

ОТЧЕТ

**«Разработка рекомендаций по
требованиям к качеству обслуживания в
условиях его деградации при перегрузках,
вызываемых пандемией, с целью
обеспечения устойчивого
функционирования сетей связи»**

Содержание

Введение	5
1 Анализ и классификация параметров функционирования сети, на которые оказывает влияние перегрузка сети связи вследствие пандемии и подобных явлений	5
1.1 Параметры функционирования сети связи	5
1.2 Влияние перегрузки на сети связи вследствие пандемии и подобных явлений	7
1.2.1 Перегрузка сети.....	7
1.2.2 Анализ влияния трафика на показатели функционирования сети связи	8
1.3 Выводы	20
2 Анализ спектра услуг сетей связи общего пользования и определение перечня услуг, трафик которых подвергается наибольшему изменению в период пандемии и подобных явлений	21
2.1 Анализ спектра услуг сетей связи общего пользования	21
2.2 Анализ услуг, трафик которых подвергается наибольшему изменению в период пандемии и подобных явлений	22
2.2.1 Анализ роста трафика в условиях пандемии.....	22
2.2.2 Исследования роста трафика в сетях беспроводного доступа в России	29
2.2.3 Анализ роста трафика услуг видеоконференцсвязи	32
2.2.4 Анализ свойств трафика видеоконференцсвязи	34
2.3 Выводы	41
3 Оценка допустимых численных характеристик деградации качества обслуживания в период пандемии и подобных явлений	43
3.1 Оценка деградации параметров качества функционирования в условиях роста трафика, вызванного внешними факторами.....	44
3.2 Допустимые численные характеристики деградации качества обслуживания в период пандемии и подобных явлений	49
3.2.1 Анализ требований к значениям сетевых параметров.....	49
3.3 Допустимые численные характеристики деградации качества обслуживания в период пандемии и подобных явлений	51
4 Рекомендации по улучшению качества обслуживания в условиях пандемии и подобных явлений на основе перспективных технологий сетей связи шестого поколения и сетей связи 2030.	53
Заключение	55
Список литературы	57

Перечень рисунков и таблиц

Таблицы

Таблица 1.1 – Параметры функционирования сети связи	6
Таблица 1.2 – Нормативные значения показателей функционирования	7
Таблица 2.1 – Прирост трафика по данным статистики	29
Таблица 2.2 – Значения параметров модели	31
Таблица 2.3 – Значения параметров модели	36

Таблица 2.4 – Значения параметров модели	39
Таблица 2.5 – Значения параметров модели	41
Таблица 3.1 – Зависимость коэффициента изменения задержки и величины задержки (при начальном значении 50мс) и различных начальных значениях использования канала	46
Таблица 3.2 – Зависимость коэффициента изменения потерь и вероятности потерь пакетов (при начальном значении $1 \cdot 10^{-6}$) и различных начальных значениях использования канала	49
Таблица 3.3. Рекомендуемые минимальные значения параметров транспортного уровня для выполнения QoE для услуги SDTV при кодировании MPEG-2	49
Таблица 3.4. Рекомендуемые минимальные значения параметров транспортного уровня для выполнения QoE для услуги SDTV при кодировании MPEG-4 AVC или VC-1	50
Таблица 3.5. Рекомендуемые минимальные значения параметров транспортного уровня для выполнения QoE для услуги HDTV при кодировании MPEG-2	50
Таблица 3.6. Рекомендуемые минимальные значения параметров транспортного уровня для выполнения QoE для услуги HDTV при кодировании MPEG-4 AVC или VC-1	50
Таблица 3.7 – Допустимые значения параметров функционирования при влиянии аномальных факторов	52

Рисунки

Рисунок 1.1 - Примеры АКФ для потоков с БУЗ и МУЗ	10
Рисунок 1.2 - Зависимость нормализованной дисперсии от интервала агрегирования для простейшего потока $H \approx 0,5$	12
Рисунок 1.3 – Модель маршрута в сети связи	13
Рисунок 1.4 – Зависимость коэффициента изменения задержки доставки пакетов при росте трафика	17
Рисунок 1.5 – Зависимость коэффициента изменения задержки доставки пакетов при росте трафика для различных значений δ	18
Рисунок 1.6 – Зависимость коэффициента изменения потерь пакетов при росте интенсивности трафика	19
Рисунок 2.1 – Прирост пропускной способности IXP	23
Рисунок 2.2 – Прирост пропускной способности	24
Рисунок 2.3 – Изменение профиля суточного трафика	25
Рисунок 2.4 – Изменение трафика сети Интернет в мире в период пандемии	26
Рисунок 2.5 – Изменение трафика сети Интернет в США в период пандемии	26
Рисунок 2.6 – Изменение трафика сети Интернет в США в период пандемии ((нисходящий канал – downstream)	27
Рисунок 2.7 – Изменение трафика сети Интернет в США в период пандемии (восходящий канал - upstream)	27
Рисунок 2.8 – Изменение трафика сети Интернет в странах Латинской Америки в период пандемии	28
Рисунок 2.9 – Изменение трафика сети Интернет в европейских странах в период пандемии	28
Рисунок 2.10 – Гистограмма интенсивности кадров	30
Рисунок 2.11 – Эмпирическая плотность вероятности интенсивности кадров (2017 год) ...	31
Рисунок 2.12 – Рост количества активных пользователей Zoom в день	32
Рисунок 2.13 – Рост числа активных пользователей Google Meet в день	33

Рисунок 2.14 – Рост использования услуг для удаленной работы, в том числе и видеоконференцсвязи.....	34	D
Рисунок 2.15 – Реализация трафика видеоконференцсвязи Zoom.....	35	D
Рисунок 2.16 – Эмпирическая гистограмма размера пакета потока трафика видеоконференцсвязи Zoom.....	36	D
Рисунок 2.17 – Оценка параметра Хёрста методом анализа дисперсии	37	D
Рисунок 2.18 – Реализация трафика видеоконференцсвязи Google Meet	38	D
Рисунок 2.19 – Эмпирическая гистограмма и функция плотности вероятности для интервалов времени между пакетами потока трафика видеоконференцсвязи Google Meet	38	D
Рисунок 2.20 – Эмпирическая гистограмма размера пакета потока трафика видеоконференцсвязи Google Meet.....	39	D
Рисунок 2.21 – Оценка параметра Хёрста методом анализа дисперсии	40	D
Рисунок 3.1 – Коэффициент изменения величины задержки при увеличении интенсивности трафика от 0 до 50%.....	45	D
Рисунок 3.2 – Изменение величины задержки при увеличении интенсивности трафика от 0 до 50%	46	D
Рисунок 3.3 – Зависимость коэффициент изменения вероятности потерь при изменении интенсивности трафика от 0 до 50%.....	47	D
Рисунок 3.4 – Изменение вероятности потерь пакетов при увеличении интенсивности трафика от 0 до 50%.....	48	D
Рисунок 3.5. Зависимость QoE от совокупности задержки и потерь	51	D

Введение

В отчете по научно-исследовательской работе “Разработка рекомендаций по требованиям к качеству обслуживания в условиях его деградации при перегрузках, вызываемых пандемией, с целью обеспечения устойчивого функционирования сетей связи” на основе анализа рекомендаций и проектов рекомендаций Сектора стандартизации электросвязи Международного союза электросвязи (МСЭ-Т), а также научно-исследовательских достижений, отраженных в публикациях в журналах и на конференциях высокого уровня за последние пять лет разработаны рекомендации по требованиям к качеству обслуживания в условиях перегрузок сети, вызванных пандемией и подобными явлениями.

С этой целью были проанализированы и классифицированы основные параметры функционирования сети, на которые оказывает влияние перегрузка сети связи вследствие пандемии и подобных явлений.

В процессе выполнения научно-исследовательской работы были проанализированы Рекомендации МСЭ-Т серии E и приведены характеристики допустимого снижения качества обслуживания телефонной сети связи общего пользования в соответствии с этими рекомендациями. Был проведен масштабный анализ статистических данных по функционированию сетей связи в период пандемии и при введении мер по борьбе с коронавирусной инфекцией.

В отчете приведены результаты анализа существующего спектра услуг сетей связи общего пользования и определен перечень услуг, трафик которых подвергается наибольшим изменениям в период пандемии и подобных явлений.

По результатам исследований определены допустимые численные характеристики деградации качества обслуживания в период пандемии и подобных явлений и рекомендовано на их базе разработать рекомендации МСЭ-Т.

Кроме того, в отчете приведены рекомендации по новым услугам для пользователей, которые могут обеспечить улучшение качества обслуживания пользователей в условиях пандемии и подобных явлений на основе перспективных технологий сетей связи шестого поколения и сетей связи 2030.

1 Анализ и классификация параметров функционирования сети, на которые оказывает влияние перегрузка сети связи вследствие пандемии и подобных явлений

1.1 Параметры функционирования сети связи

Под параметрами функционирования сети связи буде понимать технические параметры [12, 13], характеризующие качество предоставления услуг связи. Согласно ряду документов в качестве таких параметров принято рассматривать вероятностные и временные

параметры. Перечень параметров функционирования определен в рекомендации [12], в него входят параметры, приведенные в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Параметры функционирования сети связи

Группа параметров	Наименование	Обозначение, согласно ITU-T Y.1541
Временные параметры	Средняя задержка доставки пакета	IPTD
	Вариация задержки доставки пакета	IPDV
Вероятностные параметры	Коэффициент потерь пакетов	IPLR
	Коэффициент пакетов с ошибками	IPER

Задержка доставки пакета определяется как интервал времени между моментом начала передачи пакета через сеть связи от устройства А до момента окончания приема пакета устройством В.

Задержка доставки пакета включает в себя задержки на всех этапах передачи пакета, основными из которых являются: задержка на передачу пакета (кадра) по линии связи, задержка на ожидание в узле связи, задержка на обработку в узле связи и задержка на распространение электромагнитного или оптического сигнала по линии связи на каждом из участков маршрута доставки.

Ввиду того, что все или часть из перечисленных составляющих случайны, то задержка доставки пакета также случайна.

Средняя задержка доставки пакета – это величина, полученная путем усреднения задержек доставки пакетов на достаточно большой выборке. Именно данная величина используется как параметр качества функционирования сети связи.

Вариация задержки доставки пакета характеризует разброс задержки доставки пакета как разброс значений случайной величины. Согласно рекомендации [12] она определяется как 0,001 квантиль распределения времени доставки пакета.

Коэффициент потерь пакетов определяется как доля пакетов, не доставленных получателю из общего числа отправленных пакетов на достаточно большой выборке пакетов.

Потери пакетов в сетях связи могут возникать по двум основным причинам: из-за помех и прочих деструктивных факторов в линиях связи, приводящих к невозможности приема пакета на стороне получателя, и из-за переполнения буфера в каком-либо узле связи (перегрузка) на маршруте доставки, в результате чего поступающий пакет отбрасывается (стирается). Первый тип потерь зависит от технических особенностей построения линий связи, а второй от параметров трафика. Далее при рассмотрении показателей качества при анализе коэффициента потерь будет подразумеваться второй тип потерь.

Коэффициент пакетов с ошибками определяется как доля пакетов, принятых получателем с ошибками из общего количества отправленных пакетов, на достаточно большой выборке. Основной причиной возникновения ошибок является воздействие на полезный сигнал помех в канале связи, что приводит к искажению передаваемых данных. Возможны и иные

причины, например, ошибки и сбои программного обеспечения в узлах связи, возникновение ошибок в оперативной памяти и т.д.

Пропускная способность. Следует также отметить такой параметр функционирования сети связи как пропускная способность [16], который определен в этих документах как максимально достижимая скорость передачи данных, при которой не происходит потерь пакетов. В данной работе несколько уточним это определение и будем понимать под пропускной способностью достижимую скорость передачи, при которой значения показателей качества функционирования, приведенных в таблице 1, не превышают заданных пороговых значений.

Величина пороговых значений может быть различна, в зависимости от требований к качеству со стороны реализуемых услуг. Для наиболее популярных услуг передачи речи, звука, изображений, видео, файлов, электронной почты, веб-серфинга эти значения могут быть определены из [12].

1.2 Влияние перегрузки на сети связи вследствие пандемии и подобных явлений

1.2.1 Перегрузка сети

Перегрузка сети – такое состояние сети, при котором показатели качества ее функционирования снижаются ниже нормативных значений. Это состояние может быть вызвано как изменением (возрастанием) интенсивности производимого пользователями трафика, так и выходом из строя части оборудования или сбоев программного обеспечения сети, или в результате принятия некоторых (ошибочных) решений по управлению сетью. В последнем случае перегрузка является следствием технических или организационных проблем оператора, а в первом случае следствием влияния внешних факторов.

В данном отчете под перегрузкой сети будем понимать такие условия функционирования, при которых параметры производимого пользователями трафика превышают те значения, при которых обеспечивается выполнение норм качества обслуживания, т.е. когда значения параметров функционирования превышают установленные нормативные значения под действием внешних факторов.

В соответствии с существующими требованиями [12] к качеству функционирования сетей связи установлены следующие нормативные значения на параметры функционирования, приведенные в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Нормативные значения показателей функционирования

Параметр функционирования	Ед. измерения	Класс обслуживания					
		0	1	2	3	4	5
IPTD	мс	100	400	100	400	1000	-
IPDV	мс	50	50	-	-	-	-
IPLR	-	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	-
IPER	-	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	-

Требования к нормативным значениям определены для пяти классов обслуживания. Наиболее жесткие требования предъявляются к классу 0, к которому относятся потоковые интерактивные услуги, которые будут представлены далее.

Ниже будет приведен анализ влияния параметров трафика на показатели качества функционирования.

Следует отметить, что такой показатель как доля пакетов с ошибками не является определяющим при оценке влияния роста интенсивности трафика. Поскольку величина IPER в наибольшей степени определяется функционированием линий передачи и протоколов канального уровня, то его величина в наименьшей степени зависит от таких факторов как перегрузка.

Основными параметрами функционирования, которые в наибольшей степени влияют на качество обслуживания и качество восприятия услуг являются IPTD и IPLR. В отчете для этих параметров будут приведены модели, позволяющие оценить их зависимость от параметров трафика.

1.2.2 Анализ влияния трафика на показатели функционирования сети связи

1.2.2.1 Модель трафика

Трафик в сети связи представляет собой случайный поток пакетов данных, который чаще всего описывают случайным процессом (поток), свойства которого зависят от характера поступления пакетов.

При описании трафика чаще всего оперируют такими параметрами как интенсивность пакетов λ (пакетов/с), интенсивность трафика a (бит/с) и размер пакетов данных L (байт). Как правило под этими параметрами понимают средние значения интенсивности и размера пакета.

Для представления трафика используют методы описания случайных процессов. Вероятностные свойства случайного потока пакетов характеризуют: распределением интервалов времени между моментами поступления пакетов, распределением количества пакетов, поступающих за интервал времени, автокорреляционной функцией потока.

Часто для расширения представлений о случайном процессе описывают фрактальные свойства трафика с использованием параметра Хёрста.

Функция распределения интервалов времени между пакетами $F(\tau)$ характеризует свойства потока. В теории телетрафика [4, 5] приводится ряд моделей случайных потоков, для которых определены конкретные виды этой функции и могут быть получены конечные аналитические модели. Это модель простейшего потока, потока Эрланга и некоторые другие.

Например, для простейшего потока распределение интервалов времени между пакетами определяется экспоненциальным распределением:

$$F(\tau) = 1 - e^{-\lambda\tau} \quad (1.1)$$

Автокорреляционная функция потока и самоподобие трафика. Исследования трафика передачи данных направлены на изучение свойств потоков и методов их обслуживания с определенным уровнем качества. В ряде работ показано, что свойства трафика передачи данных, в частности трафика Интернет, имеют характерные особенности, которые отличают его, например, от трафика телефонной сети общего пользования (от модели

простейшего потока). Трафик различных услуг, таких как передача видео, звука и речи, также может иметь свои особенности потоковых характеристик. Доминирование какого-либо из видов трафика в агрегированном потоке может изменять свойства этого потока, что в свою очередь, может быть причиной изменения качества обслуживания. Оценок времени доставки пакета (IPTD) и ее разброса (IPDV) может оказаться недостаточно для полноты описания условий обслуживания абонентского трафика. Параметры сети связи, такие как пропускная способность (скорость передачи данных), размеры буферов, пропускная способность узлов сети выбираются с помощью методов теории массового обслуживания, которые справедливы для некоторой модели трафика. Таким образом, возможны изменения некоторых характеристик потока при сохранении таких параметров как IPTD и IPDV, которые, тем не менее, приведут к изменению качества обслуживания трафика. Поэтому, целесообразно рассмотреть возможность использования дополнительных характеристик трафика, позволяющих более полно представить условия предоставления услуги.

При изучении случайных потоков и в исследованиях трафика передачи данных для характеристики потока принято использовать автокорреляционную функцию потока.

Автокорреляционная функция (АКФ) характеризует связь между значениями одного и того же случайного процесса в разнесенные моменты времени. В общем случае АКФ характеризует внутреннюю зависимость между временным рядом и тем же рядом, но сдвинутым на некоторый промежуток (сдвиг) времени, который называется лагом.

Вычисления АКФ проводятся по классической формуле:

$$r(k) = \frac{\sum_{i=1}^{N-k} (X_i - \bar{X})(X_{i+k} - \bar{X})}{(N-k)\sigma^2} \quad (1.2)$$

где

X_i - в данном случае это объем передаваемых данных за интервал.

$$\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i \text{ - выборочное среднее;}$$

N - объем выборки.

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2}{N-1} \text{ - выборочная дисперсия.}$$

В практике исследований потоков данных принято различать процессы с быстро и медленно убывающей автокорреляционной функцией (БУЗ и МУЗ соответственно). Быстро убывающие АКФ характерны для потоков со свойствами близкими к свойствам простейшего потока. Медленно убывающая АКФ говорит о том, что свойства потока отличаются от свойств простейшего потока. Примеры АКФ для потоков БУЗ и МУЗ приведены на рисунке 1.1.

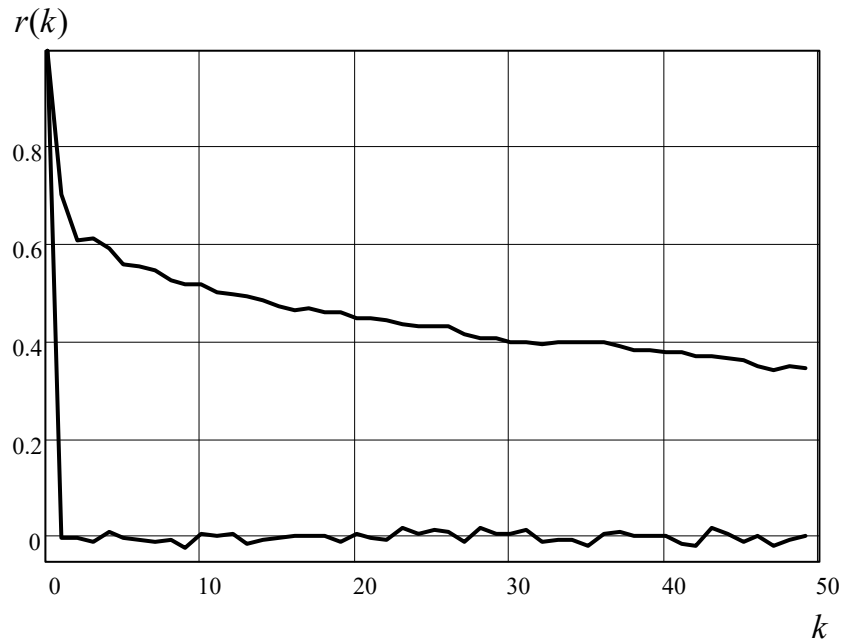


Рисунок 1.1 - Примеры АКФ для потоков с БУЗ и МУЗ

Результаты исследования показывают, что трафику в сетях передачи данных характерны медленно убывающие зависимости АКФ.

При этом специфика потоков в реальных сетях обусловлена как дисциплиной обслуживания с ожиданием, так и применением различных алгоритмов передачи (протоколов), которые вводят детерминированные правила обслуживания. В ряде исследовательских работ показано, что трафик в сети передачи данных не только отличается от базовых теоретических моделей, но и обладает определенными свойствами, позволяющими ввести дополнительные характеристики, позволяющие давать более точное его описание. В настоящее время при описании трафика часто применяют понятие самоподобия. Теория оценки самоподобия трафика основана на использовании теории фракталов.

Определение самоподобия дается через автокорреляционную функцию. Пусть процесс задан последовательностью $X = (X_1, X_2, \dots, X_t, \dots)$ где $t = 1, 2, \dots$

Его автокорреляционная функция определяется выражением (4.90)

Под агрегированным процессом понимается процесс, заданный последовательностью, элементы которой получены их элементов исходного процесса путем усреднения по блокам из m последовательных элементов.

Агрегированный процесс по блокам длины m

$$X^{(m)} = (X_1^{(m)}, X_2^{(m)}, \dots, X_t^{(m)}, \dots) \quad (1.3)$$

где

$$X_t^{(m)} = \frac{1}{m} (X_{tm-m+1} + \dots + X_{tm}) \quad (1.4)$$

его автокорреляционная функция

$$r_m(k)$$

Процесс X называется строго самоподобным в широком смысле, если

$$r_m(k) = r(k) \quad \text{где } m = 2, 3, \dots$$

Иными словами, процесс строго самоподобен в широком смысле, если при его агрегировании по блокам любой длины автокорреляционные функции исходного процесса и агрегированных процессов равны, т.е. коэффициент корреляции не изменяется при усреднении по блокам.

Процесс X называется асимптотически самоподобным

$$\text{если } \lim_{m \rightarrow \infty} r_m(k) = g(k) \quad (1.5)$$

т.е. при усреднении по блокам $m \rightarrow \infty$ он сходится к самоподобному.

Процесс X называется строго самоподобным в узком смысле, если

$$m^{1-H} X^{(m)} \stackrel{\cdot}{=} X \quad (1.6)$$

где H - коэффициент Хэрста

Самоподобие в узком смысле означает, что функции распределения исходного и агрегированных процессов одинаковы, а степень самоподобия характеризуют коэффициентом Хэрста.

Из сказанного следует, что для дисперсий процессов

$$D(X^{(m)}) = m^{2(H-1)} D(X) \quad (1.7)$$

Выразим H через

$$\ln\left(\frac{D(X^{(m)})}{D(X)}\right) = (2H - 2)\ln(m) \quad (1.8)$$

Здесь $2H - 2$ имеет геометрический смысл коэффициента наклона прямой, аппроксимирующей функцию

$$\ln\left(\frac{D(X^{(m)})}{D(X)}\right) = f(\ln(m)) \quad (1.9)$$

Используя для оценки степени самоподобия выражение для модели простейшего потока получим зависимость, приведенную на рисунке 1.2.

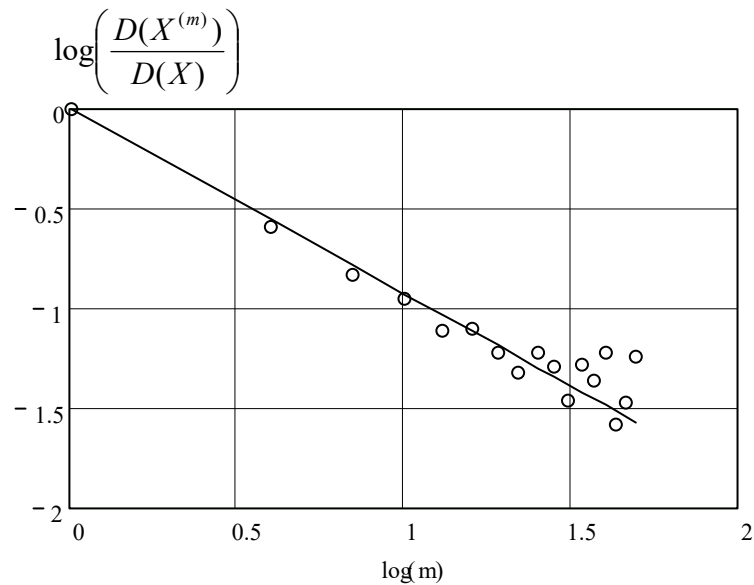


Рисунок 1.2 - Зависимость нормализованной дисперсии от интервала агрегирования для простейшего потока $H \approx 0,5$.

Многочисленные исследования показывают, что в большинстве случаев трафик в современных сетях связи обладает свойствами самоподобия, а типовые значения параметра Хёрста лежат в пределах от 0,6 до 0,8.

Коэффициенты вариации (дисперсии) интервалов времени между пакетами и размеров пакетов (времени передачи пакетов). Разброс этих параметров, характеризуемый дисперсиями или коэффициентами вариации имеет важное значение при моделировании обслуживания трафика. Большинство известных моделей, описывающих зависимости параметров функционирования от свойств трафика, учитывают эти параметры. В частности, для модели простейшего потока коэффициент вариации интервалов времени между пакетами равен единице, но для самоподобных потоков чаще всего его значение превышает единицу.

1.2.2.2 Модель обслуживания

Доставка данных от отправителя к получателю через сеть связи в общем случае производится по маршруту, состоящему из нескольких участков, состоящих из узлов и линий связи. Для оценки параметров функционирования модель маршрута может быть описана многофазной системой массового обслуживания, рисунок 1.3. На рисунке $n_1 \dots n_k$ – узлы связи, l_1, \dots, l_k – линии связи.

При допущении, что отдельные участки сети независимы, каждый из них может быть описан системой $G/G/1/k$.

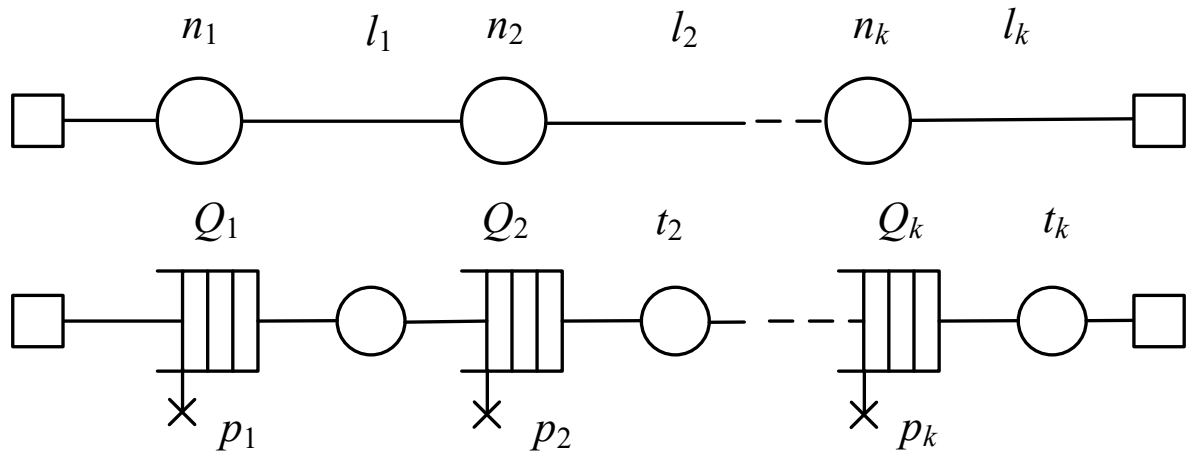


Рисунок 1.3 – Модель маршрута в сети связи

Средняя величина задержки на ожидание в узле сети, при ряде допущений может быть описана выражением [4] (модель G/G/1)

$$\bar{W} = \frac{\rho \bar{t}}{2(1-\rho)} \varepsilon_k \quad (1.10)$$

где ρ - интенсивность нагрузки на линию связи;

\bar{t} – среднее время занятия линии связи передачей пакета (с);

ε_k - фактор формы [4], величина, зависящая от параметров трафика.

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu} = \lambda \bar{t} \quad (1.11)$$

где λ - интенсивность пакетов (пакетов/с);

μ - интенсивность обслуживания (пакетов/с).

Через параметры трафика эти величины могут быть выражены как

$$\lambda = \frac{\bar{a}}{L} \text{ пакетов/с} \quad (1.12)$$

где \bar{a} – средняя интенсивность трафика (бит/с);

\bar{L} – средний размер пакета (бит).

$$\bar{t} = \frac{\bar{L}}{b} \text{ с} \quad (1.13)$$

где b – скорость передачи данных по линии связи (бит/с).

Возможные значения фактора формы зависят от принятых допущений.

1. В случае использования в качестве модели трафика простейшего потока и при предположении, что время обслуживания случайно и имеет экспоненциальное распределение (модель M/M/1) известно точное выражение [5]

$$\varepsilon_1 = 1 \quad (1.14)$$

2. В случае использования в качестве модели трафика простейшего потока и при предположении, что время обслуживания постоянно (модель M/D/1) известно точное выражение [5]

$$\varepsilon_2 = 2 \quad (1.15)$$

3. В случае использования в качестве модели трафика простейшего потока и при предположении, что время обслуживания имеет произвольное распределение (модель M/G/1) известно точное выражение [5]

$$\varepsilon_3 = 1 + \left(\frac{\sigma_t}{\bar{t}}\right)^2 \quad (1.16)$$

где σ_t – среднеквадратическое отклонение времени обслуживания (с).

4. В случае использования в качестве модели трафика произвольного потока и при предположении, что время обслуживания имеет произвольное распределение (модель GI/G/1) известен ряд приближенных выражений.

4.1 Неравенство Кингмана [4]

Позволяет оценить верхнюю границу времени ожидания

$$\bar{W} \leq \frac{\rho \bar{t}}{2(1-\rho)} \varepsilon_4 \quad (1.17)$$

$$\varepsilon_4 = \frac{\sigma_a^2 + \sigma_t^2}{\bar{t}^2} \quad (1.18)$$

где σ_a^2 и σ_t^2 дисперсии интервалов времени между моментами поступления пакетов и времени обслуживания, соответственно.

4.2 Аппроксимация Марчелла [4]

Позволяет получить приближенную оценку среднего времени ожидания

$$\bar{W} \approx \frac{\rho \bar{t}}{2(1-\rho)} \varepsilon_5 \quad (1.19)$$

$$\varepsilon_5 = \frac{\sigma_a^2 + \sigma_t^2}{\bar{t}^2} \frac{\bar{t}^2 + \sigma_t^2}{\bar{a}^2 + \sigma_t^2} \quad (1.20)$$

4.3 Модель Крамера и Лангенбаха-Бельца [6]

Позволяет получить приближенную оценку среднего времени ожидания

$$\bar{W} \approx \frac{\rho \bar{t}}{2(1-\rho)} \varepsilon_6 \quad (1.21)$$

$$\varepsilon_6 = (C_a^2 + C_t^2) \begin{cases} \exp\left(-\frac{2(1-\rho)(1-C_a^2)^2}{3\rho(C_a^2 + C_t^2)}\right) & C_a^2 \leq 1 \\ \exp\left(-(1-\rho)\frac{C_a^2 - 1}{C_a^2 + 4C_t^2}\right) & C_a^2 > 1 \end{cases} \quad (1.22)$$

где $C_a = \frac{\sigma_a}{\bar{a}}$ - коэффициент вариации интервалов времени между моментами поступления пакетов;

$C_t = \frac{\sigma_t}{\bar{t}}$ - коэффициент вариации времени обслуживания.

Вероятность потерь пакетов в узле сети, при ряде допущений, может быть описана выражением [7] (модель G/G/1/k)

$$p \approx \frac{1-\rho}{1-\rho \frac{2}{C_a^2 + C_t^2} \rho^{\frac{2}{C_a^2 + C_t^2} k}} \rho^{\frac{2}{C_a^2 + C_t^2} k} \quad (1.23)$$

где k – размер буфера.

Как видно из представленных выше моделей величина задержки доставки пакета на участке маршрута сети связи зависит от интенсивности трафика, времени передачи пакета (скорости передачи) и вероятностных свойств трафика и времени обслуживания. Вероятностные свойства трафика выражаются через дисперсию (среднеквадратическое отклонение или коэффициент вариации) интервалов времени между моментами поступления пакетов и времени обслуживания (времени передачи пакета). Время передачи пакета определяется его длиной и скоростью передачи. Таким образом, задержка доставки пакета возрастает с ростом интенсивности трафика и с ростом диапазона разброса (дисперсии) интервалов между пакетами и длин пакетов.

Аналогичная зависимость имеет место и для вероятности потерь пакетов, которая также определяется интенсивностью трафика и его вероятностными свойствами. Вероятность потерь пакетов также возрастает при росте интенсивности трафика и при увеличении коэффициентов вариации интервалов времени между моментами поступления пакетов и времени обслуживания (времени передачи пакета).

Таким образом, можно резюмировать, что к снижению качества обслуживания могут приводить такие процессы, как рост интенсивности трафика, рост разброса временных параметров трафика и рост разброса размеров передаваемых пакетов данных.

1.2.2.3 Анализ степени влияния перегрузки на параметры функционирования

Как видно из представленных выше моделей, прирост интенсивности трафика оказывает влияние на величину задержки пакета и вероятность потерь.

1. Влияние прироста интенсивности трафика на величину задержки доставки пакета

Оценим изменение задержки доставки пакета как отношение средней величины задержки на ожидание при увеличенной нагрузке к значению при начальном значении нагрузки, определяемые выражением (1.10).

Тогда коэффициент изменения задержки будет определяться как

$$\gamma(\rho_0, \beta) = \frac{\bar{W}(\rho_0(1+\beta))}{\bar{W}(\rho_0)} = \delta(\rho_0, \beta) \frac{(1+\beta)(1-\rho_0)}{1-(1+\beta)(1-\rho_0)} \quad (1.24)$$

где ρ_0 - начальное значение нагрузки (доли использования пропускной способности);

β - коэффициент увеличения трафика ($\beta=0, \dots, 1$);

$\delta(\rho_0, \beta) = \frac{\varepsilon(\rho_0, \beta)}{\varepsilon(\rho_0)}$ - отношение коэффициентов формы;

$\varepsilon(\rho_0)$ - фактор формы для начального значения трафика;

$\varepsilon(\rho_0, \beta)$ - коэффициент формы с учетом изменения трафика.

Для моделей (1.17) и (1.18) $\delta(\rho_0, \beta) = 1$.

Данная зависимость приведена на рисунке 1.4.

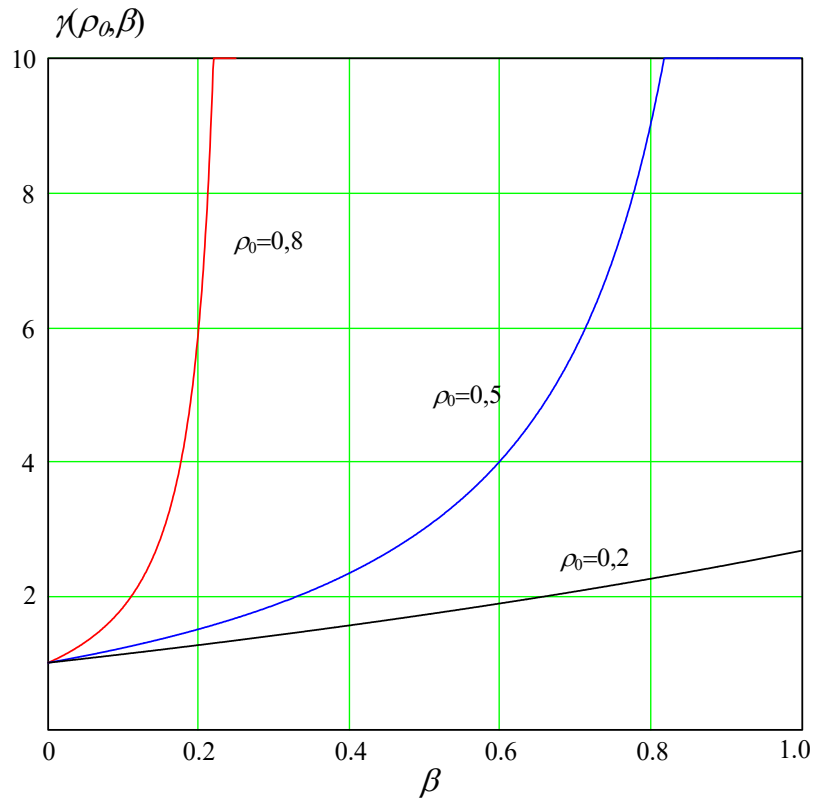


Рисунок 1.4 – Зависимость коэффициента изменения задержки доставки пакетов при росте трафика

Из рисунка видно, что прирост интенсивности трафика от 0 до 1 (от 0 до 100%) вызывает рост задержки на ожидание, которая зависит от начального (исходного) использования пропускной способности сети связи. Например, при исходной 80% загрузке каналов, 20% прирост трафика вызывает 6-кратное увеличение задержки, а при 20% исходной загрузке 60% рост интенсивности трафика вызывает менее, чем двукратный рост величины задержки.

Для моделей (1.17), (1.19), (1.21) отношение коэффициентов формы (1.18), (1.20), (1.22) зависит от изменения дисперсий (коэффициентов вариации потоков) и времени обслуживания, вызванных изменением трафика. В этом случае $0 < \delta(\rho_0, \beta)$, но может быть больше или меньше единицы. Изменение $\delta(\rho_0, \beta)$ зависит от вероятностных характеристик приращения трафика.

Если предположить, что при изменении интенсивности трафика его вероятностные свойства сохраняются, то коэффициент увеличения задержки может быть представлен выражением (1.16) (рисунок 1.5) при $\delta(\rho_0, \beta) = 1$.

Если вероятностные свойства трафика изменяются, то значение $\delta(\rho_0, \beta)$ отлично от единицы. С достаточной уверенностью можно предположить, что изменение факторов формы будет лежать в пределах $0,5 < \delta(\rho_0, \beta) < 2$.

На рисунке 1.5 приведены зависимости роста коэффициента изменения задержки доставки пакета от прироста интенсивности трафика для различных начальных значений трафика и значений $\delta(\rho_0, \beta) = 0,5$ и $\delta(\rho_0, \beta) = 2$.

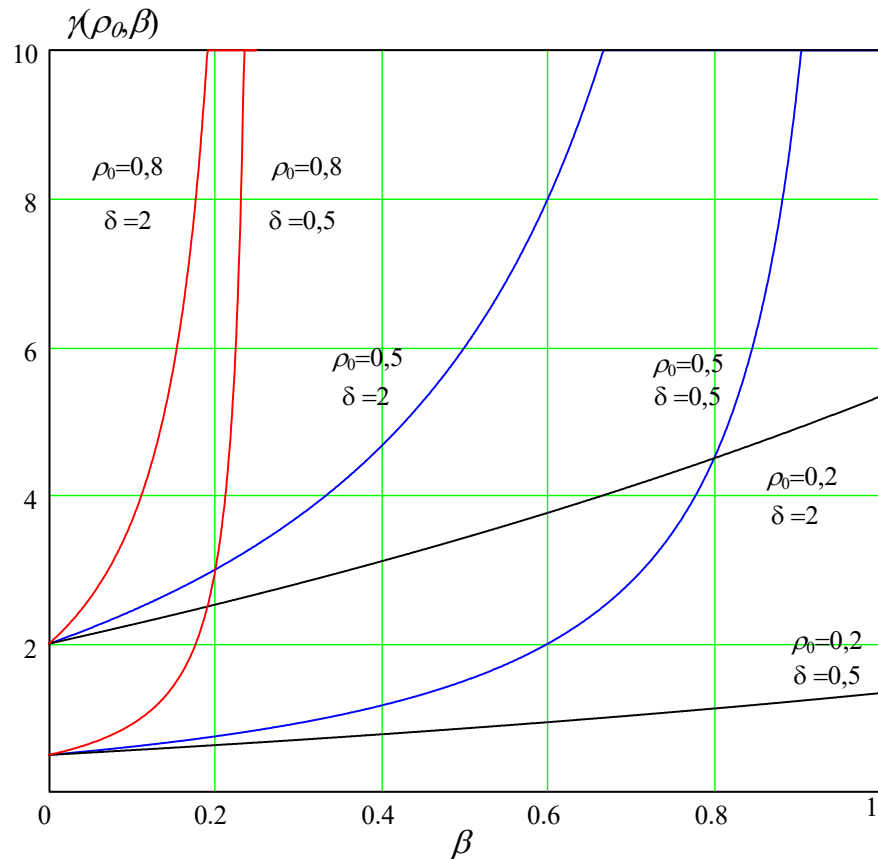


Рисунок 1.5 – Зависимость коэффициента изменения задержки доставки пакетов при росте трафика для различных значений δ

Приведенные на рисунке 1.6 кривые можно рассматривать как границы возможного изменения величины задержки доставки пакета с учетом возможных изменений свойств трафика.

2. Влияние прироста интенсивности трафика на вероятность потери пакетов

Опишем влияние прироста интенсивности трафика на вероятность потерь пакетов отношением вероятности потерь при увеличенном трафике к вероятности потерь при начальном его значении, при этом в качестве модели, связывающей вероятность потерь с интенсивностью нагрузки, используем выражение (1.15).

Тогда коэффициент изменения вероятности потерь представим как

$$\theta(\rho_0, \beta, C_a, C_t) = \frac{p(\rho_0(1 + \beta), C_a, C_t)}{p(\rho_0, C_a, C_t)} \quad (1.25)$$

где ρ_0 - начальное значение интенсивности нагрузки (доли использования пропускной способности);

β - коэффициент увеличения трафика ($\beta=0, \dots, 1$);

C_a - коэффициент вариации интервалов времени между пакетами;

C_t - коэффициент вариации интервалов времени обслуживания (передачи пакета);

Зависимость коэффициента изменения вероятности потерь при типовых значениях коэффициента вариации приведена на рисунке 1.6.

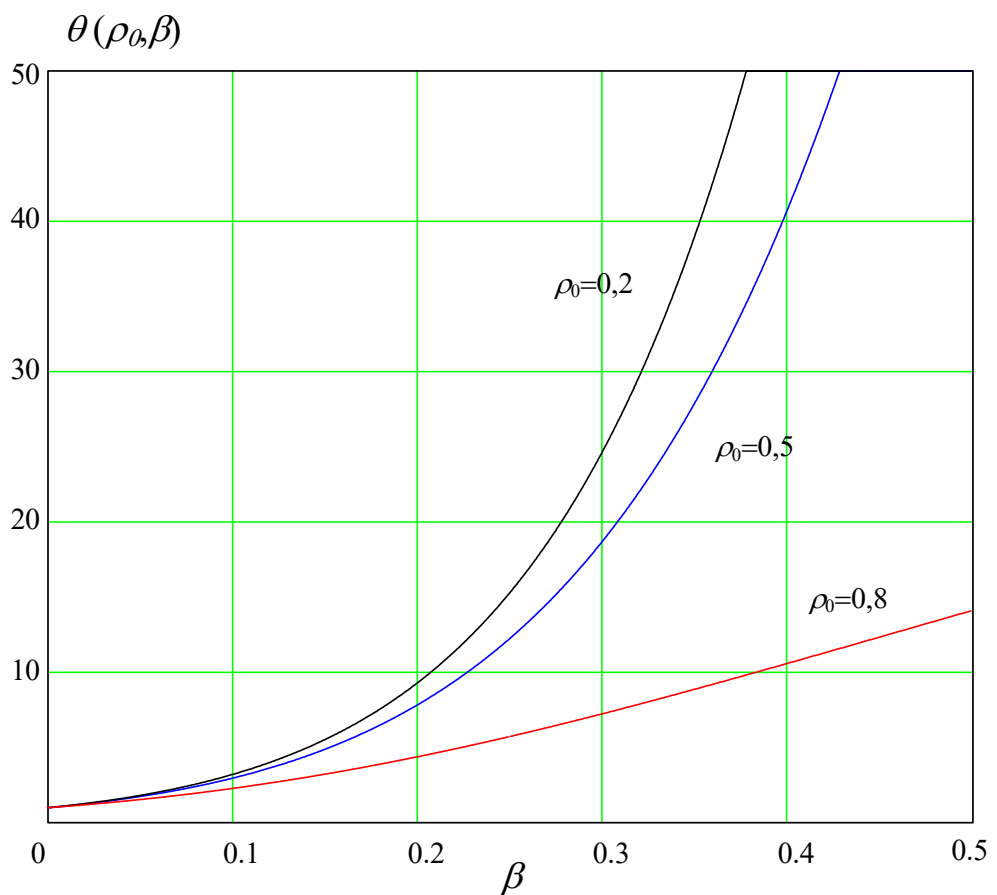


Рисунок 1.6 – Зависимость коэффициента изменения потерь пакетов при росте интенсивности трафика

Приведенная зависимость показывает, что увеличение интенсивности трафика приводит к росту коэффициента потерь пакетов, причем этот рост зависит от начального значения интенсивности трафика (использования канала сети связи). Например, из рисунка 17 видно, что при росте нагрузки на 20% ($\beta=0,2$) при использовании канала 80% ($\rho=0,8$) коэффициент

потерь пакетов увеличивается примерно в 4 раза ($\theta \approx 4$), а при использовании канала 20% ($\rho = 0,2$) коэффициент потерь пакетов увеличивается примерно в 10 раз ($\theta \approx 10$).

1.3 Выводы

Анализ влияния приращения трафика на задержку доставки пакетов и коэффициент потерь пакетов показывает, что эти изменения приводят к увеличению задержки и коэффициента потерь пакетов. Эти изменения можно выразить через соответствующие коэффициенты изменения задержки и вероятности потерь и их зависимость от свойств трафика.

Если допустить, что свойства трафика как случайного потока при «экстремальном» росте интенсивности не изменяются, то для оценки влияния прироста трафика на показатели функционирования сети связи можно использовать достаточно простые выражения, полученные выше для коэффициентов прироста величины задержки и вероятности потерь. Такое допущение может быть оправдано тем, что рост трафика, как будет показано ниже, обусловлен доминированием ограниченного набора услуг. Увеличение доли трафика этих услуг ожидаемо не приведет к росту разброса длин пакетов и параметров потока, что могло бы усилить деградацию параметров функционирования.

Далее полученные модели будут использованы для оценки влияния изменения трафика на временные и вероятностные параметры функционирования сетей.

2 Анализ спектра услуг сетей связи общего пользования и определение перечня услуг, трафик которых подвергается наибольшему изменению в период пандемии и подобных явлений

2.1 Анализ спектра услуг сетей связи общего пользования

Услуга связи - деятельность по приему, обработке, хранению, передаче, доставке сообщений электросвязи или почтовых отправлений [Закон о связи].

Услуги, предоставляемые современными сетями связи, можно условно разделить на три группы: потоковые, интерактивные и фоновые.

Предоставление потоковых услуг сопряжено с формированием потока данных между пользователем и точкой предоставления услуг (телефония, передача звука, передача видео, видеоконференцсвязь). При предоставлении потоковых услуг для обеспечения качества их предоставления важно соблюдение идентичности последовательности передаваемых и принимаемых пакетов, а также временных интервалов между ними.

Предоставление интерактивных услуг сопряжено с доставкой через сеть данных, необходимых для обслуживания действия (реакция на действие) пользователя (WEB-серфинг, работа с базами данных, телефония, видеоконференцсвязь). При предоставлении интерактивных услуг для обеспечения качества их предоставления важно обеспечение минимальной задержки между действием пользователя и получением ожидаемой реакции.

Предоставление фоновых услуг сопряжено с доставкой через сеть некоторого объема данных (передача файлов, электронная почта, передача коротких сообщений). При реализации фоновых услуг для обеспечения качества их предоставления важно обеспечение минимального времени доставки данных, при этом временные характеристики доставки отдельных фрагментов, данных не оказывают влияния на качество восприятия.

Наиболее жесткие требования к параметрам функционирования предъявляются со стороны интерактивных и комбинированных интерактивных потоковых услуг (телефония, видеоконференцсвязь, телеуправление – услуги тактильного Интернета [23,24]).

Интенсивность трафика, производимого пользователями потоковых и комбинированных услуг, может быть представлена как:

$$a = \sum_{i=1}^k y_0^{(i)} a_0^{(i)} \text{ бит/с} \quad (2.1)$$

$y_0^{(i)} = \lambda_0^{(i)} \bar{t}^{(i)}$ -удельная интенсивность нагрузки, производимой сессиями i -й услуги;

$\lambda_0^{(i)}$ - интенсивность сессий i -й услуги (сессий/с);

$\bar{t}^{(i)}$ - средняя продолжительность сессии i -й услуги (с);

$a_0^{(i)}$ - интенсивность пакетов потока, производимого i -й услугой (бит/с);

k – количество предоставляемых услуг.

Параметры трафика, производимого пользователями различных услуг, зависят от особенностей и технической реализации (вид передаваемых сообщений, типы используемых кодеков, протоколы).

2.2 Анализ услуг, трафик которых подвергается наибольшим изменениям в период пандемии и подобных явлений

2.2.1 Анализ роста трафика в условиях пандемии

По данным организации OECD [1] операторы фиксированной и мобильной широкополосной связи, поставщики контента и облачных сервисов, а также шлюзы сети Интернет (IXP), обслуживают на 60% больше Интернет-трафика, чем до вспышки коронавируса. В этой беспрецедентной ситуации устойчивость и возможности широкополосных сетей стали еще более важными.

По тем же данным, операторы фиксированной и мобильной связи переживают всплеск интернет-трафика.

Операторы связи Южной Кореи сообщили об увеличении трафика на 13%, что достигает 45–60% от их имеющейся емкости.

В Японии NTT Communications сообщает об увеличении использования на 30-40%.

В Соединенном Королевстве BT увеличение использования фиксированной широкополосной связи в дневное время в будние дни составило на 35–60%.

Telefónica сообщает, что в Испании пропускная способность увеличилась почти на 40%, при этом рост мобильного трафика составил 50% и 25% для передачи голоса и данных соответственно.

В Италии Telecom Italia испытала увеличение трафика фиксированной и мобильной сети на 63% и 36% соответственно.

Во Франции Orange сообщает, что ее международная инфраструктура пользуется большим спросом: 80% трафика, генерируемого пользователями во Франции, направляется в Соединенные Штаты, где сосредоточена значительная часть развлечений и контента.

В Соединенных Штатах Verizon сообщила об увеличении использования инструментов для совместной работы на 47% и об увеличении трафика виртуальной частной сети на 52%.

По данным AT&T, количество минут звонков через мобильную связь и Wi-Fi выросло на 33% и 75% соответственно, в то время как количество минут абонентской голосовой связи на фиксированных линиях выросло на 64%: это противоположность предыдущей тенденции. AT&T также сообщила, что трафик ее базовой сети вырос на 23%.

На рисунке 2.1 приведен прирост пропускной способности в точках международного межсетевых обмена (IXP – International Exchange Point).

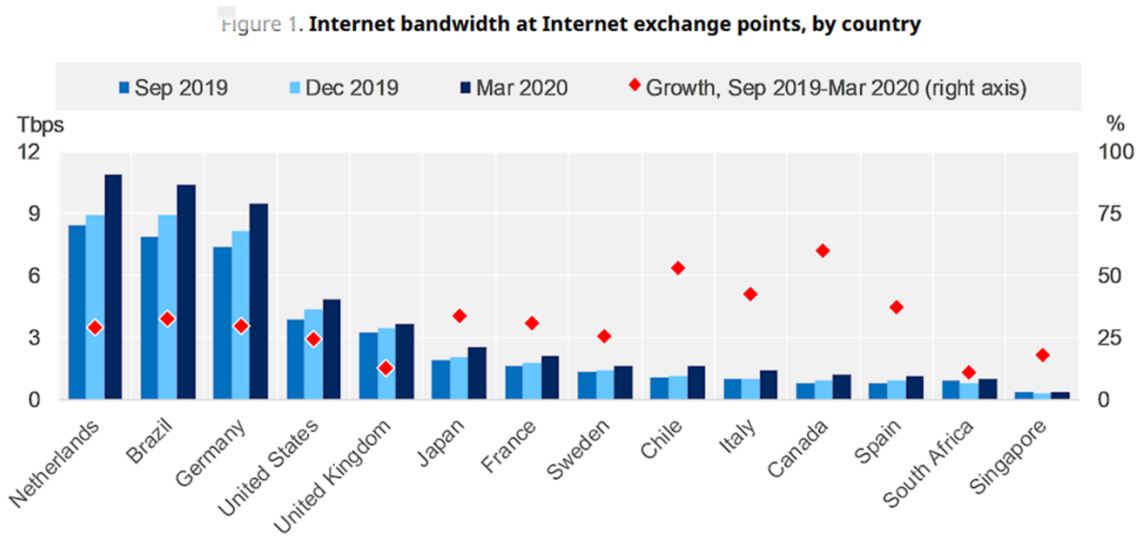


Рисунок 2.1 – Прирост пропускной способности IXP

По данным [2], начиная с марта 2020 года структура интернет-трафика изменилась, и объемы выросли. Глобальная пропускная способность Интернета в прошлом году выросла на 35%, что значительно превышает «скромные» 26% в прошлом году. Это в значительной степени обусловлено реакцией на пандемию COVID-19, что представляет собой самый большой годовой прирост с 2013 года, и в результате последние четыре года CAGR вырос до 29%.

Общая международная пропускная способность сейчас составляет 618 Тбит/с. Темпы роста замедляются, но с 2016 года мы все еще наблюдаем почти утроение пропускной способности.

Во всех регионах наблюдается значительный рост производственных мощностей. В Африке наблюдался самый быстрый рост международной пропускной способности интернета, совокупный годовой темп роста которой составил 46% в период с 2016 по 2020 год. Азия находится сразу за Африкой, пропускная способность увеличилась на 40% в год за тот же период.

На рисунке 2.2 приведен доленой прирост пропускной способности по ряду стран.

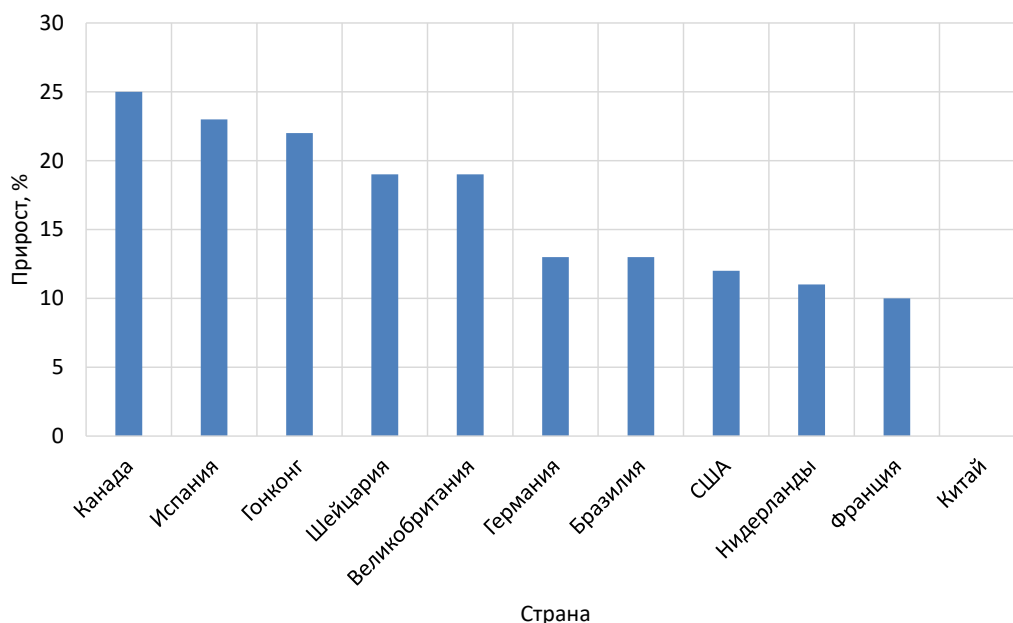


Рисунок 2.2 – Прирост пропускной способности

Рост международного интернет-трафика в значительной степени отражает рост объема интернет-трафика. Однако рост трафика и пропускной способности редко происходит в идеальном тандеме (сетевые операторы часто добавляют емкость в ожидании роста трафика).

В период с 2016 по 2020 год средний и пиковый международный интернет-трафик увеличивался на 30% в год, что сопоставимо с 29% среднегодовым темпом роста пропускной способности.

Влияние мер по предотвращению распространения коронавирусной инфекции сильно повлияло на трафик. В 2020 году средний международный интернет-трафик увеличился на **48%**, а пиковый - на **47%** [2].

По данным [3] наблюдается стабилизация пикового трафика в отличие от роста на 40-50%, который мы наблюдали ранее.

Наблюдается «сглаживание» кривых трафика - в отличие от пиков, первоначально наблюдаемых после введения карантина - из-за продолжающегося и высокого уровня трафика в рабочие часы (в основном, вызванного приложениями для видеоконференцсвязи).

Подобное выравнивание - на гораздо более высоком уровне пропускной способности - происходит по выходным (за счет потокового видео).

Продолжается резкий рост трафика приложений для видеоконференцсвязи - некоторые из них теперь показывают рост на 700% по сравнению с 1 февраля 2020 года.

Резкое снижение скорости потоковой передачи видео предполагает, что это было результатом снижения скорости, а не из-за перегрузки или недостаточной емкости.

Стабильные средние битрейты (ABR) Netflix в США и некоторых странах Европы предполагают достаточную пропускную способность инфраструктур поставщиков услуг.

Суточная кривая («зубчатая гора») продолжает сглаживаться, в основном из-за увеличения числа видеоконференций в рабочее время (симметричный трафик с высокой пропускной способностью).

В условиях блокировки большинство сетей показали незначительный рост или его отсутствие в час пик (21:00 по местному времени), за некоторыми исключениями - некоторые сети в Европе продемонстрировали рост трафика на 20% по сравнению с предыдущей неделей (и на 64% роста с 1 февраля).

По-прежнему наблюдается - особенно в США - резкий рост приложений для конференцсвязи, особенно Zoom, рост которых с 1 февраля составил более 700% (в некоторых сетях США).

На рисунке 2.3 показана иллюстрация изменения суточного профиля трафика под влиянием мер противодействия распространению коронавирусной инфекции. На данном графике приведен пример, иллюстрирующий динамику роста трафика видеоконференцсвязи.

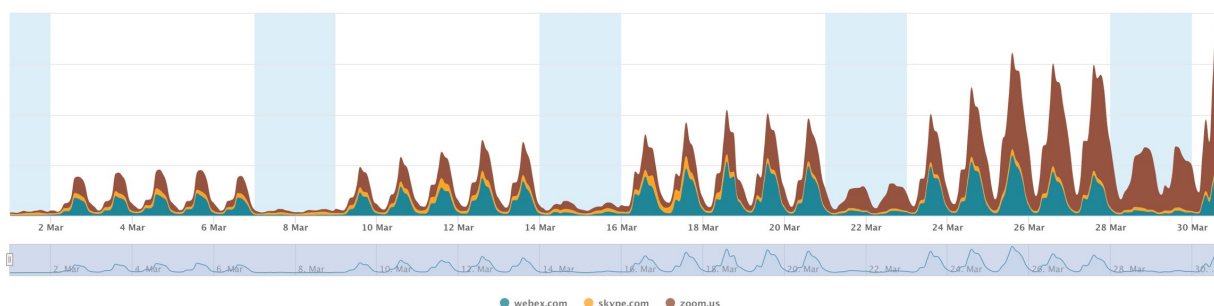


Рисунок 2.3 – Изменение профиля суточного трафика

На приведенном рисунке видно, что при сохранении формы суточного профиля трафика наблюдается значительный рост объема и максимального значения трафика. Прирост за день составлял в среднем около 10%. Наибольшую долю в приросте составил трафик видеоконференцсвязи (коричневая область графика).

По данным [10] средний рост трафика Интернет в мире представляется следующим образом (рис. 2.4).

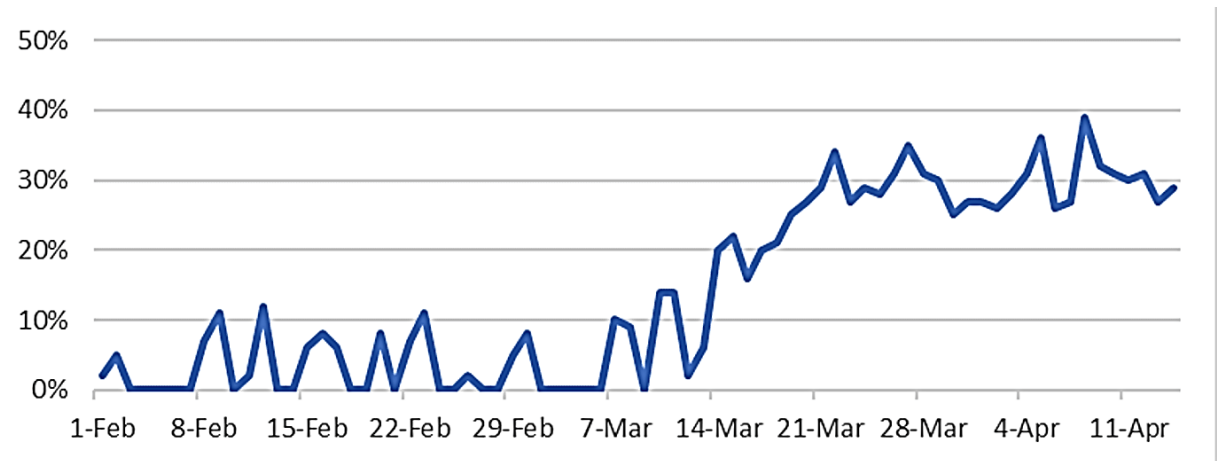


Рисунок 2.4 – Изменение трафика сети Интернет в мире в период пандемии

Начало интенсивного роста трафика совпадает с моментом введения мер по противодействию распространения коронавирусной инфекции. Как видно из приведенных данных, в течение месяца рост трафика составил около 30%. Эти данные включают в себя трафик всех услуг связи.

На рисунке 2.5 приведены данные [10], иллюстрирующие общий рост трафика в США.

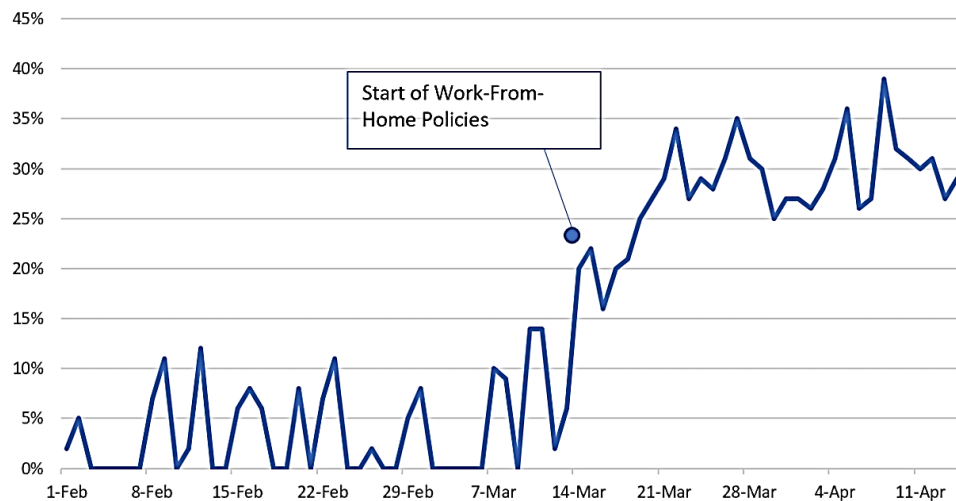


Рисунок 2.5 – Изменение трафика сети Интернет в США в период пандемии

Как видно из приведенных данных, динамика изменения трафика в США во многом схожа с приведенными выше данными по росту трафика в мире (рисунок 2.4). Рост трафика также происходит до уровня 30% относительно начальных значений.

По данным [11] приведены графики на рисунках 2.6 и 2.7, которые иллюстрируют изменение трафика Интернет в США, начиная с 03.01.2020, дифференцированно по направлению связи (нисходящий канал – downstream и восходящий канал - upstream).

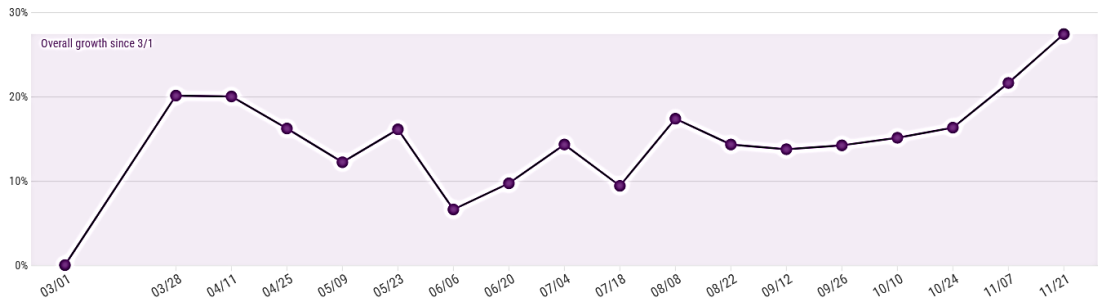


Рисунок 2.6 – Изменение трафика сети Интернет в США в период пандемии ((нисходящий канал – downstream)

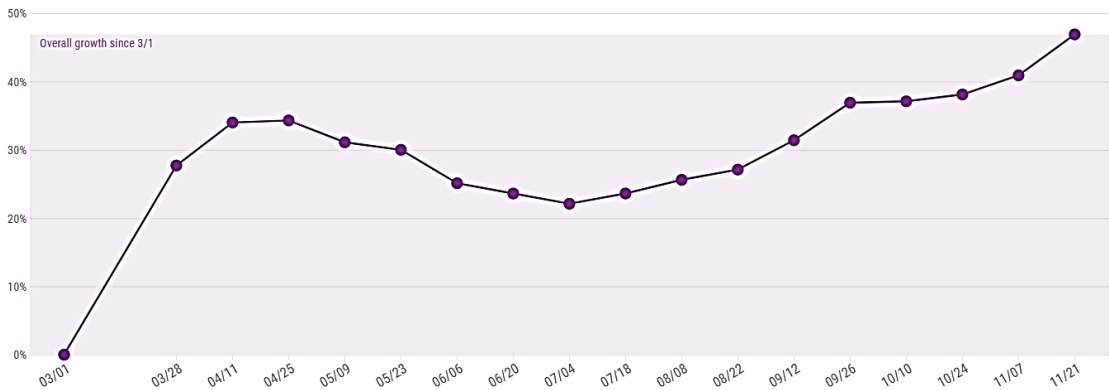


Рисунок 2.7 – Изменение трафика сети Интернет в США в период пандемии (восходящий канал - upstream)

Из приведенных данных видно, что трафик возрастает в обоих направлениях связи, однако рост в восходящем (upstream) направлении более выражен. В максимальном измерении рост трафика upstream составляет 50%, а трафика downstream 30%. Средние значения прироста за рассматриваемый период 18% и 32%, соответственно.

Большая степень прироста трафика upstream по отношению к downstream обусловлена ростом доли «симметричного» трафика видеоконференцсвязи.

На рисунке 2.8 приведены статистические данные об изменении трафика в странах Латинской Америки.

Можно заметить, что динамика изменения трафика и его долевого изменение существенно отличается от ранее приведенных данных для трафика в мире и в США. В данном случае заметен более интенсивный рост трафика. Прирост трафика за тот же период, например, для Мексики и Аргентины составляет 100% и 70%, соответственно.

В других странах Латинской Америки имел место меньший прирост трафика за указанный период, а величина его составила от 20% до 40% в максимальных значениях.

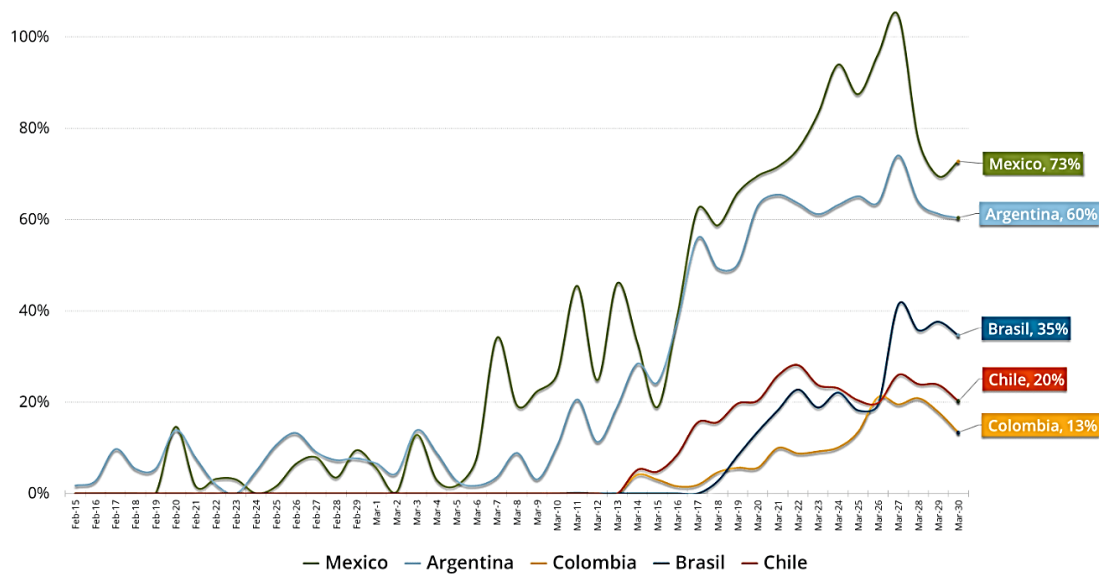


Рисунок 2.8 – Изменение трафика сети Интернет в странах Латинской Америки в период пандемии

На рисунке 2.9 приведены статистические данные об изменении трафика в сетях связи Европы. Из приведенного графика видно, что рост нестабилен. Это, вероятно, объясняется разной степенью реакции европейских стран на вводимые меры, а также разной степенью влияния развивающейся ситуации на общество и различным временем введения мер правительствами различных стран.

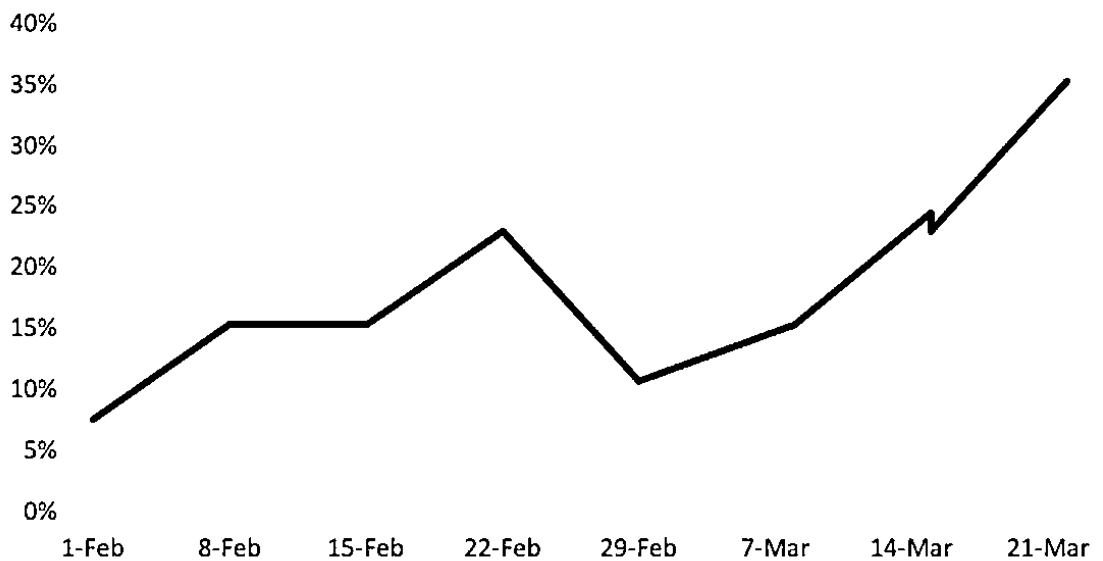


Рисунок 2.9 – Изменение трафика сети Интернет в европейских странах в период пандемии

Как видно из приведенных данных, увеличение трафика в максимальном измерении достигает 35%.

В таблице 2.1 приведены обобщенные данные, характеризующие изменение трафика сетей связи в различных странах мира.

Таблица 2.1 – Прирост трафика по данным статистики

Сеть	Прирост трафика %	Примечание
Южная Корея*	13	Средняя интенсивность трафика сетей связи
В Японии NTT* Communications	30-40	Средняя интенсивность трафика сетей связи
Великобритания BT*	35-60	Средняя интенсивность трафика сетей связи
Испания Telefónica*	50, 25	Телефония, передача данных
Италия Telecom Italia*	63, 36	Фиксированная сеть, мобильная сеть
США Verizon*	47, 52	Средства для совместной работы, VPN
США AT&T*	33, 75, 64	Мобильная связь, WiFi, фиксированная сеть
Международный** трафик Интернет	48, 47	Средняя величина трафика, максимальная величина трафика.
Nokia***	40-50	Средняя интенсивность трафика сетей связи

Примечание. *Данные получены из источника [1], ** из источника [2] и *** из источника [3].

Анализ приведенных данных показал, что средний прирост трафика из-за принятия мер по предотвращению распространения коронавирусной инфекции составил 45,3%.

Наибольший рост трафика имеет место для услуг, обеспечивающих совместную работу и услуги видеоконференцсвязи.

2.2.2 Исследования роста трафика в сетях беспроводного доступа в России

Для анализа роста трафика в сетях беспроводного доступа был произведен эксперимент по измерению трафика на достаточно большой выборке пользователей. Эксперимент заключался в перехвате пакетов наиболее распространенного стандарта сети IEEE 802.11n. В ходе эксперимента собирались данные о количестве захваченных за единицу времени пакетов данных, переданных между всеми наблюдаемыми точками доступа и их пользователями. В качестве объектов наблюдения были рассмотрены жилые районы города Санкт-Петербурга. Точка наблюдения медленно перемещалась (со скоростью пешехода) по маршруту через жилые кварталы протяженностью около 10 км. Измерения проводились в дневное время с 14 до 16 часов в апреле 2020 г.

Также, при обработке полученных данных, были построены гистограммы распределения интенсивности трафика и сделаны их аппроксимации Гамма распределением (красный график). Для этого были выбраны интервалы от 1 до 34 и определены нижняя и правая границы каждого интервала (к примеру, для 1 интервала 0 – нижняя, 15 – правая, для 2 интервала 15 – нижняя, 30 – правая, и так далее). Соответственно, в каждом определенном интервале было собрано какое-либо количество значений, которые попадают в этот интервал.

На рисунке 4.5 приведена эмпирическая гистограмма распределения (частот) интенсивности трафика, обобщенная по результатам наблюдений на 6 канале, где отмечалась наибольшая активность пользователей.

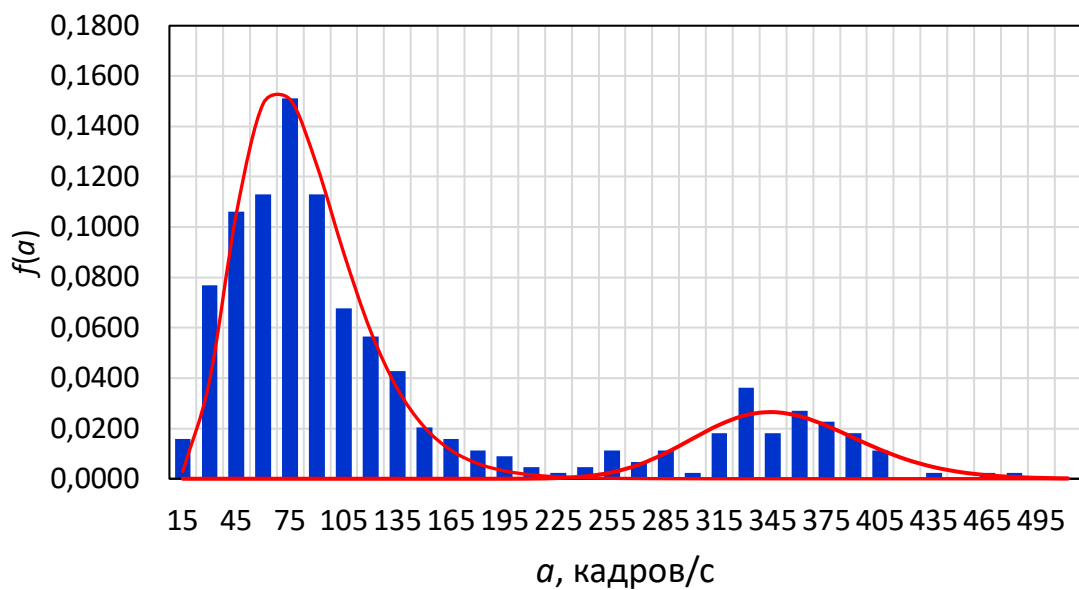


Рисунок 2.10 – Гистограмма интенсивности кадров

В качестве аналитической модели выбрано смешанное распределение, включающее в себя две компоненты, имеющие Гамма распределение. Плотность вероятности для выбранной модели имеет следующий вид:

$$f(x) = \frac{x^{k_1-1}}{p_1 \alpha_1^{k_1} \Gamma(k_1)} e^{-\frac{x}{\alpha_1}} + \frac{x^{k_2-1}}{p_2 \alpha_2^{k_2} \Gamma(k_2)} e^{-\frac{x}{\alpha_2}}, \quad x > 0 \quad (2.2)$$

где α_1, α_2, k_1 и k_2 – параметры распределения,

p_1 и p_2 – доли первой и второй компонент, соответственно.

Решение задачи аппроксимации методом наименьших квадратов показало следующие значения параметров распределения, приведенные в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Значения параметров модели

Параметр	Ед. измерения	Значение
α_1	кадр/с	15,0
α_2	кадр/с	6,0
k_1	-	5,0
k_2	-	57,0
ρ_1	-	0,80
ρ_2	-	0,20

Следует отметить, что полученное распределение (Рисунок 2.10) является бимодальным, что позволяет предположить наличие двух наиболее характерных сценариев использования сети пользователями. Первый наблюдается в границах от 0 до 75, второй – от 315 до 330 кадров/с.

Если сопоставить интенсивности кадров с интенсивностью трафика, то возможно сделать предположение, что первая мода соответствует трафику фоновых услуг и возможно, передачи речи, а вторая мода - услуг доступа к видео-контенту, т.е. просмотр фильмов и видеоконференцсвязь.

Следует заметить, что измерения проводились во время режима самоизоляции.

Для сравнения на рисунке 2.11 приведено распределения интенсивности пакетов, полученное при проведении аналогичных измерений в 2017 году.

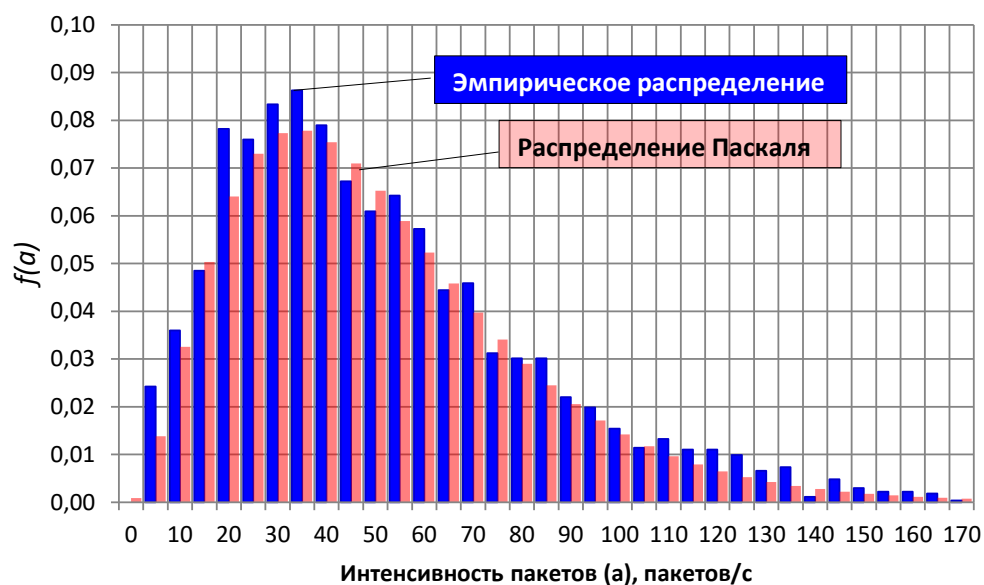


Рисунок 2.11 – Эмпирическая плотность вероятности интенсивности кадров (2017 год)

Из рисунка видно, что распределение является унимодальным. Это позволяет сделать вывод о росте потребления услуг связи с передачей видео.

В случае графика, построенного по измеренным нами данным, скачок интенсивности наблюдается величиной в два раза. Как отмечалось ранее, первый скачок происходит в границах от 0 до 75, второй – от 315 до 330, что говорит о высокой интенсивности трафика. Так как измерения трафика проводились в начале апреля 2020-го года, когда в России действовали правила самоизоляции в связи с противодействием распространению коронавирусной инфекцией, с достаточно высокой вероятностью можно утверждать, что второй скачок интенсивности произошел по причине активного использования Интернета людьми, находящимися на самоизоляции дома.

Вероятно, этот скачок является следствием роста активности использования услуг доступа к видео-контенту и видеоконференцсвязи.

Сравнение данных, полученных за разные годы, позволяет оценить рост трафика на величину около **70%**. Эта величина также включает в себя и рост трафика, обусловленный естественными эволюционными причинами, т.е. естественным ростом проникновения услуг, однако, по анализу сделанных ранее наблюдений, можно допустить, что наибольший вклад оказывает рост трафика, связанный с мерами противодействия распространению коронавирусной инфекции.

2.2.3 Анализ роста трафика услуг видеоконференцсвязи

Как показывает статистический анализ наибольший рост спроса на услуги связи в период принятия мер противодействия распространению коронавирусной инфекции имеет место в области потоковых и комбинированных услуг. Наибольший рост спроса отмечен у таких услуг как видеоконференцсвязь.

На рисунке 2.12 приведен рост количества активных пользователей видеоконференцсвязи Zoom в день [8].

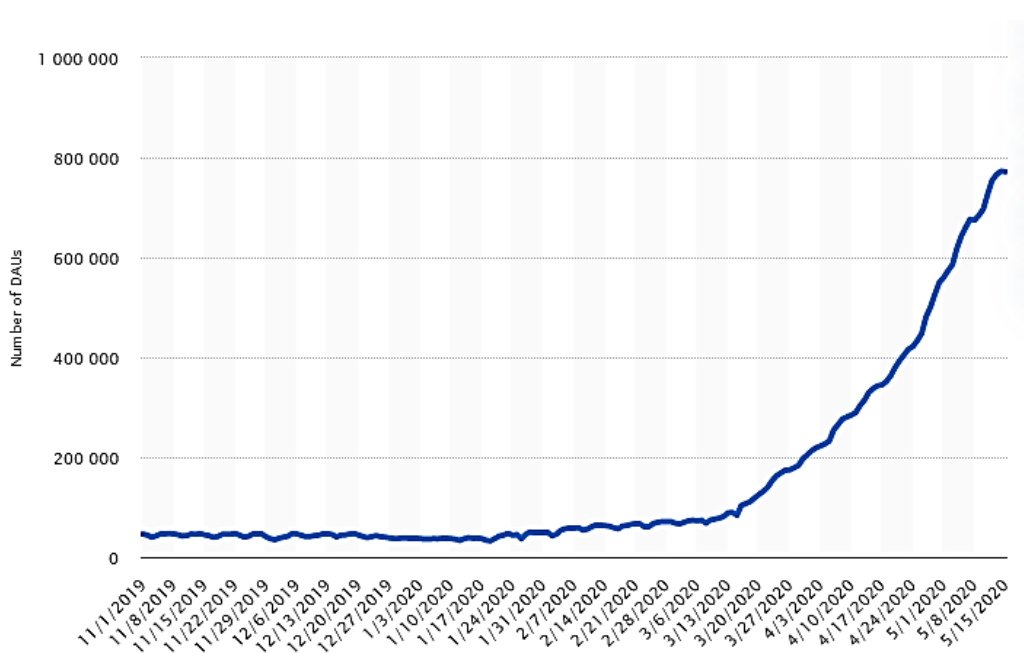


Рисунок 2.12 – Рост количества активных пользователей Zoom в день

Например, по данным [8], в Великобритании количество ежедневных активных пользователей (DAU) Zoom достигло пика примерно в 1,7 млн. к концу ноября 2020 года. Приложение для видеосвязи начало резкий прирост DAU примерно в то же время, когда произошла вспышка коронавируса в Великобритании.

На рисунке 2.13 приведены кривые роста числа пользователей видеоконференцсвязи Google Meet.

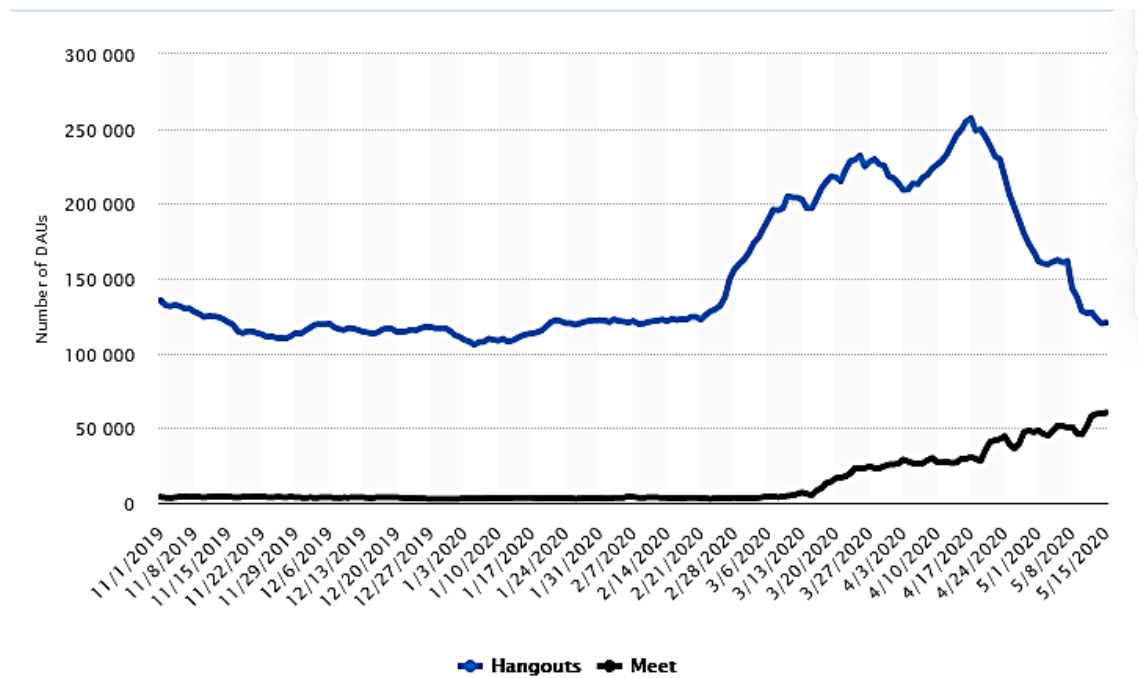


Рисунок 2.13 – Рост числа активных пользователей Google Meet в день

Например, по данным [8] в Великобритании число ежедневных активных пользователей (DAU) Google Hangouts достигло пика, превысив 250 тысяч в середине апреля 2020 года. Рост использования видеоконференцсвязи произошел примерно в то же время, что и вспышка коронавируса. Примерно в это же время была обновлена служба видеоконференцсвязи Google Meet и сделана доступной бесплатно для перевода пользователей с Hangouts на Meet.

Анализ статистических данных показывает, что рост трафика услуг видеоконференцсвязи в период введения мер по предотвращению распространения коронавирусной инфекции при максимальном измерении достигает семикратной величины, т.е. 700% (для Zoom).

На рисунке 2.14, приведены диаграммы, полученные по данным [9]. Приведенные кривые отражают динамику роста использования услуг для удаленной работы и видеоконференцсвязи в США.

Daily app sessions for popular remote work apps

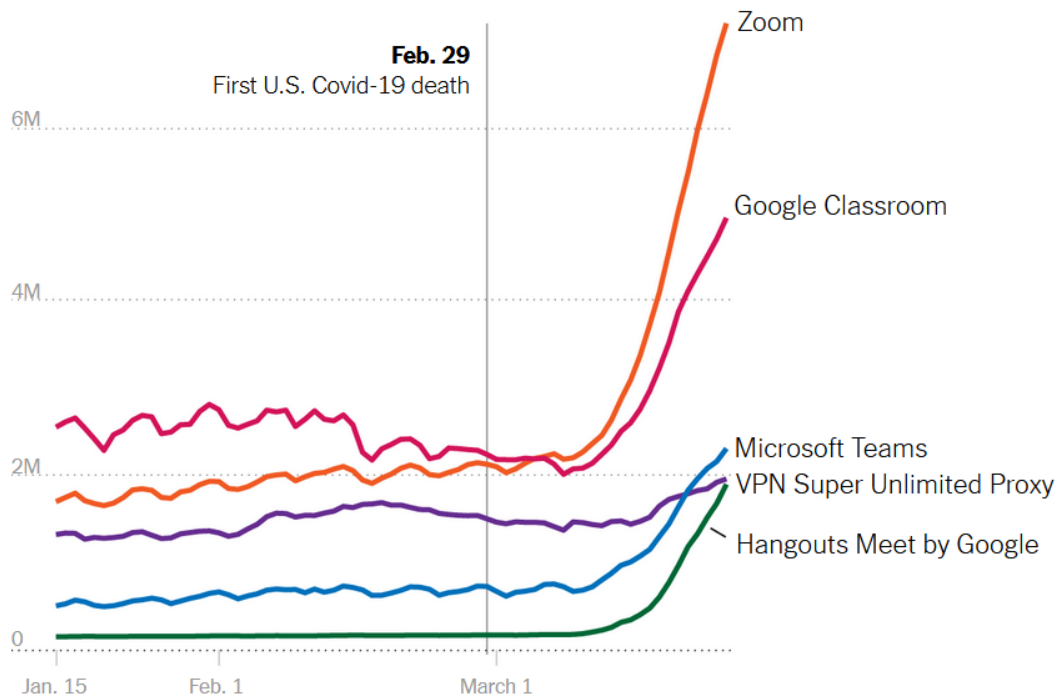


Рисунок 2.14 – Рост использования услуг для удаленной работы, в том числе и видеоконференцсвязи

Анализ статистических данных показывает динамичный и чрезвычайно быстрый рост числа пользователей и трафика видеоконференцсвязи. Рост этого вида услуг наиболее выражен среди услуг, используемых для организации удаленной работы и обучения. По усредненным оценкам он составляет от 100 до 700%.

2.2.4 Анализ свойств трафика видеоконференцсвязи

2.2.4.1 Анализ трафика Zoom

Для исследования свойств трафика было выбрано приложение Zoom, с помощью которого была установлена видеоконференцсвязь. Все настройки приложения были установлены по умолчанию, был использован типовой ноутбук с видеокамерой 640x480 пикселей (SC-10HDD12636P).

На рисунке 2.15 приведена реализация трафика видеоконференцсвязи Zoom.

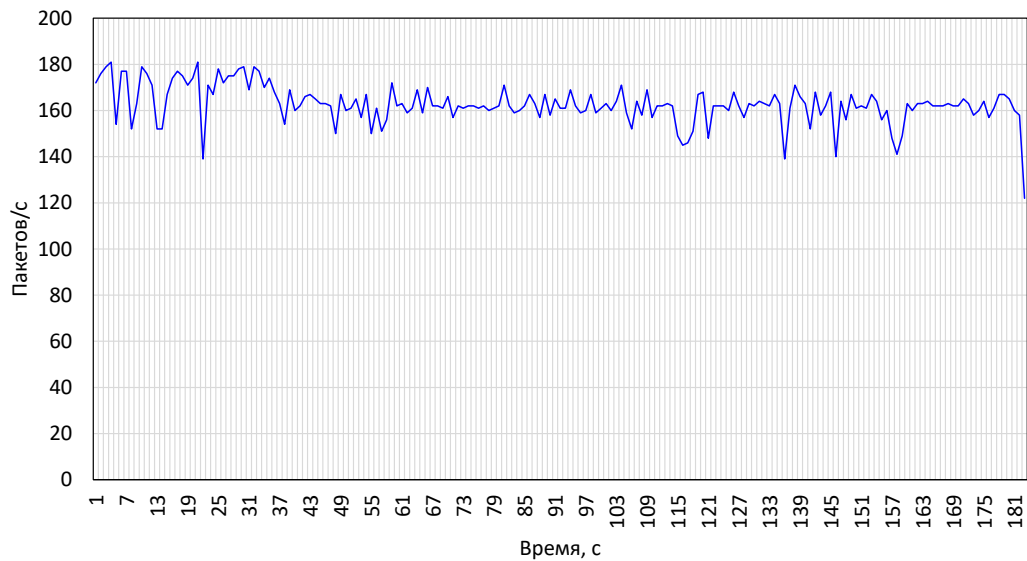


Рисунок 2.15 – Реализация трафика видеоконференцсвязи Zoom

Из приведенной диаграммы видно, что интенсивность трафика достаточно стабильна на протяжении периода наблюдения.

Для характеристики вероятностных свойств потока на достаточно большой выборке пакетов были получены распределения интервалов времени между пакетами и распределение длин пакетов.

На рисунке 2.16. приведена эмпирическая гистограмма и аппроксимирующая функция плотности вероятности интервала времени между пакетами.

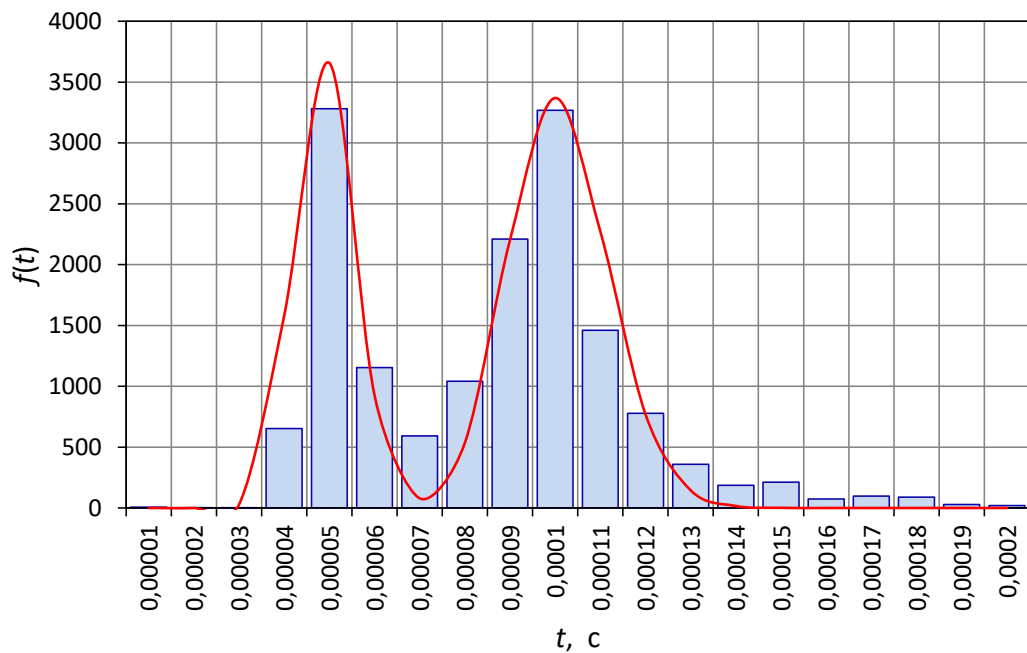


Рисунок 2.15 – Эмпирическая гистограмма и функция плотности вероятности для интервалов времени между пакетами потока трафика видеоконференцсвязи Zoom

Было получено бимодальное распределение, которое было достаточно точно описано смешанным распределением с использованием Гамма-распределения в качестве базового.

$$f(t) = p_1 \frac{t^{k_1-1}}{\alpha_1^{k_1} \Gamma(k_1)} e^{-\frac{t}{\alpha_1}} + p_2 \frac{t^{k_2-1}}{\alpha_2^{k_2} \Gamma(k_2)} e^{-\frac{t}{\alpha_2}}, \quad t > 0 \quad (2.3)$$

где α_1 , α_2 , k_1 и k_2 – параметры распределения,

p_1 и p_2 – доли первой и второй компонент, соответственно.

В таблице 2.3 приведены численные значения параметров модели.

Таблица 2.3 – Значения параметров модели

Параметр	Ед. измерения	Значение
α_1	1/с	$8,0 \cdot 10^{-7}$
α_2	1/с	$12,0 \cdot 10^{-7}$
k_1	-	55,0
k_2	-	80,0
p_1	-	0,40
p_2	-	0,60

На рисунке 2.16 приведена эмпирическая гистограмма распределения размера пакета.

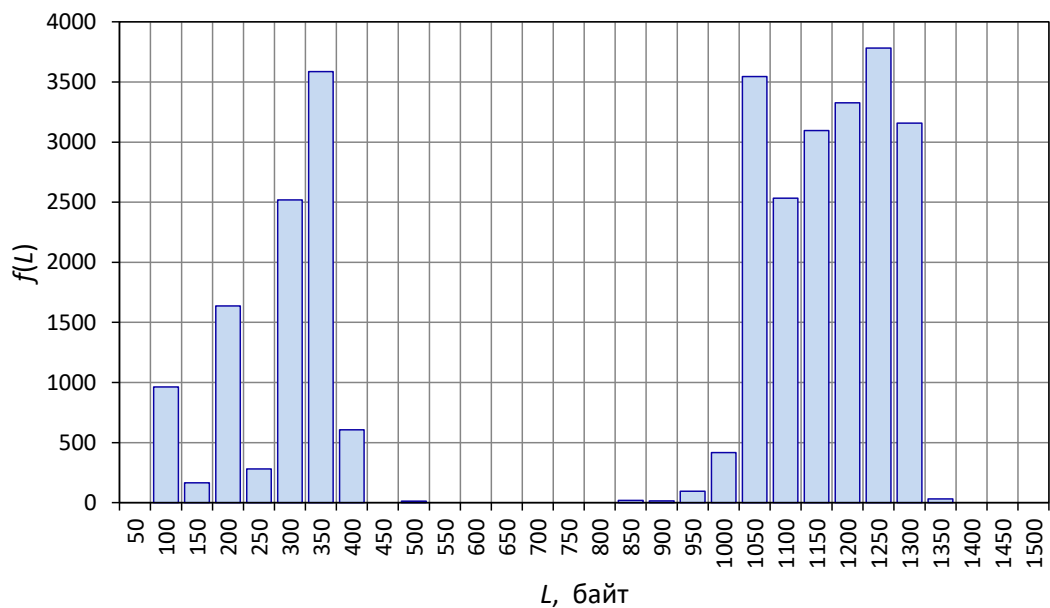


Рисунок 2.16 – Эмпирическая гистограмма размера пакета потока трафика видеоконференцсвязи Zoom

Из приведенной гистограммы видно, что распределение размера пакета также бимодальное. Моды равны 350 байт и 1250 байт, соответственно.

Для более полной характеристики трафика как случайного процесса были исследованы его фрактальные свойства. Для этого была произведена оценка параметра Хёрста.

На рисунке 2.17 приведена иллюстрация оценки параметра Хёрста методом анализа изменения дисперсии.

В результате оценки было получено значение $H=0,61$.

Полученное значение говорит о том, что данный трафик можно отнести к самоподобным процессам, однако величина параметра Хёрста значительно меньше значений, характерных для трафика услуг передачи видео в современных сетях связи (0,7...0,9).

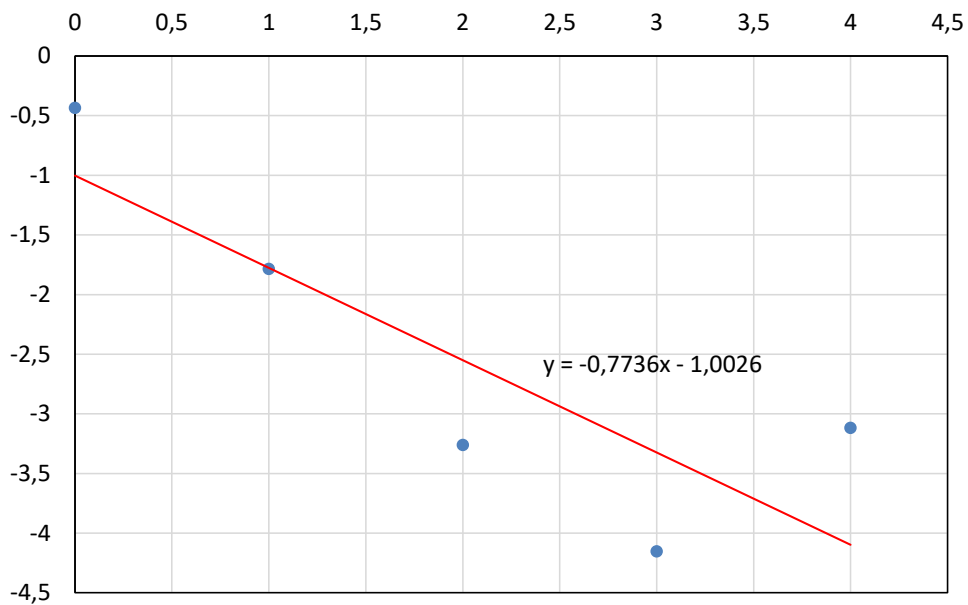


Рисунок 2.17 – Оценка параметра Хёрста методом анализа дисперсии

2.2.4.2 Анализ трафика Google Meet

Для исследования свойств трафика было выбрано приложение Zoom, с помощью которого была установлена видеоконференцсвязь. Все настройки приложения были установлены по умолчанию, был использован типовой ноутбук с видеокамерой 640x480 пикселей (SC-10HDD12636P).

На рисунке 2.18 приведена реализация трафика видеоконференцсвязи Google Meet.

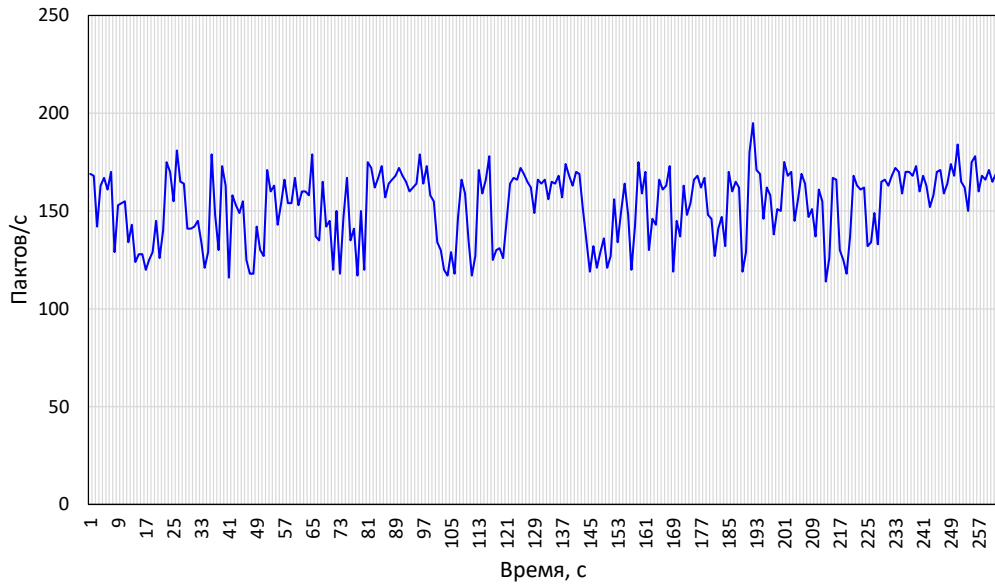


Рисунок 2.18 – Реализация трафика видеоконференцсвязи Google Meet

Для характеристики вероятностных свойств потока на достаточно большой выборке пакетов были получены распределения интервалов времени между пакетами и распределение длин пакетов.

На рисунке 2.19. приведена эмпирическая гистограмма и аппроксимирующая функция плотности вероятности интервала времени между пакетами.

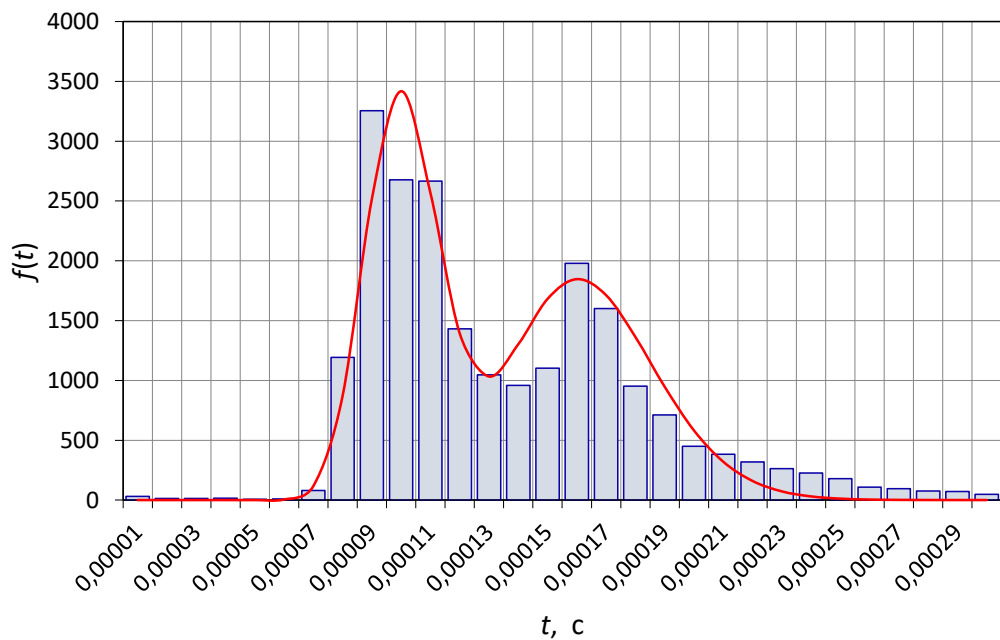


Рисунок 2.19 – Эмпирическая гистограмма и функция плотности вероятности для интервалов времени между пакетами потока трафика видеоконференцсвязи Google Meet

В данном случае также было получено бимодальное распределение, которое также было достаточно точно описано смешанным распределением с использованием Гамма-распределения в качестве базового.

$$f(t) = p_1 \frac{t^{k_1-1}}{\alpha_1^{k_1} \Gamma(k_1)} e^{-\frac{t}{\alpha_1}} + p_2 \frac{t^{k_2-1}}{\alpha_2^{k_2} \Gamma(k_2)} e^{-\frac{t}{\alpha_2}}, \quad t > 0 \quad (2.3)$$

где α_1 , α_2 , k_1 и k_2 – параметры распределения,

p_1 и p_2 – доли первой и второй компонент, соответственно.

В таблице 2.4 приведены численные значения параметров модели.

Таблица 2.4 – Значения параметров модели

Параметр	Ед. измерения	Значение
α_1	1/с	$16,0 \cdot 10^{-7}$
α_2	1/с	$37,0 \cdot 10^{-7}$
k_1	-	60,0
k_2	-	43,0
p_1	-	0,49
p_2	-	0,51

На рисунке 2.20 приведена эмпирическая гистограмма распределения размера пакета.

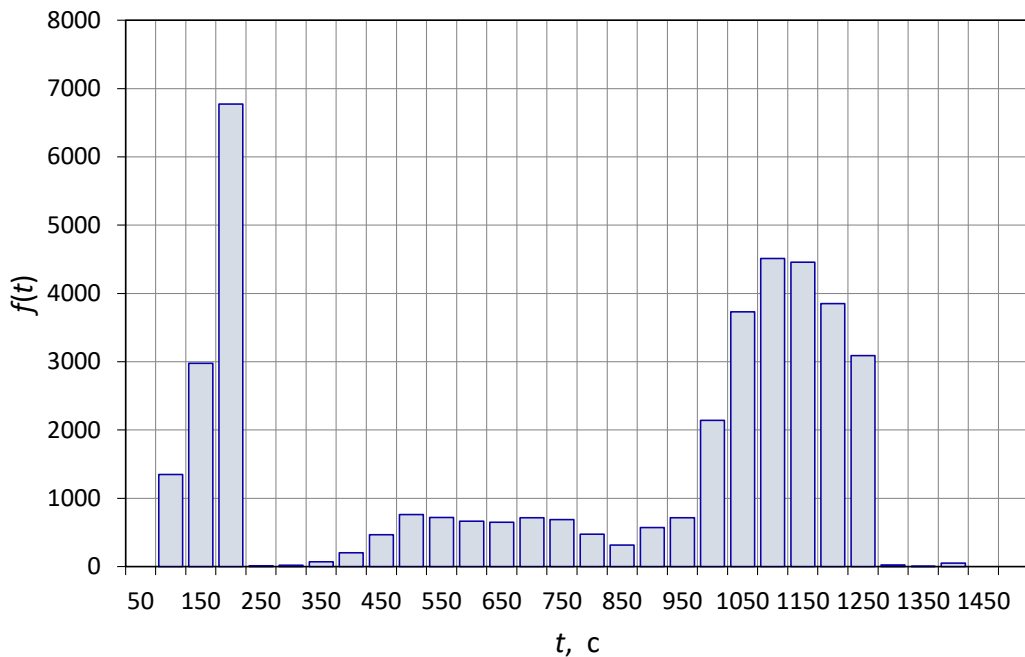


Рисунок 2.20 – Эмпирическая гистограмма размера пакета потока трафика видеоконференцсвязи Google Meet

Из приведенной гистограммы видно, что распределение размера пакета также бимодальное. Моды равны 200 байт и 1100 байт, соответственно.

Для более полной характеристики трафика как случайного процесса были исследованы его фрактальные свойства. Для этого была произведена оценка параметра Хёрста.

На рисунке 2.21 приведена иллюстрация оценки параметра Хёрста методом анализа изменения дисперсии.

В результате оценки было получено значение $H=0,62$.

Полученное значение говорит о том, что данный трафик можно отнести к самоподобным процессам, однако величина параметра Хёрста значительно меньше значений, характерных для трафика услуг передачи видео в современных сетях связи (0,7...0,9).

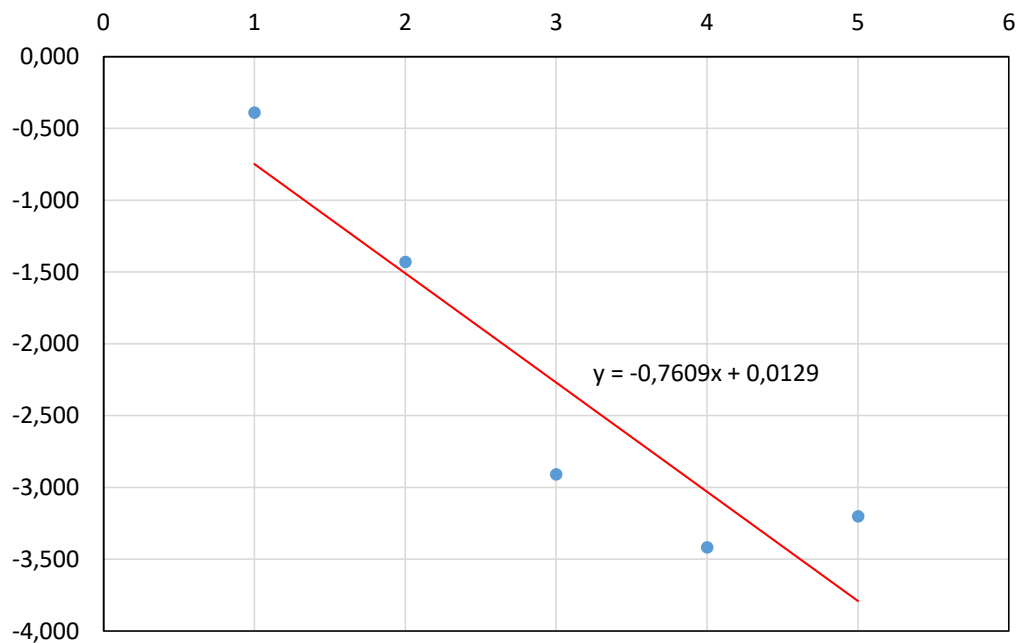


Рисунок 2.21 – Оценка параметра Хёрста методом анализа дисперсии

В таблице 2.5 приведены значения основных параметров трафика видеоконференцсвязи для приложений Zoom и Google Meet.

Таблица 2.5 – Значения параметров модели

Параметр	Ед. измерения	Значение	
		Zoom	Google Meet
Средняя интенсивность трафика	Мбит/с	1,13	0,93
Средний размер пакета	Байт	856,00	760,0
Интенсивность пакетов	Пакетов/с	173,09	152,60
Коэффициент вариации интервала времени между пакетами	-	1,18	1,53
Коэффициент вариации размера пакета	-	0,50	0,56
Параметр Хёрста	-	0,61	0,62

Полученные результаты показывают близость численных значений параметров трафика обоих приложений видеоконференцсвязи. Оба приложения производят трафик с интенсивностью около 1 Мбит/с со средней длиной пакета около 800 байт и интенсивностью пакетов около 160 пакетов/с.

Коэффициенты вариации интервалов времени между пакетами не превышают 1,6, что меньше, чем у других услуг передачи видео. Коэффициент вариации размера пакета составляет 0,5 для обоих приложений. что говорит от том, что это не «тяжелый» вид трафика для сети связи.

2.3 Выводы

Приведенный анализ достаточно большого объема данных показывает, что в период введения мер предотвращения распространения коронавирусной инфекции отмечается резкий рост трафика в сетях связи. Этот рост происходит как в сетях подвижной связи и беспроводного доступа, так и в сетях фиксированной связи.

Происходит рост интенсивности трафика и количества пользователей услуг, ориентированных на удаленную работу. В первую очередь, это услуги видеоконференцсвязи, услуги облачных хранилищ данных, услуги виртуальных частных сетей (VPN), услуги голосовой связи, услуги виртуализации рабочих столов (VDI). Также в период упомянутых мероприятий отмечается рост трафика видеоигр, доступа видеоконтенту, а также к услугам социальных сетей.

Наибольшая доля прироста трафика, обусловлена приростом трафика услуги видеоконференцсвязи, так как они создают относительно высокую интенсивность трафика, а также их трафик является симметричным с точки зрения загрузки восходящего (upstream) и нисходящего (downstream) каналов.

Начало интенсивного роста нагрузки на сети связи коррелировано с моментами введения карантинных мер в различных странах.

Анализ статистики изменения трафика показал, что наиболее высокие всплески трафика характерны для стран с менее развитой инфокоммуникационной системой. Так для США средний прирост трафика составил около 25-35%, для Европы 30-40%, а в Мексике он достигал 100%.

Из проведенного анализа можно сделать вывод, что наиболее вероятным для России, в данной ситуации, является возрастание интенсивности трафика до 35-45%.

3 Оценка допустимых численных характеристик деградации качества обслуживания в период пандемии и подобных явлений

Проблемы функционирования сетей связи в чрезвычайных ситуациях изложены в [24,25]. Существует также ряд фундаментальных работ [26,27], в которых для сетей связи в чрезвычайных ситуациях используются современные технологии Интернета Вещей. Во всех этих трудах рассматриваются, в первую очередь, чрезвычайные ситуации техногенного характера. В таких случаях чрезвычайная ситуация обладает двумя свойствами: она локализована на части территории страны и длительность чрезвычайной ситуации, как правило, не превышает нескольких суток. При воздействии же пандемии на сеть связи последняя должна функционировать с заданными требованиями по качеству обслуживания и качеству восприятия в течение существенно более длительного периода, возможно исчисляемого месяцами. Поэтому, рассмотренные задачи являются принципиально разными, и в случае пандемии речь идет, скорее всего, о переходе сети связи в новый достаточно долговременный режим функционирования с новыми требованиями по качеству обслуживания и качеству восприятия.

Такие задачи в последнее время не рассматривались. Хотя в эпоху развитой телефонной сети Международный Союз Электросвязи (в то время еще Международный Консультативный Комитет по Телефонии и Телеграфии – МККТТ) с целью защиты интересов операторов связи в нештатных ситуациях разработал рекомендацию E.500 [28], в которой были приведены требования по определению нормальной нагрузки и перегрузок. В качестве периода нормальной нагрузки выбирались 30 наиболее нагруженных дней за год измерений нагрузки, а в качестве перегрузки рассматривались 5 наиболее нагруженных дней. Для определения наиболее нагруженных дней использовалось понятие часа наибольшей нагрузки ЧНН [29]. При этом в наблюдениях не учитывались праздники, выходные дни и т.п. Для пяти наиболее нагруженных дней устанавливались более простые требования по качеству обслуживания. Последнее было определено в рекомендации E.520, в соответствии с которой потери для международной связи в период 5 самых нагруженных дней могли превосходить потери для периода нормальной нагрузки в 7 раз [30]. Следует заметить, что, к сожалению, в дальнейшем рекомендация E.500 в 1998 году была модифицирована [31] и отмеченные в ней требования исключили, хотя рекомендация E.520 действует и по сей день.

В настоящее время с учетом изложенного выше создание рекомендации МСЭ-Т по определению периода, в течение которого требования по качеству обслуживания могут быть изменены в сторону смягчения, и определению значений показателей качества обслуживания, а возможно и качества восприятия, для такого периода представляется целесообразным на фоне происходящей до сих пор пандемии коронавируса. При этом длительность периода может быть согласована и со Всемирной организацией здравоохранения (ВОЗ).

Важно отметить также, что приходящие на смену существующим сетям связи пятого и последующих поколений [32,33] являются гетерогенными [34,35]. Поэтому важно, чтобы ограничения по качеству обслуживания не исключили бы из обслуживания те приложения, которые не являются приоритетными, но в любом случае имеют право на обслуживание. В практике теории телетрафика нагрузка таких приложений называлась хрупкой (fragile).

Решения, позволяющие обслужить в моменты перегрузок и такую нагрузку, можно найти в [36,37].

3.1 Оценка деградации параметров качества функционирования в условиях роста трафика, вызванного внешними факторами

В подразделе 1.2 были приведены модели основных показателей функционирования сети связи и анализ их зависимости от изменения параметров трафика.

С использованием данных моделей были получены оценки изменения параметров функционирования при условии возрастания интенсивности трафика на величину до 50%, а также оценки изменения параметров функционирования при возрастании трафика на среднюю величину прироста, которая имела место в период пандемии. Оценки получены для типовых значений использования пропускной способности каналов связи.

При получении оценок было принято допущение о том, что сохраняются вероятностные свойства производимого пользователями трафика. Большинство моделей, приведенных в разделе 2, учитывают вероятностные свойства трафика через дисперсии (коэффициенты вариации) потока и времени передачи пакетов по каналу. Увеличение численных значений этих характеристик приводит к росту задержки и вероятности потерь. Причиной роста дисперсий может быть, например, увеличение количества различных услуг с различными параметрами потоков и размерами пакетов, приводящие к росту разброса соответствующих характеристик трафика. Доминирующий рост трафика одной из услуг, например, видеоконференцсвязи, вероятнее всего не приведет к такой ситуации. В дополнение к этому можно заметить, что эти параметры для трафика видеоконференцсвязи имеют меньшее значения, чем для традиционного трафика видео и иных современных сервисов.

На рисунке 3.1 приведена зависимость коэффициента прироста величины задержки от интенсивности нагрузки.

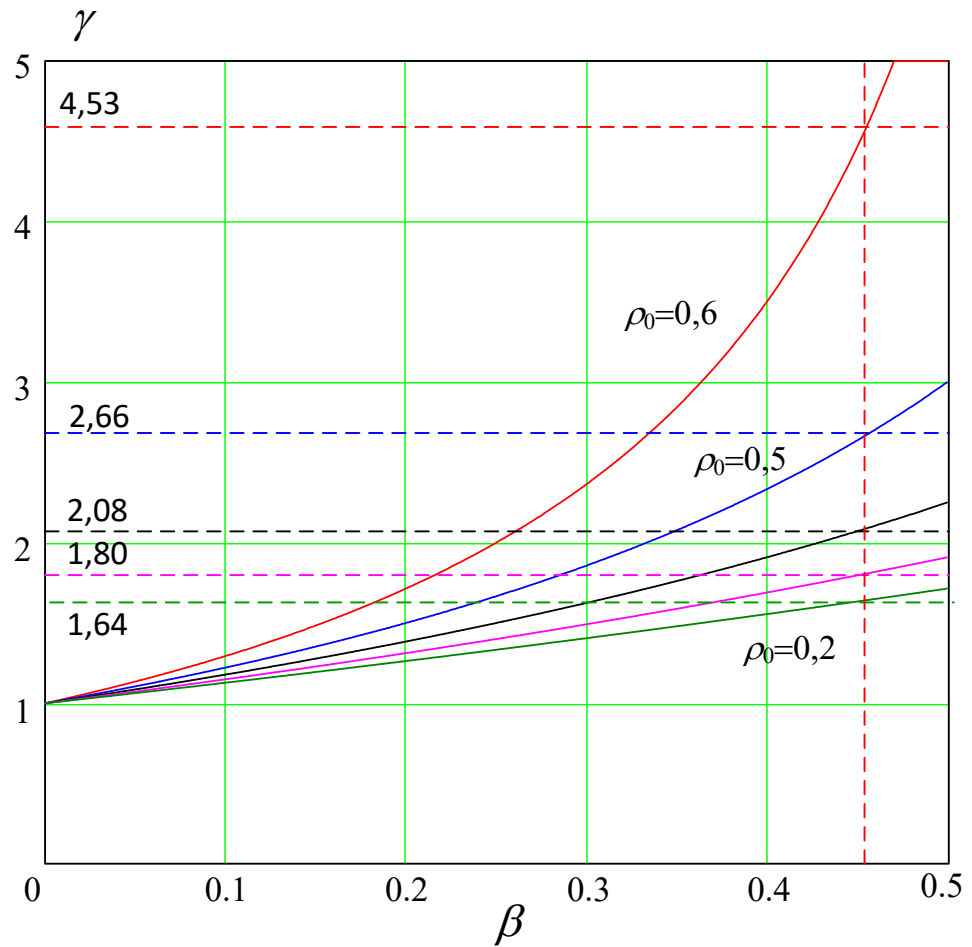


Рисунок 3.1 – Коэффициент изменения величины задержки при увеличении интенсивности трафика от 0 до 50%.

На рисунке 3.2 приведена зависимость величины задержки доставки пакета от прироста интенсивности трафика при различных начальных значениях использования канала и при допущении, что начальное значение задержки составляло 50мс.

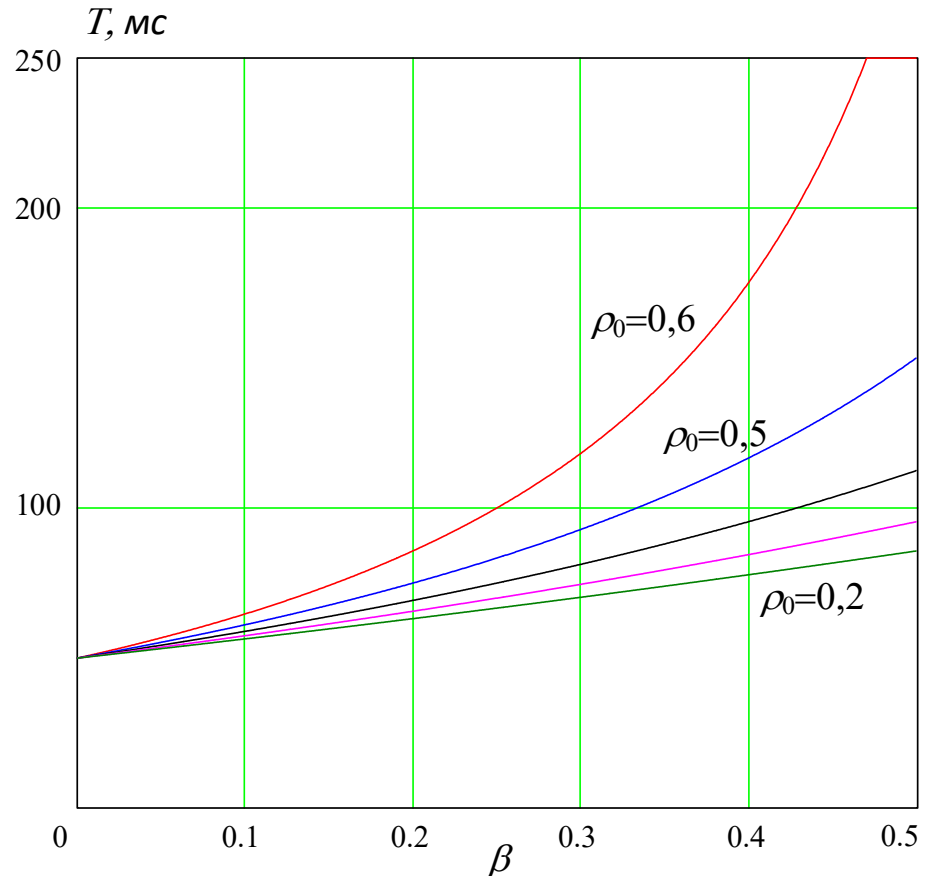


Рисунок 3.2 – Изменение величины задержки при увеличении интенсивности трафика от 0 до 50% (при начальном значении задержки 50мс).

Как видно из приведенных данных, величина задержки увеличивается с увеличением трафика и ее рост зависит от начального состояния канала, т.е. от нагрузки на него (использования) и от начальной величины задержки (при исходной интенсивности нагрузки).

В таблице 3.1 приведены численные значения коэффициента прироста для различных (типовых) начальных значений использования канала, а также результирующее значение задержки, если в начальных условиях она составляла 50мс.

Таблица 3.1 – Зависимость коэффициента изменения задержки и величины задержки (при начальном значении 50мс) и различных начальных значениях использования канала

Прирост интенс. нагрузки %	Коэффициент изменения средней величины задержки при различных значениях использования канала					Средняя величина задержки, мс при различных значениях использования канала				
	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
10	1,13	1,15	1,18	1,22	1,29	113	115	118	122	129
20	1,26	1,31	1,39	1,50	1,71	126	131	138	150	171
30	1,41	1,49	1,63	1,86	2,36	141	149	163	186	236
40	1,56	1,69	1,91	2,33	3,50	156	169	191	233	350
50	1,71	1,91	2,25	3,00	5,00	171	191	225	300	600

Прирост интенс. нагрузки %	Коэффициент изменения средней величины задержки при различных значениях использования канала					Средняя величина задержки, мс при различных значениях использования канала				
	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
60	1,88	2,15	2,67	4,00	5,00	188	215	267	400	1600
70	2,06	2,43	3,19	5,00	-	206	243	319	567	-
80	2,25	2,74	3,86	5,00	-	225	274	386	900	-
90	2,452	3,093	4,75	5	-	245	309	475	1900	-

На рисунке 3.3 приведена зависимость коэффициента прироста вероятности потерь от интенсивности нагрузки.

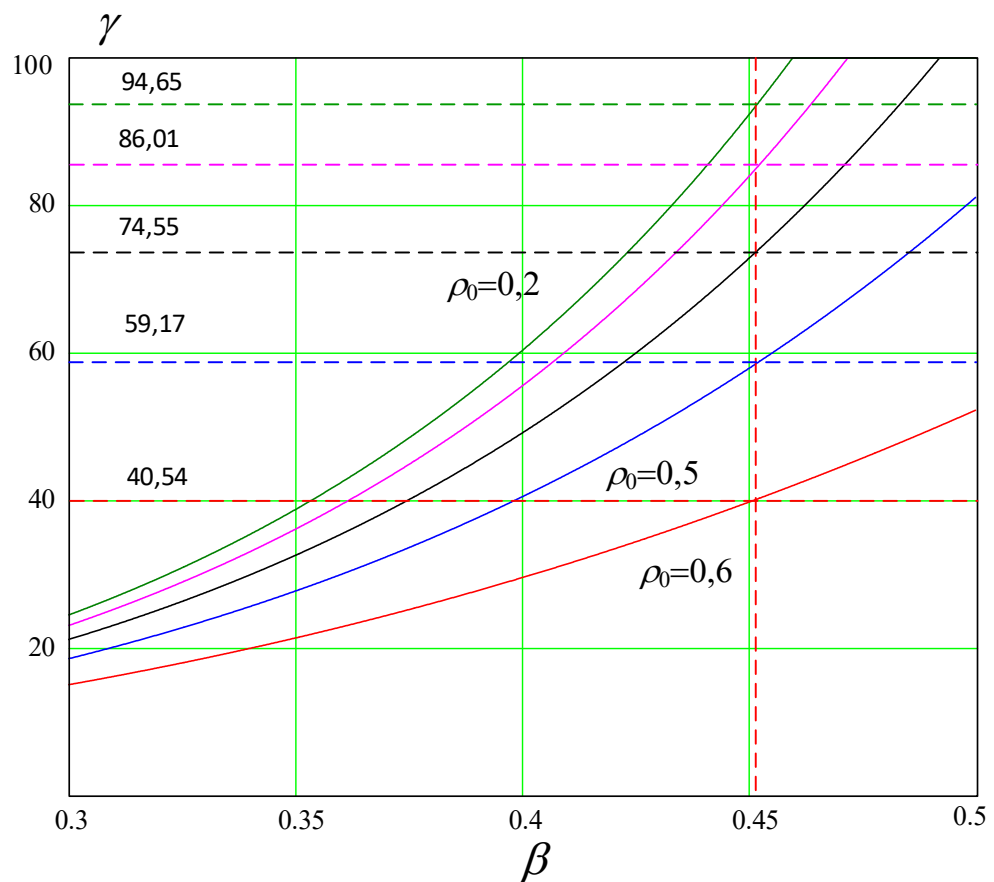


Рисунок 3.3 – Зависимость коэффициент изменения вероятности потерь при изменении интенсивности трафика от 0 до 50%.

Как видно из приведенных данных, вероятность потерь увеличивается с увеличением интенсивности трафика и ее рост также зависит от начального состояния канала, т.е. от нагрузки на него (использования) и от начального значения вероятности потерь (при исходной интенсивности нагрузки).

На рисунке 3.2 приведена зависимость вероятности потерь пакета от прироста интенсивности трафика при различных начальных значениях использования канала и при допущении, что начальное значение вероятности потерь составляло 0,0001.

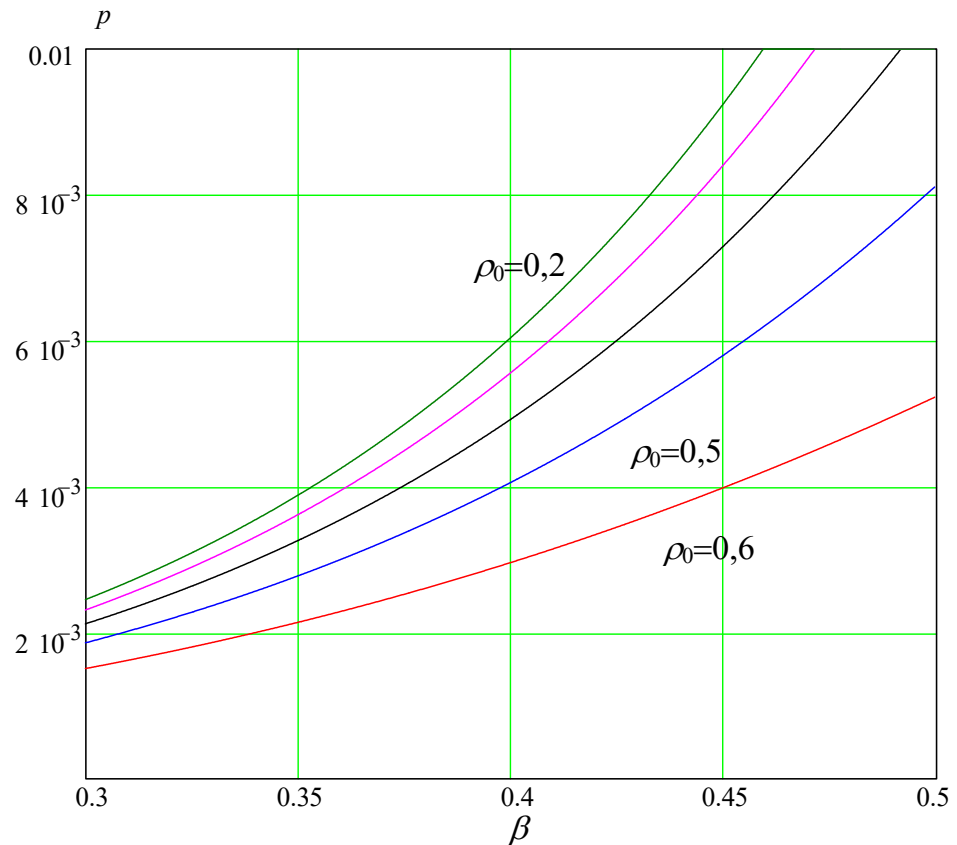


Рисунок 3.4 – Изменение вероятности потерь пакетов при увеличении интенсивности трафика от 0 до 50% (при начальном значении 0,0001).

В таблице 3.2 приведены численные значения коэффициента изменения вероятности потерь для различных (типовых) начальных значений использования канала, а также результирующее значение коэффициента потерь, если в начальных условиях оно составляло $1 \cdot 10^{-6}$.

Таблица 3.2 – Зависимость коэффициента изменения потерь и вероятности потерь пакетов (при начальном значении $1 \cdot 10^{-6}$) и различных начальных значениях использования канала

Прирост интенс. нагрузки %	Коэффициент изменения вероятности потерь при различных значениях использования канала					Вероятность потерь пакетов при различных значениях использования канала				
	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
10	3	3	3	3	3	3,21E-06	3,15E-06	3,07E-06	2,96E-06	2,81E-06
20	9	9	8	8	7	9,28E-06	8,93E-06	8,47E-06	7,82E-06	6,91E-06
30	25	23	21	19	15	2,46E-05	2,32E-05	2,13E-05	1,87E-05	1,51E-05
40	60	56	49	41	30	6,04E-05	5,56E-05	4,92E-05	4,06E-05	2,96E-05
50	139	125	106	81	52	0,00014	0,00013	0,00011	8,11E-05	5,23E-05
60	303	265	214	150	84	0,00033	0,00027	0,00021	0,00015	8,4E-05
70	627	532	407	256	124	0,00063	0,00053	0,00041	0,00026	0,00012
80	1242	1020	733	409	170	0,00124	0,00102	0,00073	0,00041	0,00017
90	2364	1875	1251	611	219	0,00236	0,00188	0,00125	0,00061	0,00022

Приведенные выше данные отражают возможные изменения показателей качества функционирования сети связи для типовых значений использования канала и вероятных изменений интенсивности трафика.

3.2 Допустимые численные характеристики деградации качества обслуживания в период пандемии и подобных явлений

3.2.1 Анализ требований к значениям сетевых параметров

Ниже приведены требования к параметрам функционирования, полученные на основе анализа документа [14]. В рамках технического отчета TR-126 [14] (о качестве восприятия (QoE) технологий «triple play») представлен рекомендуемый минимум для QoE и инженерное руководство для проведения измерений сетевых характеристик для приложений «triple play».

Рекомендации для выбора значений параметров функционирования для услуг SDTV и HDTV

Таблица 3.3. Рекомендуемые минимальные значения параметров транспортного¹ уровня для выполнения QoE для услуги SDTV при кодировании MPEG-2

Скорость передачи данных, Мбит/с	Задержка, мс	Джиттер, мс	Максимальная длительность одиночной ошибки, мс	Период потерь (в IP пакетах)	Интенсивность ошибок (ошибок/час)	Средняя доля потерь пакетов видео потока
3.0	<200	<50	≤16	6	1	≤5.85E-06
3.75	<200	<50	≤16	7	1	≤5.46E-06
5.0	<200	<50	≤16	9	1	≤5.26E-06

¹ Под транспортным уровнем в техническом отчете TR-126 подразумеваются нижние четыре уровня модели OSI

Таблица 3.4. Рекомендуемые минимальные значения параметров транспортного уровня для выполнения QoE для услуги SDTV при кодировании MPEG-4 AVC или VC-1

Скорость передачи данных, Мбит/с	Задержка, мс	Джиттер, мс	Максимальная длительность одиночной ошибки, мс	Период потерь (в IP пакетах)	Интенсивность ошибок (ошибок/час)	Средняя доля потерь пакетов в видео потока
1.75	<200	<50	≤16	4	1	≤6.68E-06
2.0	<200	<50	≤16	5	1	≤7.31E-06
2.5	<200	<50	≤16	5	1	≤5.85E-06
3.0	<200	<50	≤16	6	1	≤5.85E-06

Таблица 3.5. Рекомендуемые минимальные значения параметров транспортного уровня для выполнения QoE для услуги HDTV при кодировании MPEG-2

Скорость передачи данных, Мбит/с	Задержка, мс	Джиттер, мс	Максимальная длительность одиночной ошибки, мс	Период потерь (в IP пакетах)	Интенсивность ошибок (ошибок/час)	Средняя доля потерь пакетов видео потока
15.0	<200	<50	≤16	24	1	≤1.17E-06
17.0	<200	<50	≤16	27	1	≤1.16E-06
18.1	<200	<50	≤16	29	1	≤1.17E-06

Таблица 3.6. Рекомендуемые минимальные значения параметров транспортного уровня для выполнения QoE для услуги HDTV при кодировании MPEG-4 AVC или VC-1

Скорость передачи данных, Мбит/с	Задержка, мс	Джиттер, мс	Максимальная длительность одиночной ошибки, мс	Период потерь (в IP пакетах)	Интенсивность ошибок (ошибок/час)	Средняя доля потерь пакетов видео потока
8	<200	<50	≤16	14	1	≤1.28E-06
10	<200	<50	≤16	17	1	≤1.24E-06
12	<200	<50	≤16	20	1	≤1.22E-06

Рекомендации для выбора значений параметров функционирования для услуги VoIP

Качество восприятия услуг VoIP зависит от совокупности сетевых параметров, задержки, джиттера и потерь пакетов. На рис.3.5 приведена зависимость QoE оценки по R-фактору для различных комбинаций параметров QoS.

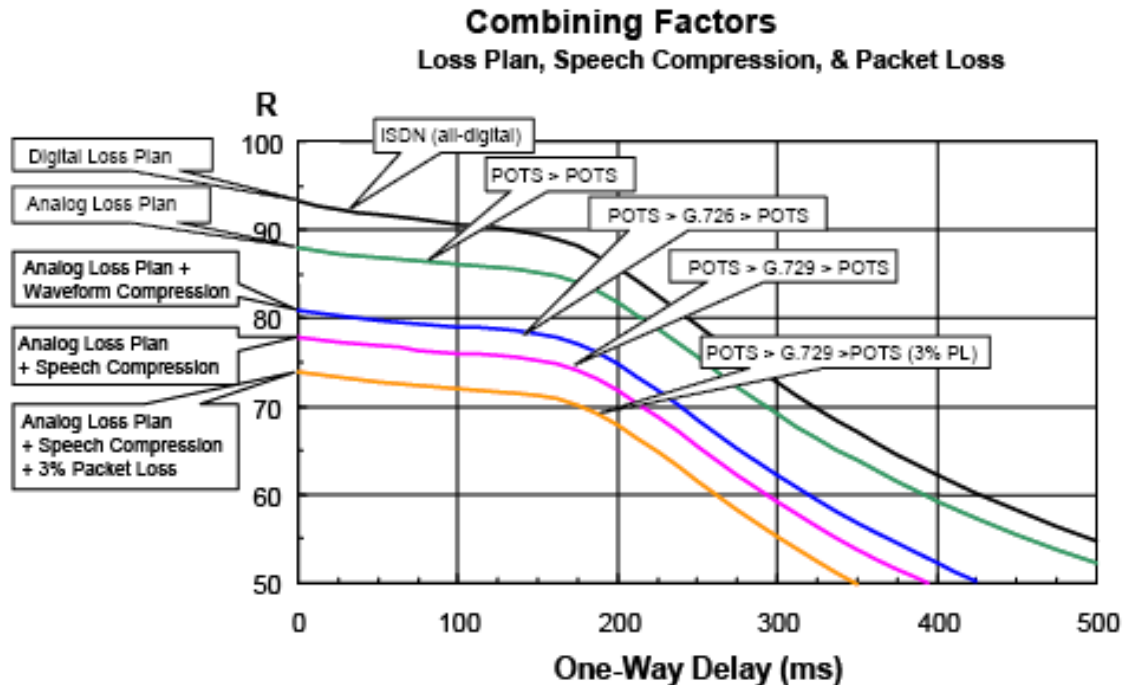


Рисунок 3.5. Зависимость QoE от совокупности задержки и потерь

Из рис.3.5 видно, что начало резкого снижения QoE для различного типа кодеков наблюдается при величине задержки около 150мс. При этом коэффициент потерь составляет 3%.

Таким образом, можно определить величину задержки 150мс, и величину коэффициента потерь 3%, как максимально допустимые на транспортном уровне.

Анализ влияния джиттера на QoE VoIP в техническом отчете (TR-126) не приведен, поэтому целесообразно принять в качестве допустимой, величину, рекомендуемую ITU-TY.1541, равную 50мс.

3.3 Допустимые численные характеристики деградации качества обслуживания в период пандемии и подобных явлений

Анализ возможных колебаний трафика и его влияния на показатели функционирования, а также анализ целевых значений показателей функционирования для ряда современных услуг показали, что рост трафика вследствие событий подобных введению мер противодействия коронавирусной инфекции приводит к ощутимой деградации параметров функционирования. Степень деградации зависит от начального состояния, т.е. от использования канального ресурса сети в нормальной ситуации.

Например, при 50% использовании канала в нормальной ситуации (при задержке равной 100мс и вероятности потерь $1 \cdot 10^{-6}$) 40% рост интенсивности трафика приводит к ощутимому, но не фатальному снижению параметров функционирования: средняя

задержка возрастает до 233мс, а вероятность потерь до $4 \cdot 10^{-5}$. В частности, для услуг передачи речи и видео это приведет лишь к некоторому снижению качества восприятия, но не исключает возможности их предоставления.

В подобной ситуации можно допустить снижение показателей качества обслуживания для различных услуг до уровня значений, приведенных в таблице 3.7.

Таблица 3.7 – Допустимые значения параметров функционирования при влиянии аномальных факторов

Характеристики трафика	Требования к характеристикам НС	
	К. потерь	Задержка мс
Потоковый (VoIP)	$\leq 0,03$	≤ 350
Потоковый (Видео)	$\leq 1 \cdot 10^{-4}$	≤ 350
ПД (WEB, передача фалов, почта и т.д.)	$\leq 1 \cdot 10^{-3*}$	≤ 1000

Приведенные в таблице значения превышают установленные нормативные значения для нормальных условий функционирования по величине задержки в 3,5 раза, а для вероятности потерь на 1-2 порядка.

Необходимо отметить, что выполнение приведенных в таблице значений параметров функционирования сети связи в условиях аномального увеличения интенсивности трафика возможно в том случае, когда текущее состояние по использованию каналов соответствует существующим требованиям. Если в текущем нормальном состоянии нормативы на параметры функционирования выполняются, то в большинстве случаев, приведенные в таблице параметры не будут превышены.

В дополнение к приведенным результатам анализа, следует заметить, что локализация во времени прироста интенсивности трафика в течение суток в большинстве случаев не совпадает с часами (периодами) наибольшей нагрузки [21]. Особенно это выражено для международного трафика из-за разницы в местном времени. Вероятно, что этот эффект также может быть благоприятен и для России, ввиду того что на территории страны находятся 11 временных зон. Это позволяет понизить требования к пропускной способности и избежать блокировки сетей из-за перегрузки.

Следует заметить, что требования к параметрам функционирования, определенные в [12] и [13] ориентированы на услуги передачи речи, видео и данных и не включают новые услуги, реализуемые в рамках развития тактильного Интернета, имеющие повышенные требования к времени доставки данных. В зависимости от требований со стороны подобных услуг, для их реализации в период аномального роста трафика потребуются дополнительные меры, например, приоритетное обслуживание трафика или приостановки.

4 Рекомендации по улучшению качества обслуживания в условиях пандемии и подобных явлений на основе перспективных технологий сетей связи шестого поколения и сетей связи 2030.

Пандемия коронавируса оказала значительное влияние на все отрасли мировой экономики. Естественно, это относится и к отрасли связи. В настоящее время в области сетей и систем связи сосуществуют три концепции развития сетей связи. Это, во-первых, сети связи пятого поколения [38], широкомасштабное внедрение которых намечено на первую половину 20-х годов этого столетия, а также сети связи шестого поколения [39] и сети связи 2030 [40,41].

Прежде всего, на основе [39] и [40] рассмотрим отличия между сетями связи пятого и шестого поколений, а также между сетями 6G и сетями связи 2030. Сети связи 6G имеют следующие основные отличия от сетей 5G/IMT-2020:

- По сверхплотности: 100 устройств на метр кубический (5G/IMT-2020 – 1 устройство на 1 кв.м),
- По задержкам на радиодоступе: 0.1мс (5G/IMT-2020 – единицы мс),
- По пиковой скорости: 100Гбит/с – 1Тбит/с (5G/IMT-2020 – 10Гбит/с),
- По позиционированию: 10см внутри помещений, 1м вне помещений (5G/IMT-2020 – не рассматривалось в качестве основных параметров)
- По надежности: 1 отказ на 1 миллион соединений.

В свою очередь сети связи 2030 как целевая задача отрасли на предстоящее десятилетие отличаются от сетей 6G как численно, так и функционально по следующим показателям:

- Круговые задержки меньше 1мс,
- Пиковая скорость больше 1Тбит/с,
- Сверх высоконадежные сети – коэффициент готовности – 0,999999,
- Недоступность сети – 4мс в сутки,
- Персонализация сети. Одним из самых перспективных приложений для сетей 2030 является широкое использование и распространение аватаров для воспроизведения и осуществления действий человека, который ими управляет (телеприсутствие),
- Наносети. К 2030 году различные применения наносетей и нановещей должны будут найти широкое применение. Нановещи увеличат еще больше плотность сетей,
- Полновесная реализация концепции Индустрия 4.0 с использованием в сети промышленных гуманоидов,
- Голографические копии человека (оценка потребной скорости в соответствии с [42] составляет 2Тбит/с).

Как видим, внедрение новых услуг для пользователей требует увеличения производительности сетей связи и улучшения их параметров, что само по себе, естественно, будет способствовать улучшению качества обслуживания пользователей, в том числе и в период пандемии и подобных явлений, оказывающих аномальное воздействие на сеть связи.

Все это, конечно же, имеет высокую ценность для противостояния пандемии, но особо стоит отметить все-таки роботы-аватары и голографические копии человека, как средства, не подверженные вирусам, но способные выполнять функции конкретных людей для решения удаленно конкретных задач конкретного человека.

Исходя из сказанного, представляется целесообразным сконцентрировать усилия на работах в области создания сетей связи 2030. Это, конечно, потребует пересмотра концепций построения сети, ее децентрализации [43], замены “медленных” протоколов семейства TCP/IP на новые [44] и решения еще множества научно-технических, экономических и политических задач.

Заключение

По результатам научно-исследовательской работы, приведенным в настоящем отчете, можно сделать следующие выводы и дать соответствующие рекомендации.

Если допустить, что свойства трафика как случайного потока при «экстремальном» росте интенсивности не изменяются, то для оценки влияния прироста трафика на показатели функционирования сети связи можно использовать достаточно простые выражения, полученные в отчете для коэффициентов прироста величины задержки и вероятности потерь. Такое допущение может быть оправдано тем, что рост трафика, как это доказано в отчете, обусловлен доминированием ограниченного набора услуг. Увеличение доли трафика этих услуг ожидаемо не приведет к росту разброса длин пакетов и параметров потока, что могло бы усилить деградацию параметров функционирования.

Приведенный анализ достаточно большого объема данных показывает, что в период введения мер предотвращения распространения коронавирусной инфекции отмечается резкий рост трафика в сетях связи. Этот рост происходит как в сетях подвижной связи и беспроводного доступа, так и в сетях фиксированной связи.

В основном, происходит рост интенсивности трафика и количества пользователей услуг, ориентированных на удаленную работу. В первую очередь, это услуги видеоконференцсвязи, услуги облачных хранилищ данных, услуги виртуальных частных сетей (VPN), услуги голосовой связи, услуги виртуализации рабочих столов (VDI). Кроме того, в период упомянутых мероприятий отмечается рост трафика видеоигр, доступа видеоконтенту, а также к услугам социальных сетей.

Наибольшая доля прироста трафика, обусловлена приростом трафика услуги видеоконференцсвязи, так как они создают относительно высокую интенсивность трафика, а также их трафик является симметричным с точки зрения загрузки восходящего (upstream) и нисходящего (downstream) каналов.

Начало интенсивного роста нагрузки на сети связи коррелировано с моментами введения карантинных мер в различных странах. Анализ статистических данных изменения трафика показал, что наиболее высокие всплески трафика характерны для стран с менее развитой инфокоммуникационной системой. Так для США средний прирост трафика составил около 25-35%, для Европы 30-40%, а в Мексике он достигал 100%.

Из проведенного анализа можно сделать вывод, что наиболее вероятным для России, в данной ситуации, является возрастание интенсивности трафика до 35-45%.

Анализ возможных колебаний трафика и его влияния на показатели функционирования, а также анализ целевых значений показателей функционирования для ряда современных услуг показали, что рост трафика вследствие событий подобных введению мер противодействия коронавирусной инфекции приводит к ощутимой деградации параметров функционирования. Степень деградации зависит от начального состояния, т.е. от использования канального ресурса сети в нормальной ситуации.

В работе приведены рекомендации по допустимым значениям задержки и потерь в условиях воздействия на сеть связи аномальных факторов, которые могут являться основой

для создания новых рекомендаций МСЭ-Т. Эти рекомендации разработаны для услуг по передаче речи, видео, WEB серфинга, передачи файлов, электронной почты.

Допустимые значения превышают установленные нормативные значения для нормальных условий функционирования по величине задержки в 3,5 раза, а для вероятности потерь на 1-2 порядка.

Необходимо отметить, что выполнение допустимых значений параметров функционирования сети связи в условиях аномального увеличения интенсивности трафика возможно в том случае, когда текущее состояние по использованию каналов соответствует существующим требованиям. Если в текущем нормальном состоянии нормативы на параметры функционирования выполняются, то в большинстве случаев допустимые параметры при аномальном воздействии на сеть не будут превышены.

Для противостояния пандемии высокую ценность имеют роботы-аватары и голографические копии человека, как средства, не подверженные вирусам, но способные выполнять функции конкретных людей для решения удаленно конкретных задач конкретного человека. Реализация таких приложений для сетей связи общего пользования предусмотрена в концепции сетей связи 2030 и позволит обеспечить устойчивое функционирование сетей связи в условиях пандемии или других подобных аномальных воздействий на сети связи.

Список литературы

1. OECD Policy Responses to Coronavirus (COVID-19) Keeping the Internet up and running in times of crisis [<https://www.oecd.org/coronavirus/policy-responses/keeping-the-internet-up-and-running-in-times-of-crisis-4017c4c9/>]
2. Internet Traffic and Capacity in Covid-Adjusted Terms [<https://blog.telegeography.com/internet-traffic-and-capacity-in-covid-adjusted-terms>]
3. Network traffic insights in the time of COVID-19 [<https://www.nokia.com/blog/network-traffic-insights-time-covid-19-march-23-29-update/>]
4. Iversen, V. B. (2015). Teletraffic engineering and network planning. DTU Fotonik.
5. Клейнрок, Л. Теория массового обслуживания / Л. Клейнрок. – М. : Машиностроение, 1979. – 432 с.
6. Kramer, W. and M. Langenbach-Belz, "Approximate formulae for the delay in the queueing system GI/G/1," Proceedings of the 8th International Teletraffic Congress, Melbourne, 1976, 235-1/8.
7. Зелигер, Н. Б. Проектирование сетей и систем передачи дискретных сообщений: учебное пособие электротехн. ин-тов связи спец. /Н. Б. Зелигер, О. С. Чугреев, Г. Г. Яновский. — М.: Радио и связь, — 1984. — 175 с.
8. Daily active users (DAU) of the Zoom app on android and iOS devices in the United Kingdom (UK) from January to November 2020 [<https://www.statista.com/statistics/1118860/zoom-daily-active-users-uk/>]
9. The Virus Changed the Way We Internet [<https://www.nytimes.com/interactive/2020/04/07/technology/coronavirus-internet-use.html>]
10. COVID-19 Network Traffic Patterns: A Worldwide Perspective from Our Customers [<https://www.netscout.com/blog/Network-Traffic-in-the-Age-of-COVID-19>]
11. COVID-19: How Cable's Internet Networks Are Performing [<https://www.ncta.com/COVIDdashboard>].
12. Рекомендация ITU-T Y.1541 Network performance objectives for IP-based. 12.2011.
13. Приказ Министерства информационных технологий и связи РФ от 27 сентября 2007 г. № 113 "Об утверждении Требований к организационно-техническому обеспечению устойчивого функционирования сети связи общего пользования".
14. DSL Forum. Technical Report TR-126. Triple-play Services Quality of Experience (QoE) Requirements. 13 December 2006.
15. Technical Report TR-126. Triple-play Services Quality of Experience (QoE) Requirements 13 December 2006 Produced by: Architecture & Transport Working Group.
16. RFC 1242 Benchmarking Terminology for Network Interconnection Devices [<https://tools.ietf.org/html/rfc1242>].

17. RFC 2544 Benchmarking Methodology for Network Interconnect Devices [<https://tools.ietf.org/html/rfc2544>].
18. Рекомендация ITU-T G.1010 Transmission Systems and Media, Digital Systems and Networks. Quality of service and performance. 11/2001.
19. Рекомендация ITU-T G.1080 Transmission Systems and Media, Digital Systems and Networks. Multimedia quality of service and performance – Generic and user-related aspects. 12/2008.
20. Бородин А.С., Сети связи и пандемия / Бородин А.С., Кучерявый А.Е. // Электросвязь. 2020. № 5. С. 8-10.
21. Feldmann A., The Lockdown Effect: Implications of the COVID-19 Pandemic on Internet Traffic. / A. Feldmann, O. Gasser, F. Lichtblau, E. Pujol, I. Poesse, C. Dietzel, D. Wagner, M. Wichtlhuber, J. Tapiador, N. Vallina-Rodriguez, O. Hohlfeld, G. Smaragdakis // IMC '20: Proceedings of the ACM Internet Measurement Conference October 2020 Pages 1–18 [<https://doi.org/10.1145/3419394.3423658>].
22. Кучерявый, А.Е. Тактильный Интернет. Сети связи со сверхмалыми задержками / А.Е. Кучерявый, М.А. Маколкина, Р.В. Киричек // Электросвязь. – 2016. – № 1. – С. 44-46.
23. Кучерявый А.Е., Тактильный Интернет / Кучерявый А.Е., Выборнова А.И. // Сборник научных статей V международной научно-технической и научно-методической конференции «Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании» АПИНО-2016. Том 1. С. 6-11.
24. Леваков А.К. Особенности функционирования телекоммуникационных сетей следующего поколения в чрезвычайных ситуациях. М., ИРИАС, 2012, 107с.
25. Levakov A., Sokolov N. Access to Emerging Services during Overload Traffic Period. LNCS, v.7469, 2012, pp. 424-428.
26. Сарьян В.К., Лутохин А.С., Сущенко Н.А. Сенсорные управляющие сети как новое приложение для сетей следующего поколения. Труды НИИР, №1, 2011, с.20-23.
27. Назаренко А.П., Сарьян В.К., Сущенко Н.А., Лутохин А.С. Использование современных инфокоммуникационных технологий для спасения людей при чрезвычайных ситуациях. Электросвязь, №10, 2014, с.33-36.
28. CCITT Recommendation E.500. Traffic Intensity Measurements Principles. November 1988, Geneva.
29. Лившиц Б.С., Пшеничников А.П., Харкевич А.Д. Теория телетрафика. М., Связь, 224 с.
30. ITU-T Recommendation E.520. Number of Circuits to be Provided in Automatic and /or Semiautomatic Operation, without Overflow Facilities. November 1998, Geneva.
31. ITU-T Recommendation E.500. Traffic Intensity Measurements Principles. November 1998, Geneva.
32. Е.Е.Девяткин, Г.С.Бочечка, В.О.Тихвинский, А.С.Бородин. 6G на старте. Электросвязь, №1, 2020.

33. Кучерявый А.Е. Сети связи 2030 / А.Е.Кучерявый, А.С.Бородин, Р.В.Киричек // Электросвязь. – 2018. - №11. – С.52-56.
34. Е.А.Кучерявый. Разработка и исследование комплекса моделей и методов распределения ресурсов в беспроводных гетерогенных сетях связи. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. МТУСИ, 2018.
35. Andreev S, Gerasimenko M., Galinina O., Koucheryavy Y., Himayat N., Yeh S.-P., Talwar S. Intelligent Access Network Selection in Converged Multi-Radio Heterogeneous Networks. IEEE Wireless Communications, v.21, №6, p.86-96.
36. Е.А.Кучерявый. Управление трафиком и качество обслуживания в сети Интернет. СПб, Наука, 2005.
37. Кучерявый А.Е., Парамонов А.И., Кучерявый Е.А. Сети связи общего пользования. Тенденции развития и методы расчета. М, ФГУП ЦНИИС, 2008.
38. MHD Nour Hindia and all. Interference Cancelation for High-Density Fifth-Generation Relaying Network using Stochastic Geometrical Approach. International Journal of Distributed Sensor Networks, v.15, issue 3, July 3, 2019.
39. K.Leppanen, M.Latva-aho. Key Drivers and Research Challenges for 6G. Fifth ITU Workshop on Network 2030. Geneva, Switzerland, 14-16 October, 2019. <https://www.itu.int/en/ITU-T/Workshops-and-Seminars/2019101416/Pages/programme.aspx>
40. Li,R. Network 2030: Market Drivers and Prospects. First ITU Workshop on Network 2030. New York City, US, October 2, 2018. <https://www.itu.int/en/ITU-T/Workshops-and-Seminars/201810/Pages/Programme.aspx>
41. Yastrebova A., Kirichek R., Koucheryavy Y., Borodin A., Koucheryavy A. Future Networks 2030: Architecture and Requirements. The 10th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems (ICUMT), November 2018, Moscow. Proceedings, 2018.
42. Vega M.T. Towards Truly Immersive Holographic-Type Communication: Challenges and Solutions. 4th ITU Workshop on Network 2030. S.-Petersburg, Russia, May 21-23, 2019. <https://www.itu.int/en/ITU-T/Workshops-and-Seminars/201905/Pages/programme.aspx>
43. Бородин, А.С. Сети связи пятого поколения как основа цифровой экономики / А.С. Бородин, А.Е. Кучерявый // Электросвязь. – 2017. – № 5. – С. 45-49.
44. Xiuli, Z. New IP. The Protocol Framework Towards a Fully Connected, Intelligent World. Sixth ITU Workshop on Network 2030. Lisbon, Portugal, January 13-14, 2020. <https://www.itu.int/en/ITU-T/Workshops-and-Seminars/20200113/Pages/programme.aspx>.