Среднее значение, мс	Качество связи	Граничные условия, мс
[0–100]	50	приемлемое	[0, 100, 300]
[100–300]	200	неприемлемое	

При использовании техники граничных значений также необходимо учитывать значения, отличающиеся от граничных на один пункт (+1, –1). Однако при тестировании систем ВКС смоделировать задержку 99 и 101 мс с помощью имеющихся технических средств невозможно. В связи с тем, что тестирование параметров задержки и потерь не является тестированием, например, полей ввода в интерфейсе пользователя, где условная единица существенно влияет на поведение системы, то нет необходимости в его проведении вблизи

граничных значений. С помощью техник «Классы эквивалентности» и «Граничные условия» [23] были определены следующие значения для тестирования параметра «Задержка»: 0, 50, 100, 200 и 300 мс.

Для параметра «Потери» также можно выделить 2 класса эквивалентности (таблица 3).

ТАБЛИЦА 3. Классы эквивалентности параметра «Потери»

TABLE 3. Equivalence Classes of the "Loss" Parameter

Класс эквивалентности, %	Среднее значение, %	Качество связи	Граничные условия, %
[0–1]	0,5	приемлемое	[0, 1, 5]
[1–5]	3	неприемлемое	

При тестировании систем ВКС смоделировать потери 0,9 и 1,1 % с помощью имеющихся технических средств оказалось невозможным. Поэтому для случая с параметром «Потери» также нет необходимости в проведении тестирования вблизи граничных значений. С помощью техник «Классы эквивалентности» и «Граничные условия» были определены следующие значения для тестирования параметра «Потери»: 0, 0,5, 1, 3 и 5 %.

Применение техник тест-дизайна позволяет прийти к оптимальному количеству тестов и покрыть наиболее распространенные конфигурации использования тестируемого программного обеспечения. Для создания тест-кейсов с наивысшим приоритетом необходимо, руководствуясь целью тестирования, определить параметры, тестирование значений которых наиболее приоритетно. Для создания остальных тест-кейсов целесообразно применить технику «Попарное тестирование».

С учетом наиболее часто используемых сценариев применения ПО ВКС определен приоритет тест-кейсов (таблицы 4–7). Приоритеты тест-кейсов обозначены как P0 (высокий), P1 (средний) и P2 (низкий).

В группе тест-кейсов P0 в таблице 5 приведены устанавливаемые числовые значения джиттера задержек и потерь пакетов, где джиттер вычисляется случайным образом в течение указанного периода времени. Например, значение «400 мс → 5000 мс» в столбце 4 устанавливает джиттер от 1 до 400 мс в течение 5000 мс. То же самое относится и к параметру потерь пакетов в столбце 5 таблицы 5. Порядковые номера таких параметров в таблице указывают на последовательность изменения параметров джиттера. При этом в тест-кейсе P0_8 значения джиттера не менялись. В последнем столбце таблицы 5 указаны параметры изменения содержимого пакетов данных. Например, значение «15 (1–10 шт.)» означает, что в 15 % случаев изменялось содержимое пакетов длиной от 1 до 10 штук. При этом длины пакетов выбираются случайным образом. Для рас-

чета параметра Хёрста необходимо произвести регистрацию количества пакетов, переданных по лучателю с течением времени $N(t)$ в процессе работы сеанса ВКС для каждого тест-кейса.

ТАБЛИЦА 4. Группа тест-кейсов высокого приоритета (P0)

TABLE 4. Group of High Priority Test Cases (P0)

Код ТК	Terminal-A	Terminal-B	Задержка, мс	Потери, %
P0_1	Windows web browser	Windows web browser	0	0
P0_2	Windows web browser	Windows web browser	50	0,5
P0_3	Windows web browser	Windows web browser	100	1
P0_4	Windows web browser	Windows web browser	200	3
P0_5	Windows web browser	Windows web browser	300	5

ТАБЛИЦА 5. Группа тест-кейсов P0 (экстремальные значения параметров)

TABLE 5. Group of Test Cases P0 (extreme values of parameters)

Код ТК	Terminal-A	Terminal-B	Задержка/джиттер, мс	Потери/джиттер, %	Изменение содержимого пакетов, %
P0_6	Windows web browser	Windows web browser	1)400 мс → 5000 мс 2)0 мс → 2000 мс 3)300 мс → 5000 мс 4)0 мс → 2000 мс 5)100 мс → 5000 мс 6)0 мс → 2000 мс	1)0 % → 20000 мс 2)10 % → 10000 мс 3)20 % → 10000 мс 4)30 % → 10000 мс 5)20 % → 10000 мс 6)10 % → 10000 мс 7)5 % → 10000 мс	15 (1-10 шт.)
P0_7	IOS mobile	IOS mobile	1)400 мс → 5000 мс 2)0 мс → 2000 мс 3)300 мс → 5000 мс 4)0 мс → 2000 мс 5)100 мс → 5000 мс 6)0 мс → 2000 мс	1)0 % → 20000 мс 2)10 % → 10000 мс 3)20 % → 10000 мс 4)30 % → 10000 мс 5)20 % → 10000 мс 6)10 % → 10000 мс 7)5 % → 10000 мс	15 (1-10 шт.)
P0_8	Windows desktop	Windows desktop	400	30	20 (1-50 шт.)

ТАБЛИЦА 6. Группа тест-кейсов среднего приоритета (P1)

TABLE 6. Group of Medium Priority Test Cases (P1)

Код ТК	Terminal-A	Terminal-B	Задержка, мс	Потери, %
P1_1	Windows web browser	Android mobile	200	3
P1_2	MacOS web browser	MacOS web browser	100	3
P1_3	MacOS web browser	IOS mobile	200	0
P1_4	MacOS web browser	Android mobile	0	0,5
P1_5	MacOS web browser	Windows web browser	50	1
P1_6	IOS mobile	IOS mobile	0	1
P1_7	IOS mobile	Android mobile	50	3
P1_8	IOS mobile	Windows web browser	100	0
P1_9	IOS mobile	MacOS web browser	200	0,5
P1_10	Android mobile	Android mobile	100	0,5
P1_11	Android mobile	Windows web browser	200	1
P1_12	Android mobile	MacOS web browser	0	3
P1_13	Android mobile	IOS mobile	50	0
P1_14	Windows web browser	Android mobile	200	3
P1_15	MacOS web browser	MacOS web browser	100	3

ТАБЛИЦА 7. Группа тест-кейсов низкого приоритета (P2)

TABLE 7. Group of Low Priority Test Cases (P2)

Код ТК	Terminal-A	Terminal-B	Тип канала связи	Задержка, мс	Потери, %
P2_1	Windows web browser	Windows web browser	WiFi	300	5
P2_2	Windows Desktop	Windows Desktop	WiFi	100	1
P2_3	MacOS Desktop	MacOS Desktop	WiFi	200	3
P2_4	Windows Desktop	Windows Desktop	WiFi	0	0
P2_5	MacOS Desktop	Windows Desktop	WiFi	50	0,5
P2_6	Windows Desktop	Windows Desktop	WiFi	300	5
P2_7	Android mobile	Android mobile	LTE	0	0
P2_8	Android mobile	IOS mobile	LTE	50	0,5
P2_9	Android mobile	Android mobile	LTE	100	1
P2_10	IOS mobile	Android mobile	LTE	200	3
P2_11	IOS mobile	IOS mobile	LTE	0	0

Сбор и обработка данных проводились при различных условиях состояния сети с варьированием искусственной задержки пакетов (0, 50, 100 и 200 мс) и вероятности потери пакетов (0, 0,5, 1 и 3 %). В качестве инструмента сбора статистических данных был использован анализатор сетевого трафика TamiSoft CommView версии 7.0. После установки связи между клиентами системы ВКС осуществлялся захват сетевого трафика. Длительность захвата трафика составляла $T = 300$ с. По завершению периода сбора данных захват трафика прекращался. Далее с помощью инструментов CommView выгружались статистические данные по принятым пакетам, которые модифицировались в массив данных, необходимый для расчета параметра Хёрста. Результаты вычисления параметра Хёрста для всех систем ВКС при тест-кейсах разных групп приоритета заносились в таблицу 8, где H_{ij} – значение параметра Хёрста для i -й системы ВКС и j -го тест-кейса; N – количество тест-кейсов соответствующего приоритета $P0$, $P1$ и $P2$.

Заполнение таблицы 8, где i – порядковый номер ВКС; j – порядковый номер тест-кейса производятся в следующей последовательности:

- 1) для всех $i = 1 \dots 7$ и $j = 1 \dots N_{P0}$;
- 2) для всех $i = 1 \dots 7$ и $j = (N_{P0} + 1) \dots N_{P1}$;
- 3) для всех $i = 1 \dots 7$ и $j = (N_{P1} + 1) \dots N_{P2}$.

Оценка параметра Хёрста для каждой ВКС производится на основе аддитивной свертки. Каждо-

му тест-кейсу в зависимости от экспертного решения был назначен весовой коэффициент k_j , где j – порядковый номер тест-кейса. Значения весовых коэффициентов назначаются в соответствии с важностью тест-кейса и для каждой i -й ВКС в рамках своей группы важности ($P0$, $P1$ и $P2$) удовлетворяют условиям:

$$\sum_{j=1}^{N_{P0}} k_j^{P0} = 1, \quad \sum_{j=(N_{P0}+1)}^{N_{P1}} k_j^{P1} = 1, \quad \sum_{j=(N_{P1}+1)}^{N_{P2}} k_j^{P2} = 1 \quad (2)$$

Вычисление параметра Хёрста H^{P0} в первом диапазоне $P0$ позволит определить его базовое значение для самых важных тест-кейсов:

$$H_j^{P0} = \sum_{j=1}^{N_{P0}} k_j^{P0} H_{ij} = 1. \quad (3)$$

Вычисление параметра Хёрста H^{P1} во втором диапазоне $P1$ при наличии достаточного временного ресурса позволит произвести его определение для менее важных тест-кейсов:

$$H_j^{P1} = \sum_{j=(N_{P0}+1)}^{N_{P1}} k_j^{P1} H_{ij} = 1. \quad (4)$$

ТАБЛИЦА 8. Параметр Хёрста для группы тестов [P0, P1, P2]

TABLE 8. Hurst Parameter for the Test Group [P0, P1, P2]

№ п/п	Тест-кейс	Cisco WebEx	Zoom	Microsoft Teams	Webinar meetings	DION	TrueConf	Discord
1	P[0,1,2]_1	H_{11}	H_{12}	H_{13}	H_{14}	H_{15}	H_{16}	H_{17}
2	P[0,1,2]_2	H_{21}	H_{22}	H_{23}	H_{24}	H_{25}	H_{26}	H_{27}
...								
N	P[0,1,2]_3	H_{N1}	H_{N2}	H_{N3}	H_{N4}	H_{N5}	H_{N6}	H_{N7}

Вычисление параметра Хёрста H^{P2} в третьем диапазоне $P2$ также при наличии достаточного временного ресурса позволит произвести его определение для оставшихся тест-кейсов, которые являются наименее важными, но вносят определенный вклад в точность вычисления данного параметра:

$$H_j^{P_2} = \sum_{i=(N_{P_1}+1)}^{N_{P_2}} k_j^{P_2} H_{ij} = 1. \quad (5)$$

Таким образом, вычисление базового значения параметра Хёрста для всех ВКС (2) являлось минимальной задачей. Наличие достаточного временного ресурса позволило повысить точность его вычисления за счет определения (4) и (5). При этом необходимо было снова задействовать принцип аддитивной свертки и назначить весовые коэффициенты K каждой группе важности, чтобы выполнялось условие:

$$K_{p0} + K_{p1} + K_{p2} = 1. \quad (6)$$

В таком случае более точное значение параметра Хёрста при всех N выполненных тест-кейсах для каждой i -й ВКС вычисляется по формуле:

$$H_i = K_{P0}H_i^{P0} + K_{P1}H_i^{P1} + K_{P2}H_i^{P2}. \quad (7)$$

Далее результаты (7) были упорядочены по убыванию H_i и проранжированы.

Итогом данного этапа исследования является выбор трех ВКС с наименьшим рангом R_i . Для них в дальнейшем могут проводиться дополнительные исследования для субъективной оценки качества. В данном тестировании субъективная оценка качества не проводилась.

Описание стенда

На рисунке 4 изображена структура стенда для тестирования облачных систем ВКС.

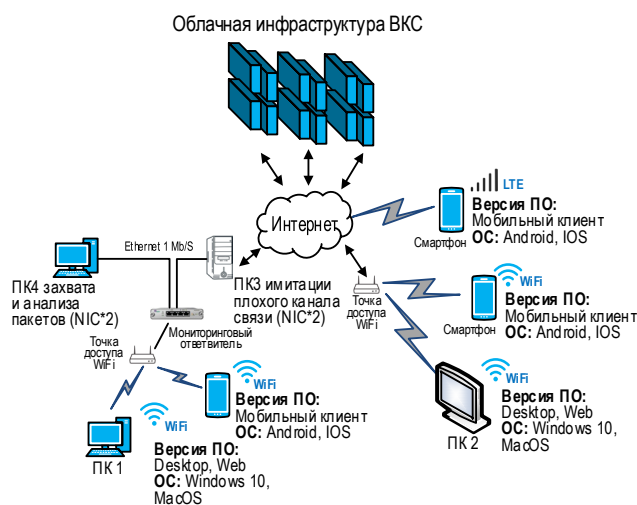


Рис. 4. Структура стенда

Fig. 4. Structure of the Stand

Архитектурно с помощью элемента имитации плохого канала связи система позволяет реализовать взаимодействие по различным типам каналов связи за счет управления дополнительной задержкой и потерями пакетов. Для более универсального типа подключения элементов использован канал подключения по WiFi.

Элементы стенда.

1) *Смартфон* – мобильный телефон Huawei Honor 7C под управлением ОС Android версия 12.4.2.1 и iPhone 12 под управлением ОС IOS версии 15.2 с установленными мобильными приложениями исследуемых систем ВКС.

2) ПК1 и ПК2 – ноутбук под управлением Windows 10 версии 21H2 и MacOS версии 12.2.1 с установленными desktop приложениями систем ВКС.

3) ПКЗ – персональный компьютер под управлением ОС Windows 10 с установленным программным обеспечением имитации плохого канала связи NetDisturb (<https://www.zti-communications.com/netdisturb>) версии 7.0.15.

NetDisturb – это программное обеспечение эмулятора сети (IPv4 и IPv6), генерирующее определяемые пользователем искажения: задержку, джиттер, ограничение пропускной способности, потерю пакетов, дублирование пакетов, изменение содержимого пакета и многое другое.

4) ПК4 – персональный компьютер под управлением ОС Windows 10 с установленным программным обеспечением для захвата и анализа пакетов TamiSoft CommView версии 7.0.

5) *Мониторинговый ответитель* – устройство контроля трафика Net Optics Gig Zero Delay™ Tap. Ответитель 10/100/1000BaseT с нулевой задержкой, обеспечивающий пассивный доступ без помех потоку данных на скоростях 10/100/1000 Мбит/с.

Результаты тестирования

В соответствии с методикой тестирования введены коэффициенты важности тест-кейсов в группах P_0 , P_1 и P_2 (таблица 9–11), а также самих групп (таблица 12). Тест-кейсы на плохих каналах связи имеют больший вес, чем на хороших (задержка не более 100 мс, потери менее 1 %). Это важно для смещения фокуса оценки систем с точки зрения их устойчивости к изменению параметров и типа канала связи.

ТАБЛИЦА 9. Коэффициенты важности тест-кейсов группы P0

TABLE 9. Coefficients of Importance of Test Cases of Group P0

код ТК	P0_1	P0_2	P0_3	P0_4	P0_5	P0_6	P0_7	P0_8
k^{P0}	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,14	0,14	0,22

ТАБЛИЦА 10. Коэффициенты важности тест-кейсов группы P1

TABLE 10. Importance Ratios of test Cases in Group P1

код ТК	P1_1	P1_2	P1_3	P1_4	P1_5	P1_6	P1_7	P1_8
k^{P0}	0,03	0,07	0,12	0,1	0,07	0,03	0,07	0,07
код ТК	P1_9	P1_10	P1_11	P1_12	P1_13	P1_14	P1_15	
k^{P0}	0,1	0,03	0,07	0,03	0,09	0,09	0,03	

ТАБЛИЦА 11. Коэффициенты важности тест-кейсов группы P2

TABLE 11. Importance Ratios of Test Cases in Group P2

код ТК	P2_1	P2_2	P2_3	P2_4	P2_5	P2_6	P2_7	P2_8	P2_9	P2_10	P2_11
k^{P0}	0,15	0,07	0,11	0,07	0,07	0,14	0,07	0,07	0,07	0,11	0,07

ТАБЛИЦА 12. Коэффициенты важности групп тест-кейсов

TABLE 12. Importance Ratios for Groups of Test Cases

группа тест-кейсов	P0	P1	P2
K	$K_{P0} = 0,5$	$K_{P1} = 0,3$	$K_{P2} = 0,2$

Вычисленные средние значения параметра Хёрста в соответствии с выражениями (3–7) для исследуемых систем в заданных диапазонах и весовых коэффициентов важности представлены в таблице 13. Результат ранжирования систем ВКС представлен в таблице 14.

ТАБЛИЦА 13. Средние значения параметра Хёрста

TABLE 13. Average Values of the Hurst Parameter

Система	Cisco WebEx	Zoom	MS Teams	Webinar meetings	DION	TrueConf	Discord
H^{P0}	0,9448	0,9439	0,9315	0,8476	0,9303	0,8981	0,9084
H^{P1}	0,9522	0,9716	0,9387	0,9474	0,9365	0,9284	0,9330
H^{P2}	0,9308	0,9504	0,94	0,94	0,9255	0,8962	0,9162
H	0,9442	0,9535	0,9354	0,8961	0,9312	0,9068	0,9174

ТАБЛИЦА 14. Ранжирование результатов

TABLE 14. Ranking of Results

	Zoom	Cisco WebEx	MS Teams	DION	Discord	TrueConf	Webinar meetings
H	0,95	0,94	0,94	0,93	0,92	0,91	0,90
N	1	2	3	4	5	6	7
R	1	2,5	2,5	4	5	6	7
Позиция	1 место	2 место		3 место	4 место	5 место	6 место

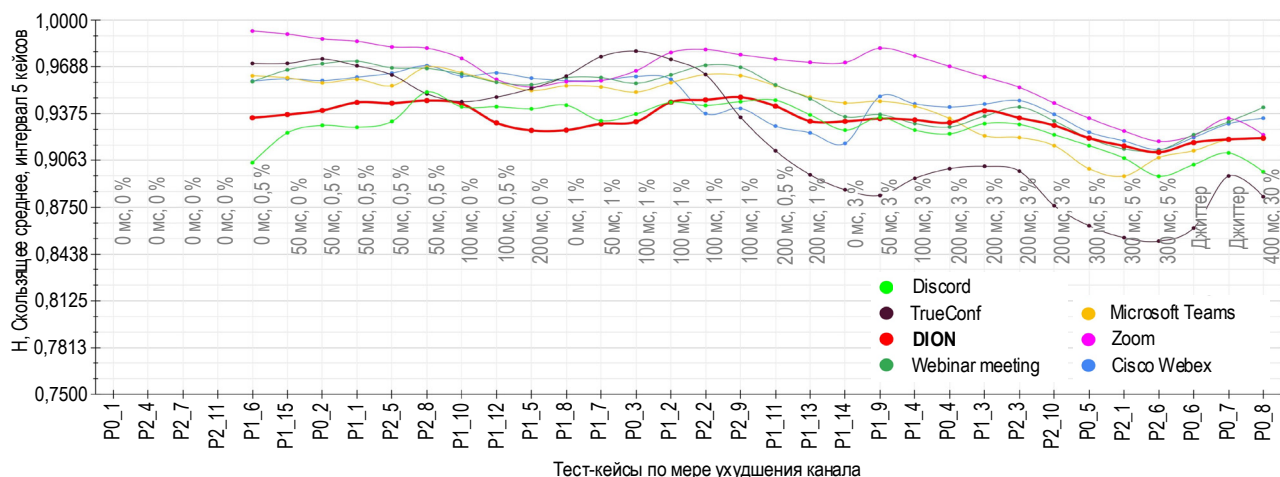


Рис. 5. Зависимость параметра Хёрста от качества канала связи

Fig. 5. The Dependence of the Hurst Parameter on the Quality of the Communication Channel

Анализ результатов показывает, что лучшей системой с точки зрения QoE является Zoom. Второе место поделили между собой Cisco WebEx и MS Teams. DION занял третье место.

Анализ результатов

В целях всесторонней оценки качества рассматриваемых систем ВКС необходимо изучить влияние различных показателей качества.

Для анализа были определены следующие показатели:

- параметр Хёрста (H);
- средняя длина пакетов данных (L);
- зависимость (в том числе взаимная корреляция) H от L ;
- типы используемых приложений.

На рисунке 5 представлена зависимость параметра Хёрста от качества канала связи, при этом тест-кейсы отсортированы по мере ухудшения качества канала. Для сглаживания краткосрочных колебаний с целью определения долгосрочного тренда данный график преобразован через скользящее среднее, где размер «окна» установлен в 5 значений.

Выводы

Во-первых, при ухудшении качества канала связи для всех систем наблюдается общее снижение параметра Хёрста. При этом, система DION при нулевых значениях задержек и потерь пакетов работает около нижней границы оценки параметра Хёрста. В то же время, при больших потерях в каналах связи система DION «проходит» близко к верхней границе. В плохих каналах связи значения параметра Хёрста всех рассматриваемых систем существенно снижаются и по своим значениям приближаются к значению DION.

Во-вторых, система TrueConf уже при небольшом значении потерь и задержек в канале связи имеет самый низкий параметр Хёрста. Это может означать, что данная система в большей степени предназначена для работы только в условиях хороших каналов.

В-третьих, система Zoom имеет наиболее стабильно высокое значение параметра Хёрста при любых каналах связи.

В-четвертых, система DION менее устойчива к переменным значениям качества канала связи (джиттер) (тест-кейсы P0_6 и P0_7), чем остальные системы (рисунок 6а). Особенно это заметно в тест-кейсе P0_7 при использовании мобильного приложения (IOS mobile – IOS mobile).

В-пятых, в тест-кейсе P0_8 (рисунок 6б) были установлены экстремальные значения с очень плохими параметрами канала связи: задержка 400 мс, потери 30 %, изменение содержимого пакетов 20 % со случайными пачками пакетов от 1 до 50 штук. В данном случае видно, что система DION имеет высокий показатель при экстремальных значениях.

Такой показатель достигается за счет получения большего количества пользовательских данных в единицу времени на приемной стороне за

счет использования пакетов небольшой длины. При этом, происходит потеря небольших объемов данных в отличие от других систем. Зависимость изменения средней длины пакета от качества канала связи представлена на рисунке 7.

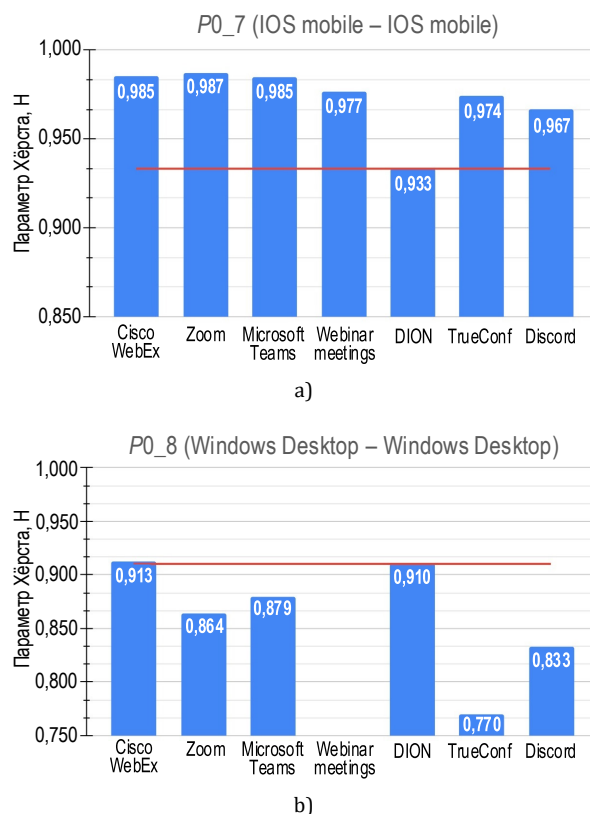


Рис. 6. Параметр Хёрста для ТК с экстремальными значениями качества в каналах: с джиттером (а) и с экстремальными значениями качества (б)

Fig. 6. Hurst Parameter for TC with Extreme Quality Values in Channels: with Jitter (a) and with Extreme Quality Values (b)

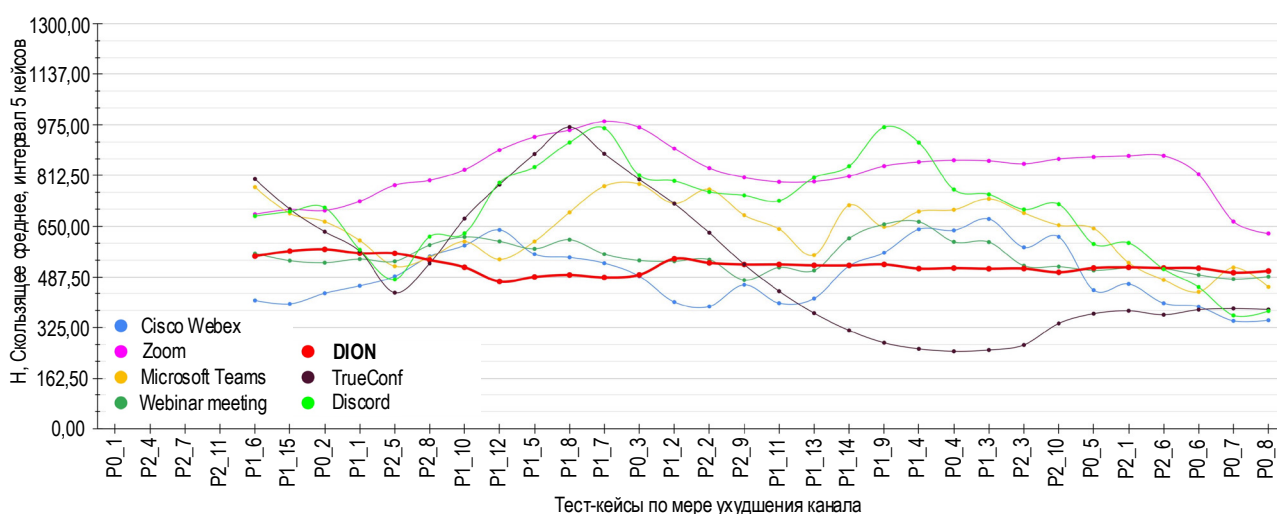


Рис. 7. Зависимость средней длины пакета от качества канала связи (скользящее среднее)

Fig. 7. Dependence of the Average Packet Length on the Quality of the Communication Channel (Moving Average)

Выводы

1) На рисунке 7 видно, что система Zoom во всех тест-кейсах имеет высокий показатель среднего значения длины пакетов, в то время как система TrueConf при плохих характеристиках канала имеет самые малые значения. Система DION на протяжении всего графика имеет равномерную длину пакетов, которая означает, что ухудшение канала не оказывает влияния на этот параметр.

2) При существенном уменьшении длины пакетов значение параметра Хёрста также уменьшается. Например, для системы DION в тест-кейсах P1_12 и P0_7. Также заметно, что на хороших каналах у остальных систем длины выше, что, вероятно, дает повышенный параметр Хёрста, однако, по мере ухудшения качества канала, длины падают и становятся сравнимы с длинами пакетов системы

DION. Вместе с этим, параметр Хёрста падает у других систем сильнее, чем у DION со стабильно небольшой длиной, что непосредственно является преимуществом системы DION на плохих каналах связи.

Для определения зависимости параметра Хёрста от средней длины пакетов использован метод оценки по критерию корреляции Пирсона и регрессионный анализ, а также проведена оценка выбросов в данных методом квартильного анализа. Вычисленные параметры межквартильного диапазона, его «внутренние» и «внешние» границы, а также «значительные выбросы» измерений для исследуемых систем ВКС представлены в таблице 15, где H – параметр Хёрста; L – средняя длина пакета данных; $Q1$ – нижняя квартиль; $Q3$ – верхняя квартиль; IQR – интерквартильный размах.

Таблица 15. Определение выбросов

TABLE 15. Determination of Emissions

Система ВКС	Параметр	Q1	Q3	IQR	внутренняя граница		внешняя граница	
					High	Low	High	Low
Cisco WebEx	H	0,9323	0,9691	0,0369	1,0244	0,8769	1,0798	0,8216
	L	330,5075	601,6	271,0925	1008,2388	-7,1312	1414,8775	-482,77
	Выбросы	незначительные: P1_4, P2_2 значительные: отсутствуют						
Zoom	H	0,9295	0,9872	0,0577	1,0738	0,8430	1,1603	0,7564
	L	717,2050	852,9075	135,7025	1056,4613	513,6513	1260,015	310,0975
	Выбросы	незначительные: P1_12 значительные: P0_7						
Microsoft Teams	H	0,9251	0,9712	0,0461	1,0404	0,856	1,1095	0,7868
2	L	448,14	797,43	349,29	1321,365	-75,795	1845,3	-599,73
	Выбросы	незначительные: P1_3 значительные: отсутствуют						
Webinar meetings	H	0,9344	0,9799	0,0455	1,0480	0,8662	1,1162	0,7981
	L	463,115	628,4375	165,3225	876,4213	215,1313	1124,405	-32,8525
	Выбросы	незначительные: P1_14 значительные: отсутствуют						
DION	H	0,9264	0,9475	0,0211	0,9792	0,8947	1,0109	0,863
	L	500,49	553,4775	52,9875	632,9588	421,0088	712,44	341,5275
	Выбросы	незначительные: P1_6, P1_13, P2_1, P0_7 значительные: P1_12						
TrueConf	H	0,8819	0,9748	0,0929	1,1141	0,7426	1,2534	0,6033
	L	335,2575	757,7275	422,47	1391,4325	-298,4475	2025,1375	-932,1525
	Выбросы	незначительные: отсутствуют значительные: отсутствуют						
Discord	H	0,9098	0,9494	0,0396	1,0089	0,8504	1,0683	0,7909
	L	259,7	1009,59	749,89	2134,425	-865,135	3259,26	-1989,97
	Выбросы	незначительные: P0_8 значительные: отсутствуют						

В целях анализа взаимосвязей и визуализации наличия значительных выбросов в данных необходимо построить диаграммы рассеяния, которые также позволяют определить потенциальную нелинейную взаимосвязь средней длины пакета и параметра Хёрста.

Для исследуемых систем ВКС диаграммы рассеяния представлены на рисунке 8, где красным вы-

делены значительные выбросы, которые необходимо учесть при исследовании корреляции.

Рассчитанные значения коэффициента корреляции Пирсона и оценки статистической значимости представлены в таблице 16 и на рисунке 9, где r_{xy} – коэффициент корреляции; $|t_r|$ – абсолютное значение t -критерия Стьюдента, $t_{\text{крит}}$ – критическое значение t -критерия Стьюдента при уровне значимости $p = 0,05$.

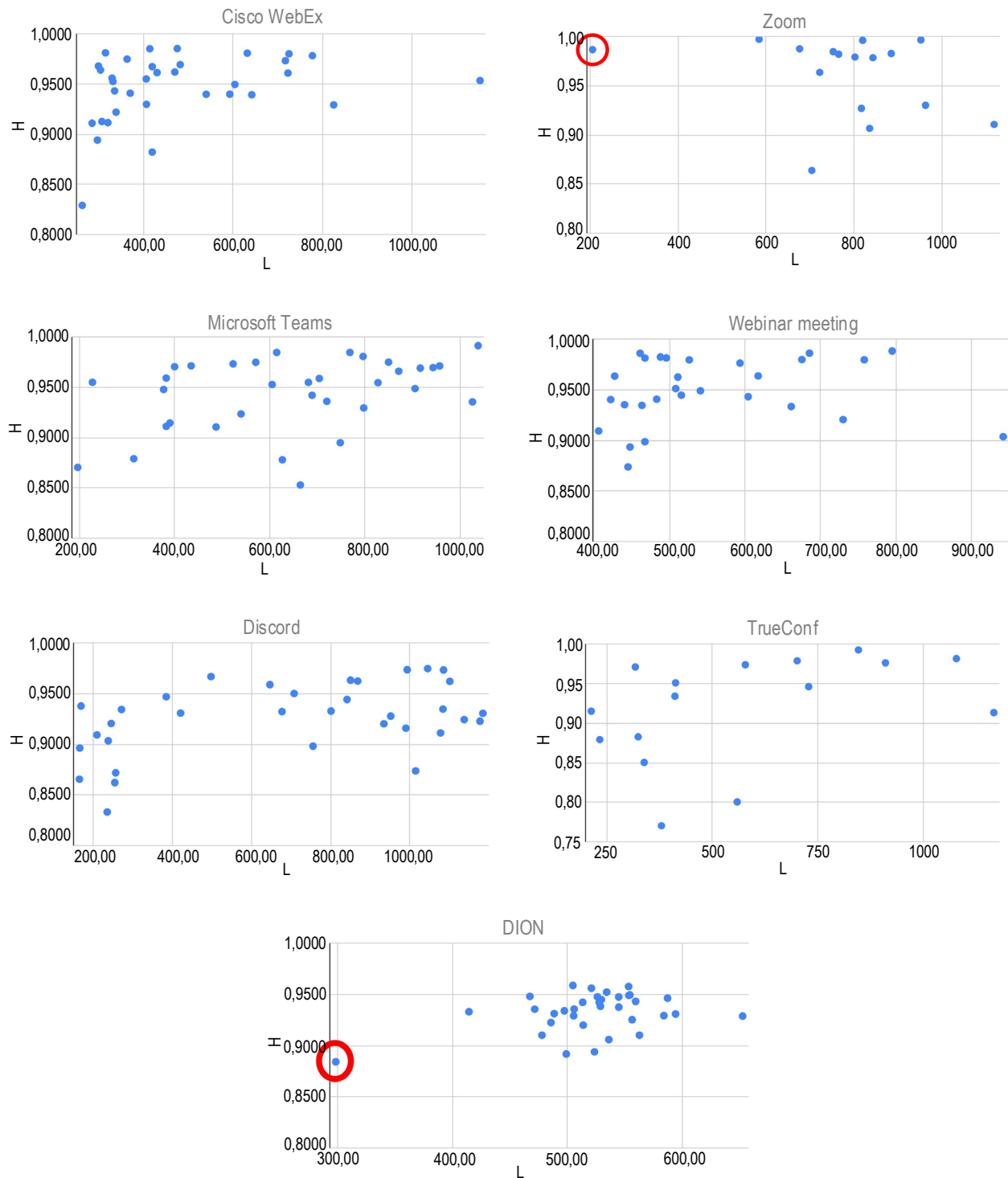


Рис. 8. Диаграммы рассеяния

Fig. 8. Scattering Diagrams

ТАБЛИЦА 16. Значения коэффициента Пирсона и оценки статистической значимости

TABLE 16. Values of the Pearson Coefficient and Estimates of Statistical Significance

Система	Cisco WebEx	Zoom	MS Teams	Webinar meetings	DION	TrueConf	Discord
r_{xy}	0,3104	-0,2423	0,3808	0,1478	0,0896	0,4277	0,4560
$ t_r $	2,653	1,322	3,345	1,0982	0,720	2,591	4,163
$t_{\text{крит}}$	1,997	2,048	1,997	1,163	1,998	2,042	1,997

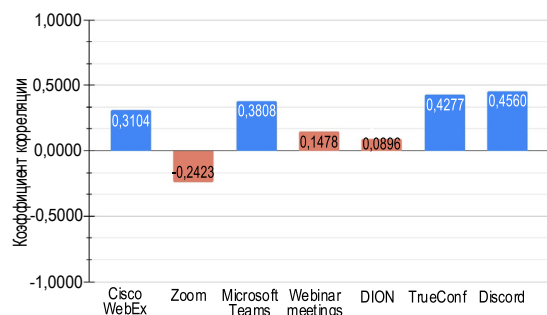


Рис. 9. Коэффициент корреляции Пирсона

Fig. 9. Pearson Correlation Coefficient

Выводы

Во-первых, анализ данных таблицы 16 показывает, что для всех систем, кроме Zoom, Webinar meetings и DION, наблюдаемая корреляционная связь статистически значима при $p < 0,05$, т. е. не случайно отличается от нуля. Для остальных – носит более случайный характер. Также это подтверждается низким значением коэффициента Пирсона. С другой стороны, количество полученных значений для системы Zoom в два раза меньше, чем для остальных. Увеличение числа измерений для Zoom, возможно, изменит эту ситуацию.

Во-вторых, для увеличения значения параметра Хёрста требуется увеличение длин пакетов, кроме системы Zoom, где требуется их уменьшение; это связано с алгоритмами работы систем. Например, для системы Microsoft Teams увеличение длины пакетов оказывает почти такое же влияние на параметр, как и в случае с TrueConf и Cisco WebEx. В то время, как достижение заданного значения параметра потоков данных, формируемых алгоритмами работы DION, никак не зависит от длины пакетов, либо эта зависимость носит случайный характер. Для систем TrueConf и Discord длина пакетов является определяющим фактором при изменении параметра Хёрста.

Для выявления факта наличия корреляционной зависимости параметра Хёрста (H) от средней длины пакета (L), а также ее вида, направления и силы были построены линии регрессии (рисунок 10).

Анализ линий регрессии показывает, что:

1) корреляционная зависимость между параметром Хёрста и средней длиной пакета наблюдается для всех систем, кроме DION, где размеры пакетов колеблются в очень узком диапазоне; это связано с использованием протокола взаимодействия STUN;

2) вид корреляционных зависимостей носит линейный характер;

3) для систем Cisco WebEx, Discord, Microsoft Teams, TrueConf и Webinar meetings наблюдается положительная корреляция между параметром Хёрста и средней длиной пакета (более высоким значениям параметра соответствуют более высокие значения средней длины пакета); для системы Zoom наблюдается отрицательная корреляция;

4) значения тангенса угла между линией регрессии и осью абсцисс характеризует силу корреляционной связи, что также подтверждается коэффициентом корреляции Пирсона (см. рисунок 9).

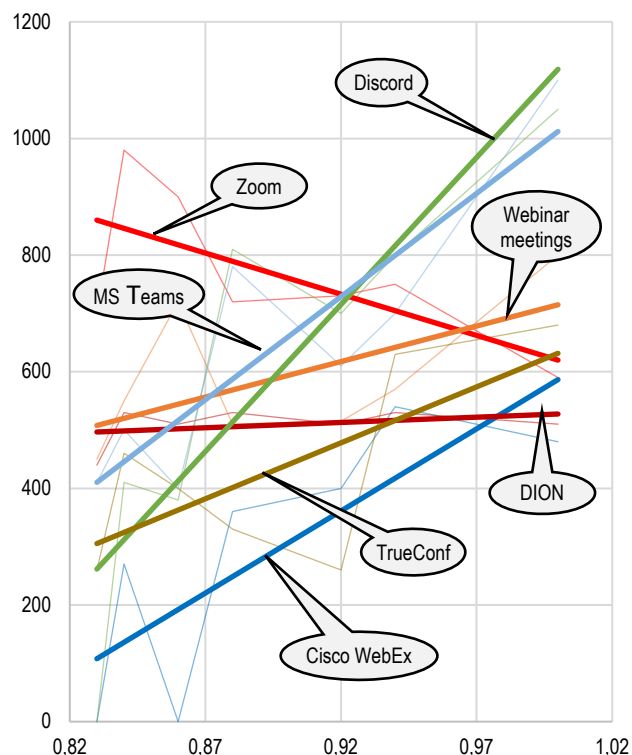


Рис. 10. Линии регрессии (бесплатные подписки)

Fig. 10. Regression Lines (Free Subscriptions)

На рисунке 11 показана зависимость параметра Хёрста от типа приложений. При этом, значение параметра Хёрста усреднено по всем тест-кейсам данной группы приложений.

Выводы

Во-первых, наиболее высокий показатель параметра Хёрста для всех систем наблюдается при использовании мобильных устройств, а именно (IOS mobile – IOS mobile), (IOS mobile – Android mobile), (Android mobile – IOS mobile), (Android mobile – Android mobile). При этом, значение DION находится на своем среднем уровне. Даже при высоких значениях потерь и задержки параметр Хёрста значительно больше именно в тест-кейсах с мобильными приложениями.

Во-вторых, по показателю параметра Хёрста вторым является связь между двумя веб-версиями приложений вне зависимости от ОС.

В-третьих, система DION наиболее стабильна к использованию различных типов приложений. Скорее всего, это достигается за счет использования одинаковых алгоритмов обработки для всех типов приложений; в то время как остальные системы делают упор на использование мобильных приложений.

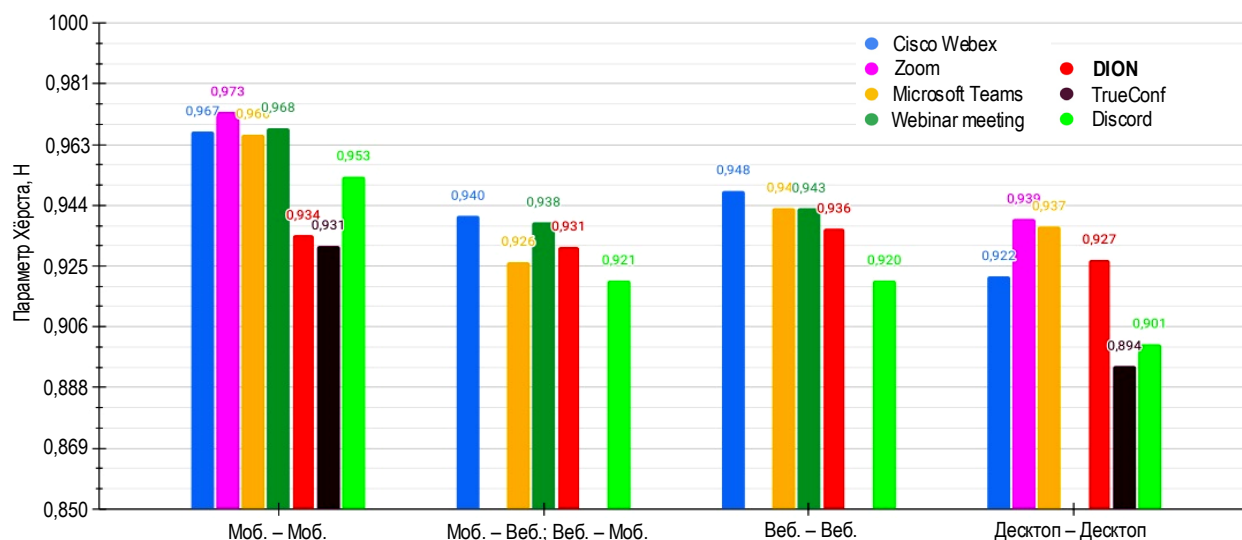


Рис. 11. Зависимость параметра Хёрста от типа приложений

Fig. 11. The Dependence of the Hurst Parameter on the Type of Applications

Заключение

Результаты исследований показали, что приложение DION занимает первое место среди тестируемых отечественных средств ВКС: DION, TrueConf и Webinar meetings, а также третье место среди всех тестируемых приложений. Второе место делят между собой Cisco WebEx и Microsoft Teams. Условно бесплатное приложение Discord занимает четвертое место.

Лидером настоящего исследования можно считать систему Zoom. Вероятная причина ее достаточно стабильной работы заключается в наличии уникальных исследований, защищенных множественным патентами [24], которые направлены на

улучшение сеансов ВКС, пользовательского опыта и самих клиентских приложений. В качестве аудиокодека система Zoom использует кодек SILK с двумя резервными пакетами с частичным резервированием и формат LBRR (аббр. от Low Bit-Rate Redundancy). Фактически это повторение содержимого предыдущих пакетов в последующих по принципу вложенности. Для улучшения пользовательских характеристик систем ВКС необходимы исследования и реализация нестандартных уникальных технических решений в области передачи данных, разработки кодеков (возможно на базе нейронных сетей), а также развитие облачных услуг в части предсказания трафика.

Список источников

1. Rec. ITU-T Q.3949 (08/2012). Real-time multimedia service testing framework at the user-to-network interface of next generation networks.
2. Грачева М.А., Божкова В.П., Казакова А.А., Рожкова Г.И. Субъективная оценка качества статических и видеоизображений: методологический обзор // Сенсорные системы. 2019. Т. 33. № 4. С. 287–304.
3. Ahmed M.S. Achieving QoS in media streaming for peer to peer networks // International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT, Chennai, India, 2016). 2016. PP. 3694–3698. DOI:10.1109/ICEEOT.2016.7755399
4. Bao Y., Lei W., Zhang W., Song J. HD streaming media QoE quantitative evaluation model for multipath transmission // 11th International Conference on Computer Science & Education (ICCSE, Nagoya, Japan, 2016). 2016. PP. 658–665. DOI:10.1109/ICCSE.2016.7581658
5. Fowdur T.P., Narrainen L. Enhanced video streaming using dynamic quality control with bandwidth prediction // International Conference on Computer as a Tool (EUROCON, Salamanca, Spain, 2015). 2015. PP. 1–6. DOI:10.1109/EUROCON.2015.7313675
6. Taraghi B., Nguyen M., Amirpour H., Timmerer C. Intense: In-Depth Studies on Stall Events and Quality Switches and Their Impact on the Quality of Experience in HTTP Adaptive Streaming. IEEE, 2021. Vol. 9. PP. 118087–118098. DOI:10.1109/ACCESS.2021.3107619
7. Yeganeh H., Qassemi F., Rabiee H.R. Joint effect of stalling and presentation quality on the quality-of-experience of streaming videos // IEEE International Conference on Image Processing (ICIP, Beijing, China, 2017). 2017. PP. 310–314. DOI:10.1109/ICIP.2017.8296293
8. Seufert A., Wamser F., Yarish D., Macdonald H., Hoßfeld T. QoE Models in the Wild: Comparing Video QoE Models Using a Crowdsourced Data Set // 13th International Conference on Quality of Multimedia Experience (QoMEX, Montreal, QC, Canada, 2021). 2021. PP. 55–60. DOI:10.1109/QoMEX51781.2021.9465422

9. Hoßfeld T., Heegaard P.E., Skorin-Kapov L., Varela M. No silver bullet: QoE metrics, QoE fairness, and user diversity in the context of QoE management // Ninth International Conference on Quality of Multimedia Experience (QoMEX, Erfurt, Germany, 2017). 2017. PP. 1–6. DOI:10.1109/QoMEX.2017.7965671
10. Mardian R. D., Suryanegara M., Ramli K. Measuring Quality of Service (QoS) and Quality of Experience (QoE) on 5G Technology: A Review // IEEE International Conference on Innovative Research and Development (ICIRD, Jakarta, Indonesia, 2019). 2019. PP. 1–6, DOI:10.1109/ICIRD47319.2019.9074681
11. Hewage C. T. E. R., Ahmad A., Mallikarachchi T., Barman N., Martini M. G. Measuring, Modeling and Integrating Time-Varying Video Quality in End-to-End Multimedia Service Delivery: A Review and Open Challenges. IEEE. 2022. Vol. 10. PP. 60267–60293. DOI:10.1109/ACCESS.2022.3180491
12. Рекомендация МСЭ-Т G.107 (06.2015). Е-модель – вычислительная модель, используемая при планировании передачи.
13. Кучерявый, А.Е., Парамонов А.И., Кучерявый Е.А. Сети связи общего пользования. Тенденции развития и методы расчета. М.: ФГУП ЦНИИС, 2008. 296 с.
14. Rec. ITU-T G.1011 (07/2016). Reference guide to quality of experience assessment methodologies.
15. Шелухин О.И., Осин А.В., Смольский С.М. Самоподобие и фракталы. Телекоммуникационные приложения. М.: Физматлит, 2008.
16. Janevski T., Vanevski Z. Statistical Analysis of Multicast versus Instant Channel Changing Unicast IPTV Provisioning // Proceedings of the 16th Telecommunications Forum (TELFOR, Belgrade, Serbia, 25–27 November 2008). 2008. PP. 96–99.
17. Paramonov P., Tarasov D., Koucheryavy A. The Video Streaming Monitoring in the Next Generation Network // Proceedings of the 9th International Conference on Next Generation Wired/Wireless Networking (NEW2AN 2009) and Second Conference on Internet of Things and Smart Spaces (ruSMART 2009), St. Petersburg, Russia, 15–18 September 2009. Lecture Notes in Computer Science. Vol. 5764. Berlin, Heidelberg: Springer, 2009. PP. 191–205. DOI:10.1007/978-3-642-04190-7_18
18. Rezaul K.M., Pakstas A., Gilchrist R., Chen T.M. HEAF: A Novel Estimator for Long-Range Dependent Self-similar Network Traffic // Proceedings of the 6th International Conference on Next Generation Teletraffic and Wired/Wireless Advanced Networking (NEW2AN 2006), St. Petersburg, Russia, 29 May–2 June 2006. Lecture Notes in Computer Science. Vol. 4003. Berlin, Heidelberg: Springer, 2006. PP. 34–45. DOI:10.1007/11759355_6
19. Маколкина М.А. Взаимосвязь субъективных оценок качества восприятия видео и значений параметра Хёрста // Системы управления и информационные технологии. 2014. 1-1(55). С. 169–172.
20. Маколкина М.А. Учет параметра Хёрста при формировании субъективных оценок качества восприятия видео и значений // Информационные технологии моделирования и управления. 2016. Т. 99. № 3. С. 197–204.
21. Маколкина М.А. Анализ модели объективной оценки качества передачи видео в IP-сетях // Электросвязь. 2011. № 12. С. 20а–23.
22. Куликов С. Тестирование программного обеспечения. Базовый курс. EPAM systems, 2015–2022. URL: https://svyatoslav.biz/software_testing_book_download (дата обращения 09.02.2023)
23. Rec. ITU-T Y.1541 (12/2013). Network performance objectives for IP-based services. Amendment 1: New Appendix XII – Considerations for low speed access networks.
24. Zoom Patents // Zoom. URL: <https://explore.zoom.us/en/trust/patents> (дата обращения 09.02.2023)

References

1. Rec. ITU-T Q.3949. Real-time multimedia service testing framework at the user-to-network interface of next generation networks. December 2012.
2. Gracheva M.A., Bozhkovaa V.P., Kazakovaa A.A. Rozhkovaa G.I. Subjective image and video quality assessment: methodology review. *Sensornye seti*. 2019;33(4):287–304. (in Russ.)
3. Ahmed M.S. Achieving QoS in media streaming for peer to peer networks. *2016 International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT)*. Chennai, India; 2016. pp. 3694–3698. DOI:10.1109/ICEEOT.2016.7755399
4. Bao Y., Lei W., Zhang W., Song J. HD streaming media QoE quantitative evaluation model for multipath transmission. *2016 11th International Conference on Computer Science & Education, ICCSE, Nagoya, Japan*. 2016. p.658–665. DOI:10.1109/ICCSE.2016.7581658
5. Fowdur T.P., Narrainen L. Enhanced video streaming using dynamic quality control with bandwidth prediction *IEEE EUROCON 2015 – International Conference on Computer as a Tool, EUROCON, Salamanca, Spain*. 2015. p.1–6. DOI:10.1109/EUROCON.2015.7313675
6. Taraghi B., Nguyen M., Amirpour H., Timmerer C. Intense: In-Depth Studies on Stall Events and Quality Switches and Their Impact on the Quality of Experience in HTTP Adaptive Streaming. *IEEE*; 2021. vol.9. p.118087–118098. DOI:10.1109/ACCESS.2021.3107619
7. Yeganeh H., Qassemi F., Rabiee H.R. Joint effect of stalling and presentation quality on the quality-of-experience of streaming videos. *2017 IEEE International Conference on Image Processing, ICIP, Beijing, China*. 2017. p.310–314. DOI:10.1109/ICIP.2017.8296293
8. Seufert A., Wamser F., Yarish D., Macdonald H., Hoßfeld T. QoE Models in the Wild: Comparing Video QoE Models Using a Crowdsourced Data Set. *2021 13th International Conference on Quality of Multimedia Experience, QoMEX, Montreal, Canada*. 2021. p.55–60. DOI:10.1109/QoMEX51781.2021.9465422
9. Hoßfeld T., Heegaard P.E., Skorin-Kapov L., Varela M. No silver bullet: QoE metrics, QoE fairness, and user diversity in the context of QoE management. *2017 Ninth International Conference on Quality of Multimedia Experience, QoMEX, Erfurt, Germany*. 2017. p.1–6. DOI:10.1109/QoMEX.2017.7965671


10. Mardian R.D., Suryanegara M., Ramli K. Measuring Quality of Service (QoS) and Quality of Experience (QoE) on 5G Technology: A Review. *2019 IEEE International Conference on Innovative Research and Development, ICIRD, Jakarta, Indonesia*. 2019. p.1–6. DOI:10.1109/ICIRD47319.2019.9074681
11. Hewage C.T.E.R., Ahmad A., Mallikarachchi T., Barman N., Martini M.G. Measuring, Modeling and Integrating Time-Varying Video Quality in End-to-End Multimedia Service Delivery: A Review and Open Challenges. *IEEE*. 2022. vol. 10. pp. 60267–60293. DOI:10.1109/ACCESS.2022.3180491
12. Rec. ITU-T G.107. *International Telephone Connections and Circuits – Transmission Planning and the E-Model*. June 2015.
13. Koucheryavy A., Paramonov A., Koucheryavy E. Public Communication Networks. Development Trends and Calculation Methods. Moscow: Central Research Institute of Communication Publ.; 2008. (in Russ.)
14. Rec. ITU-T G.1011. *Reference guide to quality of experience assessment methodologies*. June 2016.
15. Shelukhin O.I., Osin A.V., Smolsky S.M. *Self-Similarity and Fractals. Telecommunication Applications*. Moscow: Fizmatlit Publ.; 2008. (in Russ.)
16. Janevski T., Vanevski Z. Statistical Analysis of Multicast versus Instant Channel Changing Unicast IPTV Provisioning. *Proceedings of the 16th Telecommunications Forum, TELFOR, 25–27 November 2008, Belgrade, Serbia*. 2008. p.96–99.
17. Paramonov P., Tarasov D., Koucheryavy A. The Video Streaming Monitoring in the Next Generation Network. *Proceedings of the 9th International Conference on Next Generation Wired/Wireless Networking, NEW2AN 2009, and Second Conference on Internet of Things and Smart Spaces, ruSMART 2009, 15–18 September 2009, St. Petersburg, Russia. Lecture Notes in Computer Science, vol.5764*. Berlin, Heidelberg: Springer; 2009. p.191–205. DOI:10.1007/978-3-642-04190-7_18
18. Rezaul K.M., Pakstas A., Gilchrist R., Chen T.M. HEAF: A Novel Estimator for Long-Range Dependent Self-similar Network Traffic. *Proceedings of the 6th International Conference on Next Generation Teletraffic and Wired/Wireless Advanced Networking, NEW2AN 2006, 29 May–2 June 2006, St. Petersburg, Russia. Lecture Notes in Computer Science, vol.4003*. Berlin, Heidelberg: Springer; 2006. p.34–45. DOI:10.1007/11759355_6
19. Makolkina M.A. The Relationship between Subjective Assessments of the Quality of Video Perception and the Values of the Hurst Parameter. *Sistemy upravleniia i informatsionnye tekhnologii*. 2014;1-1(55):169–172. (in Russ.)
20. Makolkina M. Parameter Values Hurst in Subjective Evaluations of the Quality of the Relationship of Perception and Video. *Informatsionnye tekhnologii modelirovaniia i upravleniia*. 2016;99(3):197–204. (in Russ.)
21. Makolkina M.A. Analysis of the Model for an Objective Assessment of the Quality of Video Transmission in IP Networks. *Electrosvyaz*. 2011;12:20–23. (in Russ.)
22. Kulikov S. *Software Testing. Basic Course*. EPAM systems; 2015–2022. (in Russ.) URL: https://svyatoslav.biz/software_testing_book_download [Accessed 9th February 2023]
23. Rec. ITU-T Y.1541. *Network performance objectives for IP-based services. Amendment 1: New Appendix XII – Considerations for low speed access networks*. December 2013.
24. Zoom. Zoom Patents. URL: <https://explore.zoom.us/en/trust/patents> [Accessed 9th February 2023]

Статья поступила в редакцию 13.02.2023; одобрена после рецензирования 27.02.2023; принята к публикации 28.02.2023.


The article was submitted 13.02.2023; approved after reviewing 27.02.2023; accepted for publication 28.02.2023.

Информация об авторах:


КИРИЧЕК
Руслан Валентинович

доктор технических наук, доцент, ректор Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича,
 <https://orcid.org/0000-0002-8781-6840>


БЕРЁЗКИН
Александр Александрович

кандидат технических наук, доцент кафедры программной инженерии и вычислительной техники Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича,
 <https://orcid.org/0000-0002-1748-8642>

КУКУНИН
Дмитрий Сергеевич

кандидат технических наук, доцент кафедры сетей связи и передачи данных Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича,
 <https://orcid.org/0000-0002-2674-5217>

КОЛЕСНИКОВ
Андрей Вячеславович

директор Ассоциации участников рынка интернета вещей,
 <https://orcid.org/0009-0000-8401-8723>