

Университет ИТМО
Факультет программной инженерии и компьютерной
техники

Сети ЭВМ и телекоммуникации
Учебно-исследовательская работа №5
Технологии QoS в компьютерных сетях

Лабушев Тимофей
Группа Р3302

Санкт-Петербург
2020

Цель

Изучение эффективности приоритизации трафика для управления качеством обслуживания (Quality of Service, QoS) в компьютерных сетях.

Задание

Студент кафедры ВТ Университета ИТМО на каникулах собирается поехать на море и при этом планирует использовать планшет как для онлайн-трансляции видео о посещаемых достопримечательностях (т.е. видео по запросу, ВПЗ), так и для одновременного с этими трансляциями разговора с родными и близкими с использованием Skype или любого другого подобного программного обеспечения, генерирующего потоковое видео реального времени. Тарифы на интернет-связь в роуминге на море достаточно высоки, поэтому студент хочет подобрать самый низкоскоростной тариф, который бы обеспечил качественный Skype-разговор при одновременном комфортном качестве онлайн-трансляции.

Полагая, что исходящий интернет-канал на планшете является узким местом при передаче трафика, студент решил настроить в сетевом драйвере планшета различные дисциплины обслуживания, которые обеспечат различные характеристики качества передачи для Skype и ВПЗ трафика при соблюдении требований «ITU-T Y.1541». Требуется найти такую дисциплину обслуживания, при которой требуемая скорость исходящего канала связи будет минимальной. По результатам экспериментов необходимо сравнить особенности исследованных дисциплин обслуживания и выбрать оптимальную из них для поездки на море.

Исходные данные

В качестве платформы для ВПЗ использовалась площадка для вебинаров Webinar.ru.

Размеры буферов $S = 7$ килобайт

Скорость канала связи $N = 7$ Мбит/с

Коэффициент веса более требовательного класса в ДО WFQ $K = 2$

Ход работы

Сбор и анализ трафика

Трафик видеозвонка Skype был собран с помощью программы Wireshark. В ходе его анализа было установлено, что аудио- и видеоданные отправляются по протоколу udp с порта 2769, что было использовано в качестве фильтра:

udp.port == 2769						
No.	Time	Source	Destination	Protocol	Length	Info
1	0.000000000	176.53.227.14	192.168.0.101	UDP	110	1703 → 2769 Len=68
2	0.008575589	192.168.0.101	176.53.227.14	UDP	165	2769 → 1703 Len=123
3	0.019655299	176.53.227.14	192.168.0.101	UDP	113	1703 → 2769 Len=71
4	0.021833459	192.168.0.101	176.53.227.14	UDP	168	2769 → 1703 Len=126
5	0.022783697	176.53.227.14	192.168.0.101	UDP	1114	1703 → 2769 Len=1072
6	0.023327055	176.53.227.14	192.168.0.101	UDP	1114	1703 → 2769 Len=1072
7	0.023327154	176.53.227.14	192.168.0.101	UDP	1114	1703 → 2769 Len=1072
8	0.023327191	176.53.227.14	192.168.0.101	UDP	1114	1703 → 2769 Len=1072
9	0.023327224	176.53.227.14	192.168.0.101	UDP	1114	1703 → 2769 Len=1072
10	0.023793992	176.53.227.14	192.168.0.101	UDP	1114	1703 → 2769 Len=1072
11	0.023794139	176.53.227.14	192.168.0.101	UDP	1114	1703 → 2769 Len=1072
12	0.026863824	192.168.0.101	176.53.227.14	UDP	1198	2769 → 1703 Len=1156
13	0.026885709	192.168.0.101	176.53.227.14	UDP	1198	2769 → 1703 Len=1156
14	0.026892677	192.168.0.101	176.53.227.14	UDP	1198	2769 → 1703 Len=1156
15	0.026898655	192.168.0.101	176.53.227.14	UDP	1198	2769 → 1703 Len=1156
16	0.026904580	192.168.0.101	176.53.227.14	UDP	1195	2769 → 1703 Len=1153
17	0.026912009	192.168.0.101	176.53.227.14	UDP	1206	2769 → 1703 Len=1164
18	0.026921418	192.168.0.101	176.53.227.14	UDP	1206	2769 → 1703 Len=1164
19	0.026931252	192.168.0.101	176.53.227.14	UDP	1206	2769 → 1703 Len=1164
20	0.026940141	192.168.0.101	176.53.227.14	UDP	1203	2769 → 1703 Len=1161
21	0.027332397	192.168.0.101	176.53.227.14	UDP	208	2769 → 1703 Len=166
22	0.028505971	176.53.227.14	192.168.0.101	UDP	1114	1703 → 2769 Len=1072
23	0.040115781	176.53.227.14	192.168.0.101	UDP	115	1703 → 2769 Len=73
24	0.047256329	192.168.0.101	176.53.227.14	UDP	174	2769 → 1703 Len=132
25	0.047785154	192.168.0.101	176.53.227.14	UDP	140	2769 → 1703 Len=98
26	0.058283835	176.53.227.14	192.168.0.101	UDP	1110	1703 → 2769 Len=1068
27	0.058937576	176.53.227.14	192.168.0.101	UDP	1110	1703 → 2769 Len=1068
28	0.058937657	176.53.227.14	192.168.0.101	UDP	1110	1703 → 2769 Len=1068
29	0.058937690	176.53.227.14	192.168.0.101	UDP	1110	1703 → 2769 Len=1068
30	0.058937725	176.53.227.14	192.168.0.101	UDP	1110	1703 → 2769 Len=1068
31	0.059249335	176.53.227.14	192.168.0.101	UDP	1110	1703 → 2769 Len=1068
32	0.059249447	176.53.227.14	192.168.0.101	UDP	1110	1703 → 2769 Len=1068

Рис. 1. Захваченный трафик видеозвонка Skype

При рассмотрении ВПЗ трафика было установлено, что он передается по протоколу TCP на IP-адрес сервера Webinar.ru, что было использовано в качестве фильтра:

tcp && ip.addr == 37.130.192.56					
No.	Time	Source	Destination	Protocol	Length Info
1	0.000000000	37.130.192.56	192.168.0.101	TCP	66 443 → 60000 [ACK] Seq=1 Ack=1 Win=16409 Len=0 TSval=2564720895 TSecr=459238611
2	0.006142365	192.168.0.101	37.130.192.56	SSL	251 Continuation Data
3	0.009369504	192.168.0.101	37.130.192.56	SSL	1187 Continuation Data
4	0.012958222	37.130.192.56	192.168.0.101	TCP	66 443 → 60000 [ACK] Seq=1 Ack=2243 Win=16409 Len=0 TSval=2564720898 TSecr=459238621
5	0.023664338	192.168.0.101	37.130.192.56	SSL	251 Continuation Data
6	0.028138761	37.130.192.56	192.168.0.101	TCP	66 443 → 60000 [ACK] Seq=1 Ack=3549 Win=16409 Len=0 TSval=2564720901 TSecr=459238634
7	0.050300895	192.168.0.101	37.130.192.56	SSL	251 Continuation Data
8	0.062965895	37.130.192.56	192.168.0.101	TCP	66 443 → 60000 [ACK] Seq=1 Ack=3919 Win=16409 Len=0 TSval=2564720911 TSecr=459238651
9	0.068190630	192.168.0.101	37.130.192.56	SSL	251 Continuation Data
10	0.071763862	192.168.0.101	37.130.192.56	SSL	1166 Continuation Data
11	0.078911389	192.168.0.101	37.130.192.56	SSL	1166 Continuation Data
12	0.081799093	192.168.0.101	37.130.192.56	SSL	1166 Continuation Data
13	0.084309028	37.130.192.56	192.168.0.101	TCP	66 443 → 60000 [ACK] Seq=1 Ack=5204 Win=16409 Len=0 TSval=2564720916 TSecr=459238696
14	0.086568424	192.168.0.101	37.130.192.56	SSL	251 Continuation Data
15	0.092131347	192.168.0.101	37.130.192.56	SSL	1167 Continuation Data
16	0.095113072	37.130.192.56	192.168.0.101	TCP	66 443 → 60000 [ACK] Seq=1 Ack=7404 Win=16409 Len=0 TSval=2564720919 TSecr=459238707
17	0.097309918	192.168.0.101	37.130.192.56	SSL	1167 Continuation Data
18	0.102466981	192.168.0.101	37.130.192.56	SSL	1167 Continuation Data
19	0.103855521	192.168.0.101	37.130.192.56	SSL	251 Continuation Data
20	0.105557825	37.130.192.56	192.168.0.101	TCP	66 443 → 60000 [ACK] Seq=1 Ack=8690 Win=16409 Len=0 TSval=2564720921 TSecr=459238714
21	0.115427478	37.130.192.56	192.168.0.101	TCP	66 443 → 60000 [ACK] Seq=1 Ack=10892 Win=16409 Len=0 TSval=2564720924 TSecr=459238725
22	0.129281134	192.168.0.101	37.130.192.56	SSL	251 Continuation Data
23	0.142010470	37.130.192.56	192.168.0.101	TCP	66 443 → 60000 [ACK] Seq=1 Ack=11262 Win=16409 Len=0 TSval=2564720930 TSecr=459238732
24	0.147566446	192.168.0.101	37.130.192.56	SSL	239 Continuation Data
25	0.156419071	192.168.0.101	37.130.192.56	SSL	172 Continuation Data
26	0.165508684	192.168.0.101	37.130.192.56	SSL	236 Continuation Data
27	0.169146003	37.130.192.56	192.168.0.101	TCP	66 443 → 60000 [ACK] Seq=1 Ack=11541 Win=16409 Len=0 TSval=2564720937 TSecr=459238775
28	0.169428717	192.168.0.101	37.130.192.56	SSL	1190 Continuation Data
29	0.169472359	37.130.192.56	192.168.0.101	SSL	132 Continuation Data
30	0.169472457	37.130.192.56	192.168.0.101	SSL	172 Continuation Data
31	0.169510260	192.168.0.101	37.130.192.56	TCP	66 60000 → 443 [ACK] Seq=12835 Ack=173 Win=501 Len=0 TSval=459238797 TSecr=2564720937
32	0.170283656	192.168.0.101	37.130.192.56	SSL	132 Continuation Data

Рис. 2. Захваченный трафик ВПЗ

Анализ распределения межпакетных интервалов и размера пакетов

На основе собранного трафика были получены табличные функции распределения межпакетных интервалов и размеров пакеты. Построим графики функций, на которых по оси X отложены интервалы/размеры пакетов, а по оси Y — значение функции распределения.

Для Skype-трафика:

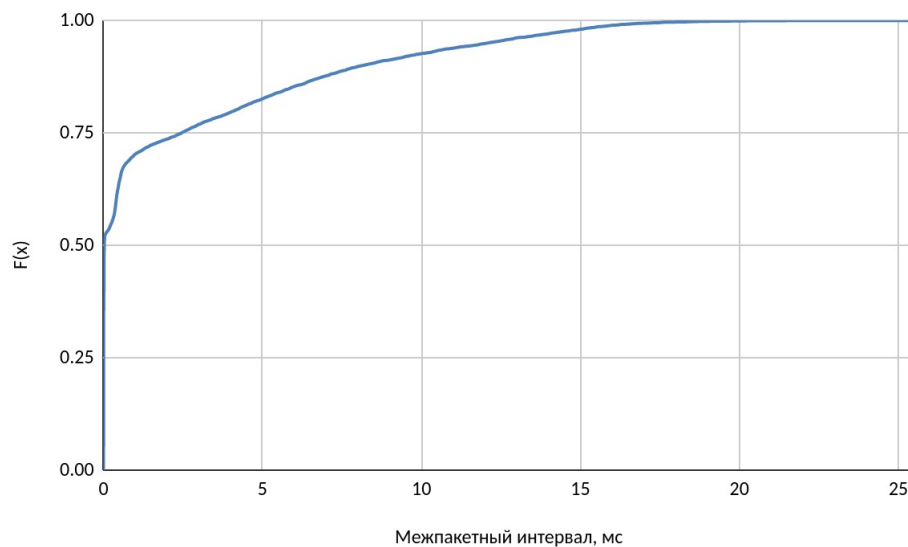


Рис. 3. Функция распределения межпакетного интервала Skype-трафика

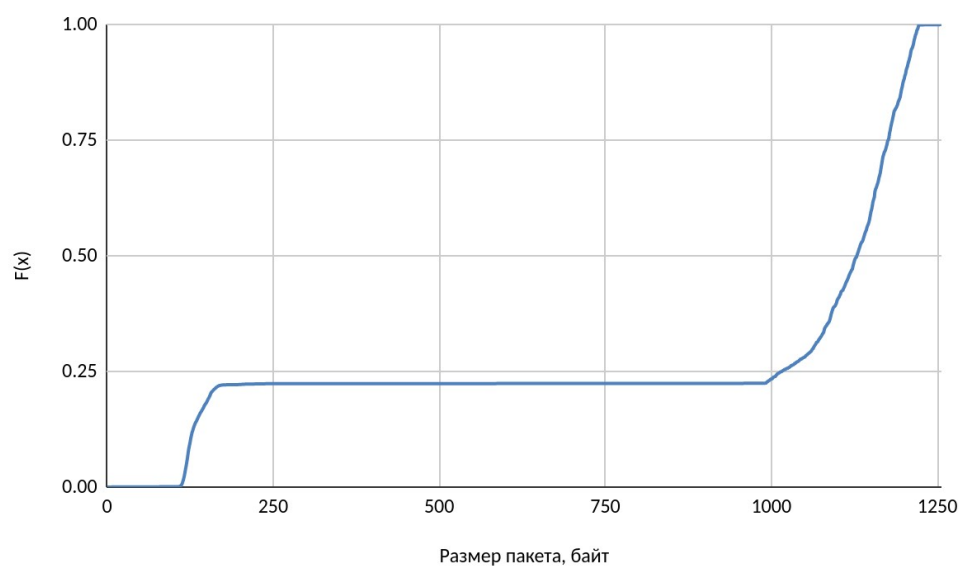


Рис. 4. Функция распределения размера пакетов Skype-трафика

Для трафика Webinar.ru:

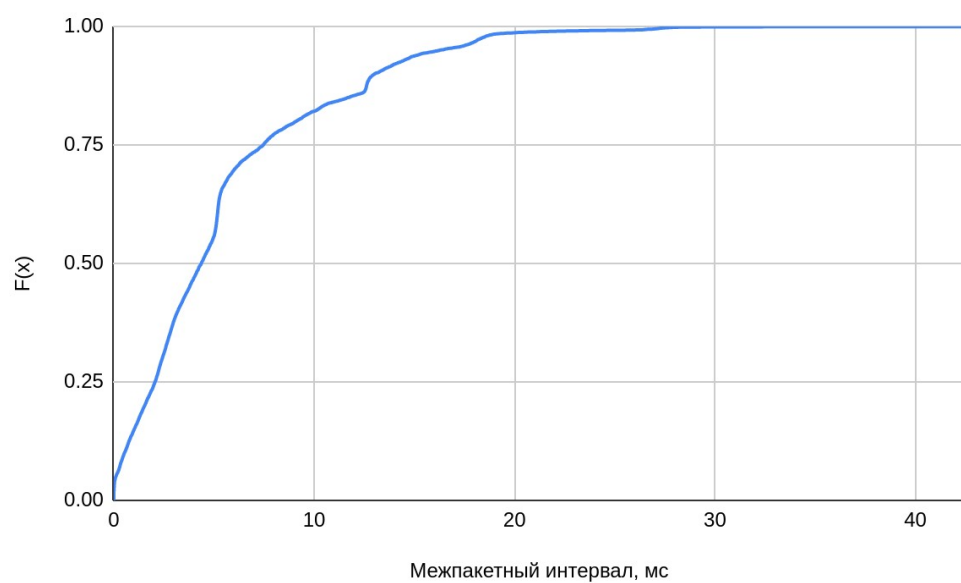


Рис. 5. Функция распределения межпакетного интервала трафика Webinar.ru

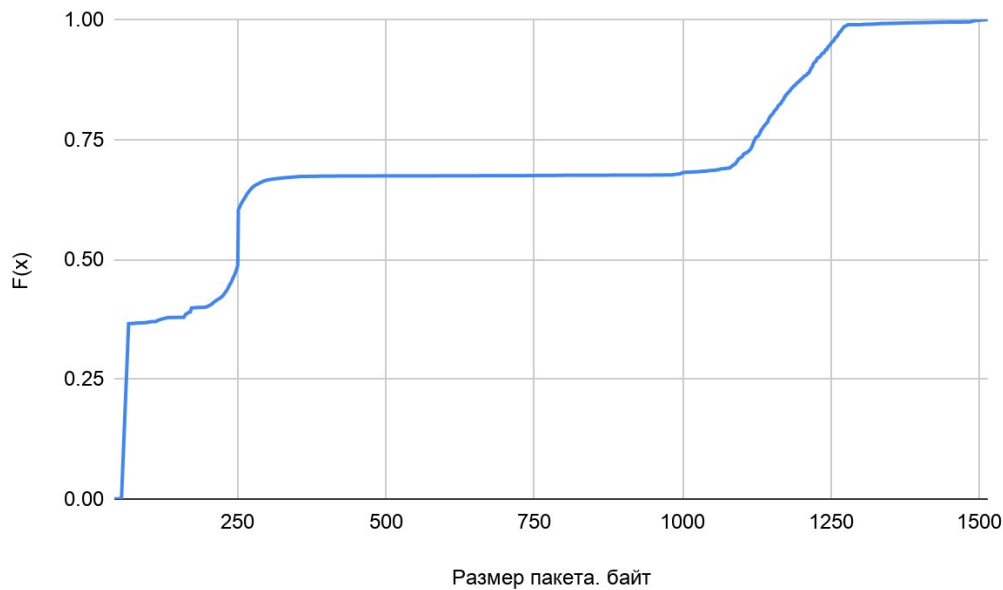


Рис. 6. Функция распределения размера пакетов трафика Webinar.ru

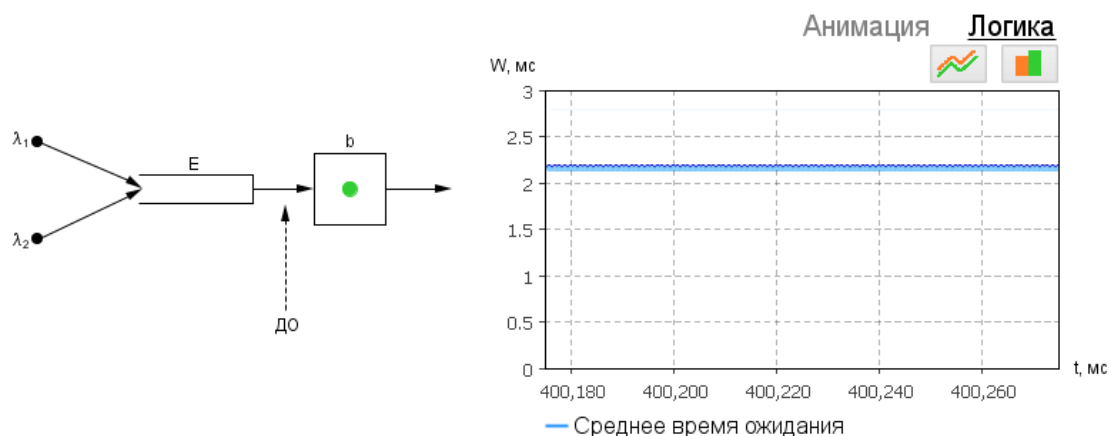
Нахождение минимально возможной пропускной способности

Для дисциплин обслуживания FIFO (БП), PQ (ОП), WFQ (взвешенная справедливая очередь) были проведены эксперименты, в ходе которых постепенно изменялась пропускная способность канала связи до тех пор, пока не будет найдена минимальная, при которой характеристики QoS каждого вида трафика соответствуют нормам ITU-T Y.1541.

Согласно ITU-T Y.1541, для трафика Skype допустима задержка 100 мс, джиттер 50 мс, вероятность потери 0.001 (0.1%). Для ВПЗ трафика допустима задержка 1 с, вероятность потерь 0.001.

FIFO

Для исходных данных ($S = 7$ килобайт, $N = 7$ Мбит/с) с дисциплиной обслуживания FIFO (БП) были получены неудовлетворительные результаты — задержка соответствует нормам, но допустимая вероятность потери значительно превышена:



Параметры

закон распределения интервалов между поступлениями пакетов

T , мин=0.1, мода=0.2, макс=0.3 мс

T , мин=0.3, мода=0.4, макс=0.5 мс

закон распределения размеров пакетов

T , мин=100, мода=728, макс=200 байт

T , мин=45, мода=728, макс=1500 байт

пропускная способность канала связи C , Кбит/с

7,000

дисциплина обслуживания ДО

БП

емкость накопителя E , байт

7,000

Характеристики

загрузка ρ

0.536 +/- 0.002

вероятность потери π

0.06 +/- 1.591E-5

среднее время ожидания W , мс

2.151 +/- 0.009

среднее время пребывания U , мс

3.038 +/- 0.009

текущая длина очереди, пакетов

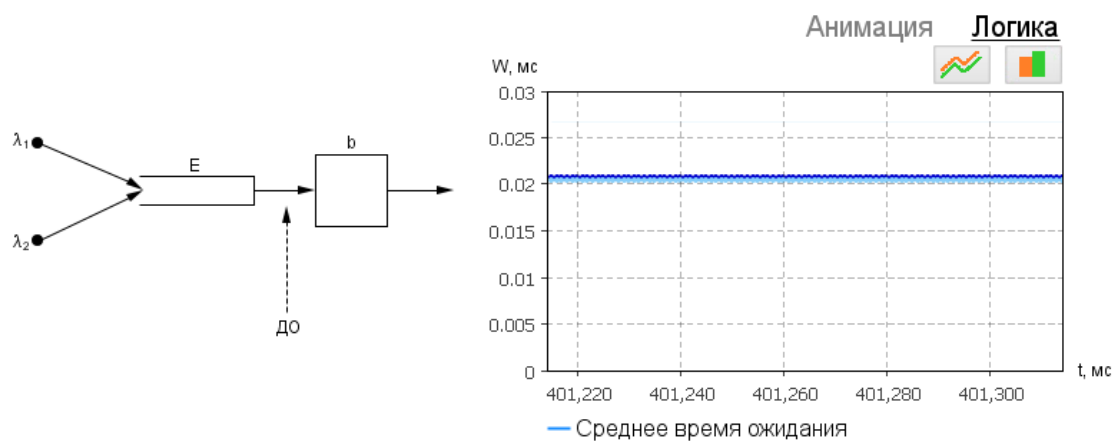
0

средняя длина очереди I , пакетов

1.301 +/- 0.006

Рис. 7. Полученные значения характеристик с ДО FIFO при $N = 7$

В ходе эксперимента было проведено увеличение пропускной способности канала до момента нахождения минимальной скорости $C = 215$ Мбит/с, при которой вероятность потери равна максимально допустимому значению 0.001:



Параметры

закон распределения интервалов между поступлениями пакетов
 T , мин=0.1, мода=0.2, макс=0.3 мс
 T , мин=0.3, мода=0.4, макс=0.5 мс

закон распределения размеров пакетов
 T , мин=100, мода=728, макс=200 байт
 T , мин=45, мода=728, макс=1500 байт

пропускная способность канала связи C , Кбит/с
 215,000

дисциплина обслуживания ДО
 БП

емкость накопителя E , байт
 7,000

Характеристики

загрузка ρ

0.019 +/- 4.21E-4

вероятность потери π

0.001 +/- 5.569E-7

среднее время ожидания W , мс

0.021 +/- 1.432E-4

среднее время пребывания U , мс

0.05 +/- 1.672E-4

текущая длина очереди, пакетов

0

средняя длина очереди l , пакетов

0.013 +/- 5.602E-4

Рис. 8. Полученные значения характеристик с ДО FIFO при $N = 215$

По полученным в ходе эксперимента значениям были построены графики зависимости задержки и вероятности потери от пропускной способности:

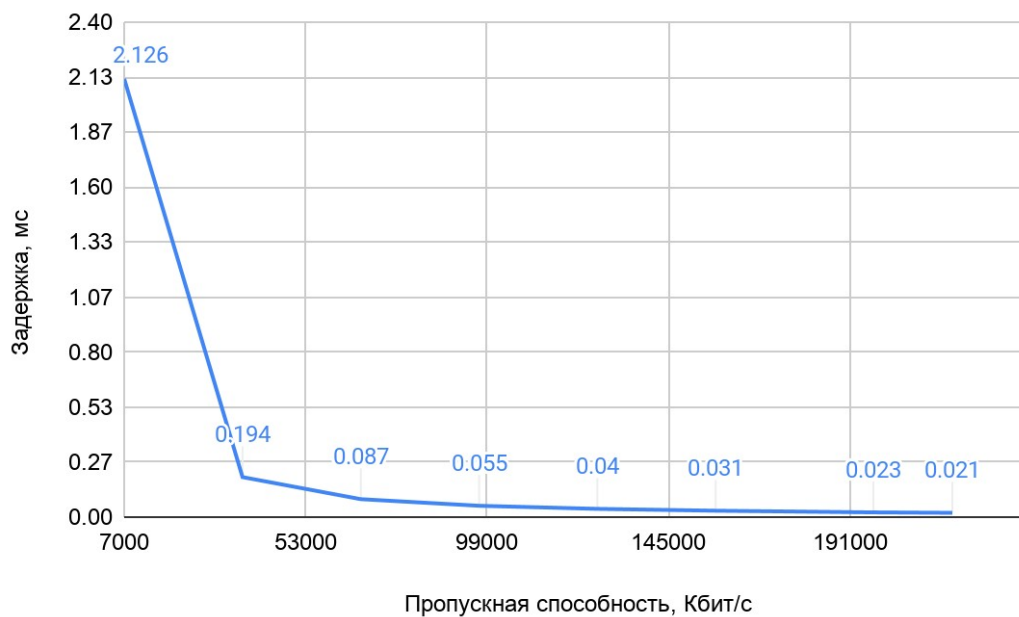


Рис. 9. Зависимость задержки от пропускной способности (ДО FIFO)

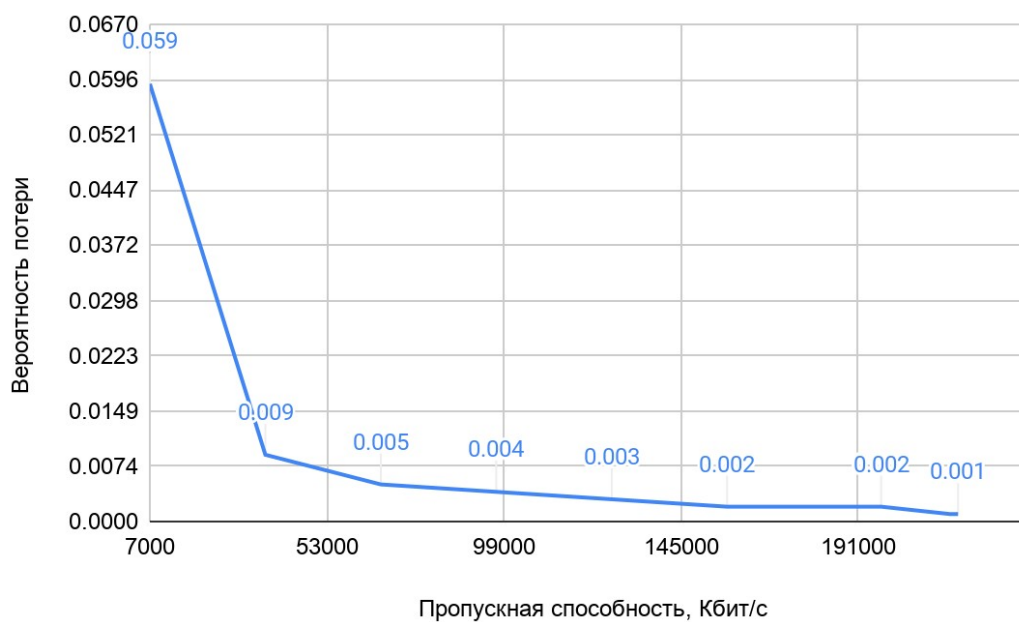


Рис. 10. Зависимость вероятности потери от пропускной способности (ДО FIFO)

Полученные графики позволяют сделать вывод о том, что увеличение пропускной способности влияет на характеристики нелинейно: каждое последующее изменение характеристик требует большего увеличения C .

PQ

Для исходных данных с дисциплиной обслуживания PQ (ОП) также были получены неудовлетворительные результаты (задержка в пределах нормы, но допустимая вероятность потери значительно превышена):

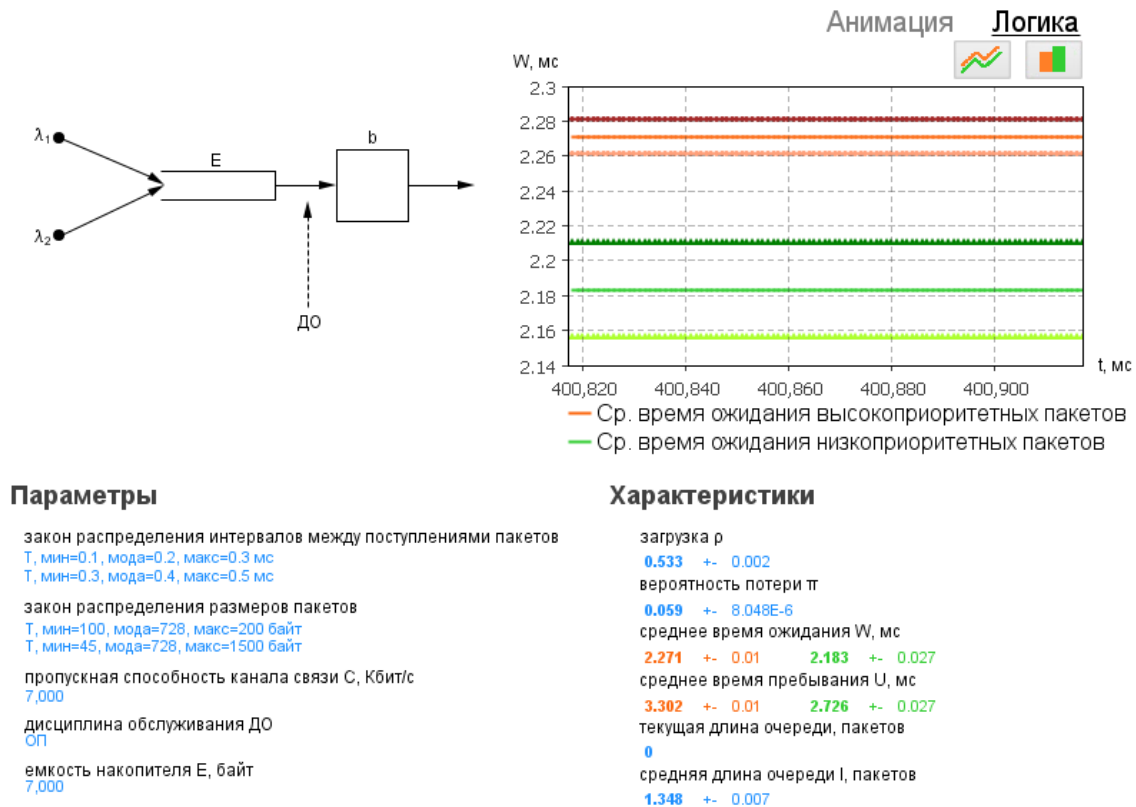
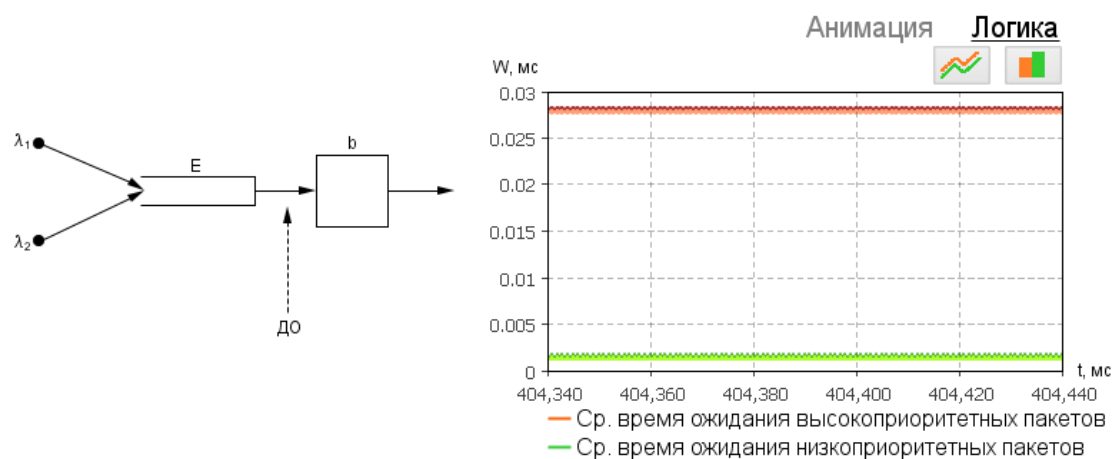


Рис. 11. Полученные значения характеристик с ДО PQ при $N = 7$

В ходе эксперимента было проведено увеличение пропускной способности канала до момента нахождения минимальной скорости $C = 215$ Мбит/с, при которой вероятность потери равна максимально допустимому значению 0.001:



Параметры

закон распределения интервалов между поступлениями пакетов
 T , мин=0.1, мода=0.2, макс=0.3 мс
 T , мин=0.3, мода=0.4, макс=0.5 мс

закон распределения размеров пакетов
 T , мин=100, мода=728, макс=200 байт
 T , мин=45, мода=728, макс=1500 байт

пропускная способность канала связи C , Кбит/с
 215,000

дисциплина обслуживания ДО
 ОП

емкость накопителя E , байт
 7,000

Характеристики

загрузка ρ
 0.019 +/- 4.2E-4
 вероятность потери π
 0.001 +/- 1.002E-6
 среднее время ожидания W , мс
 0.028 +/- 1.836E-4 0.001 +/- 7.655E-5
 среднее время пребывания U , мс
 0.062 +/- 1.968E-4 0.019 +/- 1.541E-4
 текущая длина очереди, пакетов
 0
 средняя длина очереди I , пакетов
 0.013 +/- 5.531E-4

Рис. 12. Полученные значения характеристик с ДО PQ при $N = 215$

По полученным в ходе эксперимента значениям были построены графики зависимости задержки и вероятности потери от пропускной способности:

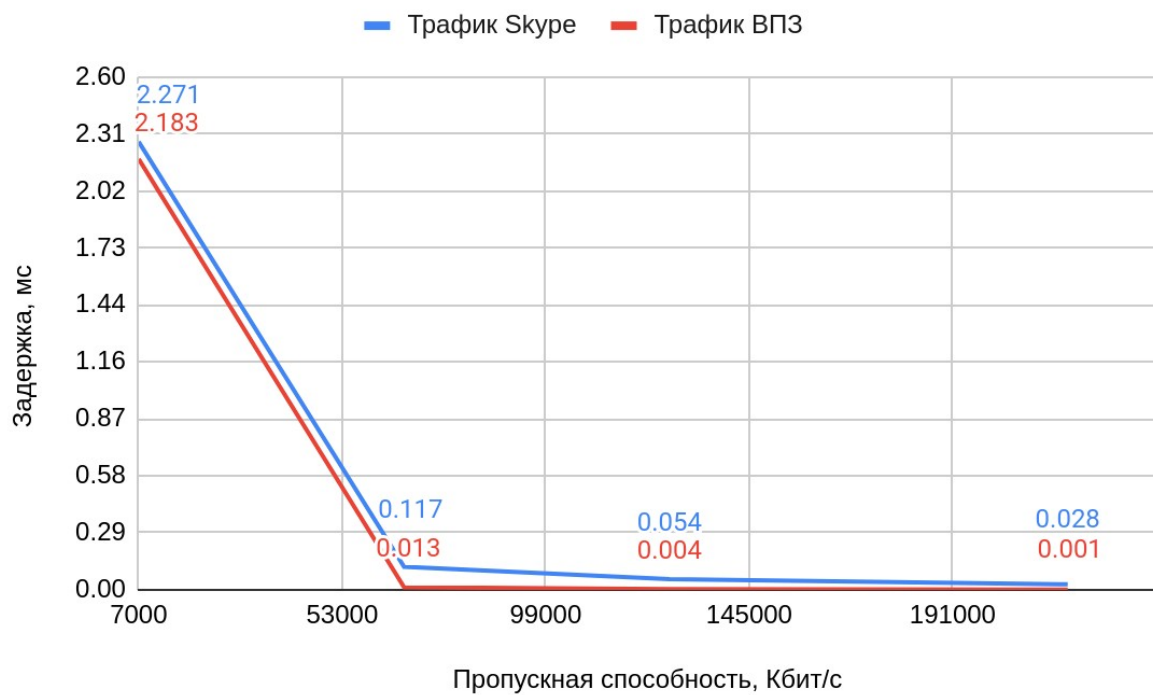


Рис. 13. Зависимость задержки от пропускной способности (ДО PQ)

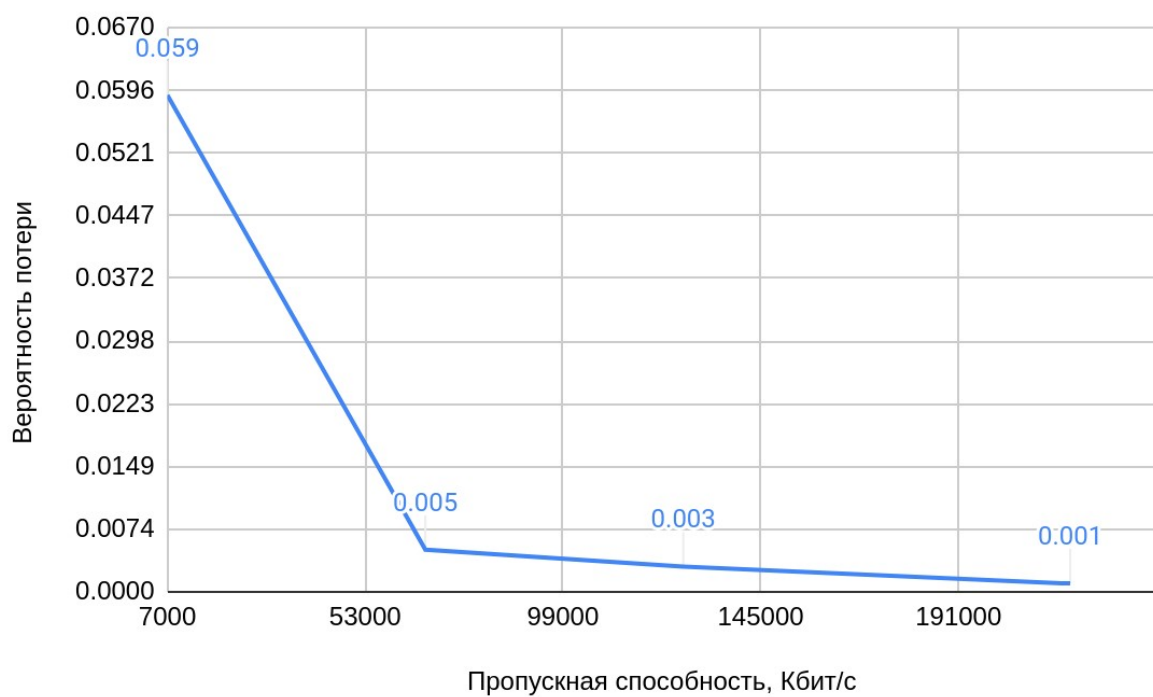


Рис. 14. Зависимость вероятности потери от пропускной способности (ДО PQ)

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что увеличение пропускной способности сильнее отражается на низкоприоритетном трафике: пакеты меньше время находятся в накопителе, ожидая обработку более требовательного трафика.

WFQ

Дисциплина обслуживания WFQ (взвешенная справедливая очередь) подразумевает присвоение каждому классу веса, согласно которому выбираются пакеты для передачи. Согласно варианту, разница между приоритетами $K = 2$, следовательно, более требовательному классу установлен вес $w_1 = 0.67$, а менее требовательному — $w_2 = 0.33$.

Для исходных данных задержка отсутствует, но допустимая вероятность потери значительно превышена:

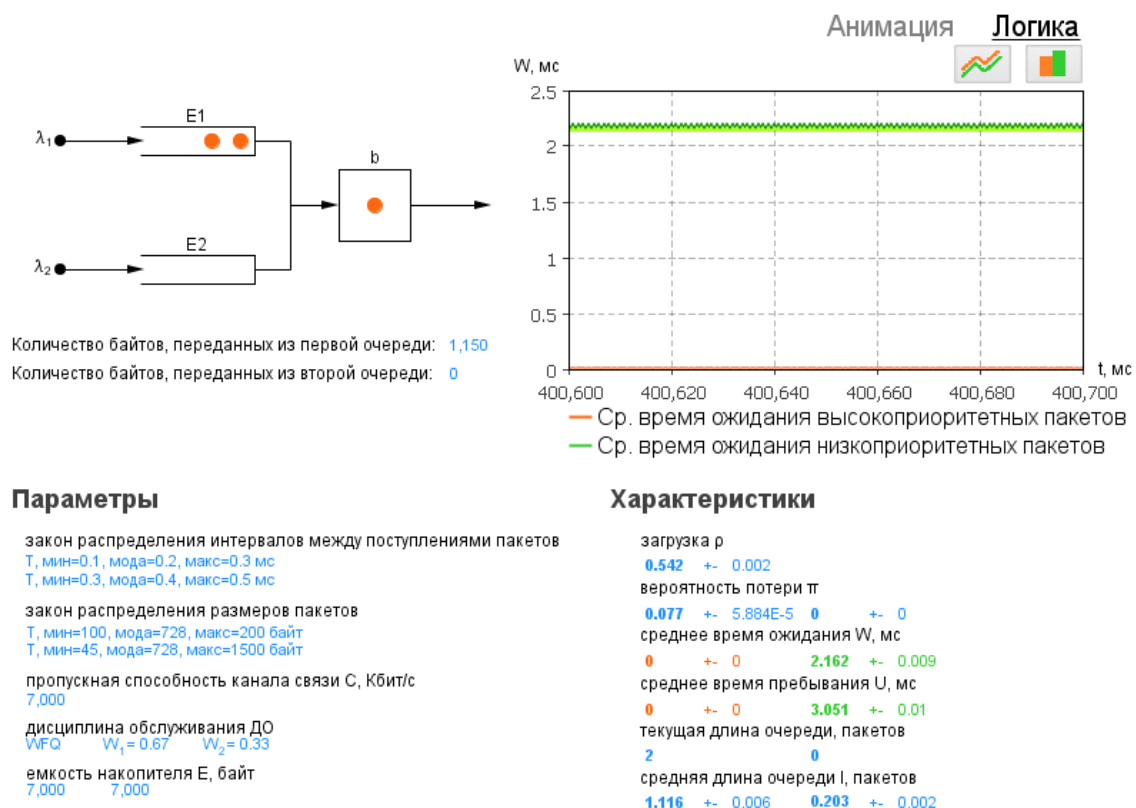


Рис. 15. Полученные значения характеристик с ДО WFQ (0.67/0.33) при $N = 7$

В ходе эксперимента было проведено увеличение пропускной способности канала до момента нахождения минимальной скорости $C = 267\text{Мбит/с}$, при которой вероятность потери равна максимально допустимому значению 0.001:

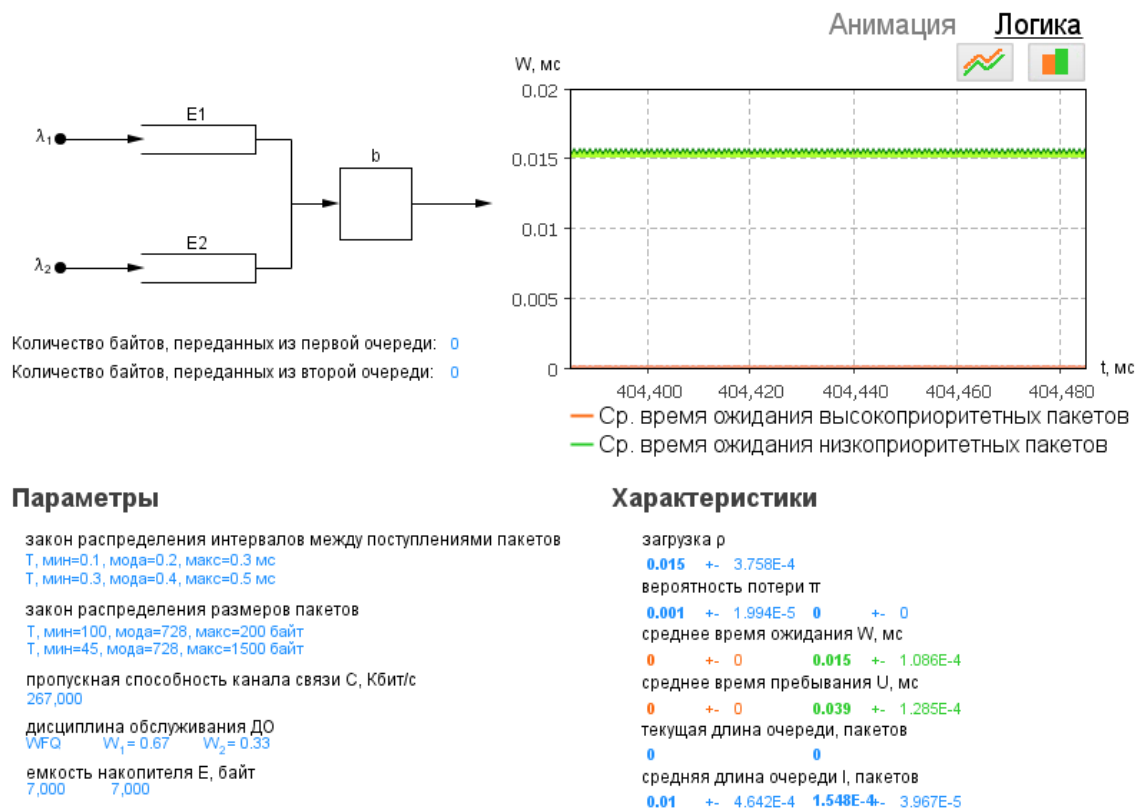
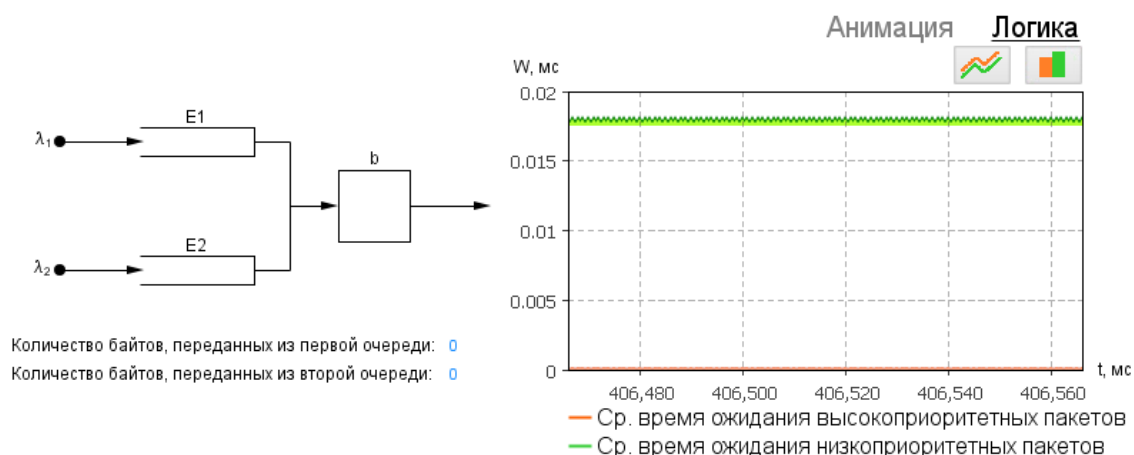


Рис. 16. Полученные значения характеристик с ДО WFQ (0.67/0.33) при $N = 267$

В ходе варьирования весов было установлено, что оптимальным является соотношение $K = 9$ ($w_1 = 0.9$, $w_2 = 0.1$), при котором достаточной является пропускная способность $C = 240\text{Мбит/с}$:



Параметры

закон распределения интервалов между поступлениями пакетов
 T , мин=0.1, мода=0.2, макс=0.3 мс
 T , мин=0.3, мода=0.4, макс=0.5 мс

закон распределения размеров пакетов
 T , мин=100, мода=728, макс=200 байт
 T , мин=45, мода=728, макс=1500 байт

пропускная способность канала связи C , Кбит/с
 240,000

дисциплина обслуживания ДО
 WFQ $WV_1 = 0.9$ $WV_2 = 0.1$

емкость накопителя E , байт
 7,000 7,000

Характеристики

загрузка ρ
 0.017 +/- 3.966E-4

вероятность потери π
 0.001 +/- 1.124E-4 0 +/- 0

среднее время ожидания W , мс
 0 +/- 0 0.018 +/- 1.239E-4

среднее время пребывания U , мс
 0 +/- 0 0.044 +/- 1.456E-4

текущая длина очереди, пакетов
 0 0

средняя длина очереди I , пакетов
 0.011 +/- 5.047E-4 1.847E-4 +/- 4.297E-5

Рис. 17. Полученные значения характеристик с ДО WFQ (0.9/0.1) при $N = 240$

По полученным в ходе эксперимента значениям были построены графики зависимости задержки низкоприоритетного класса (для высокоприоритетного задержка равна 0) и вероятности потери от пропускной способности. На графиках приведены данные для $K = 2$ и $K = 9$:

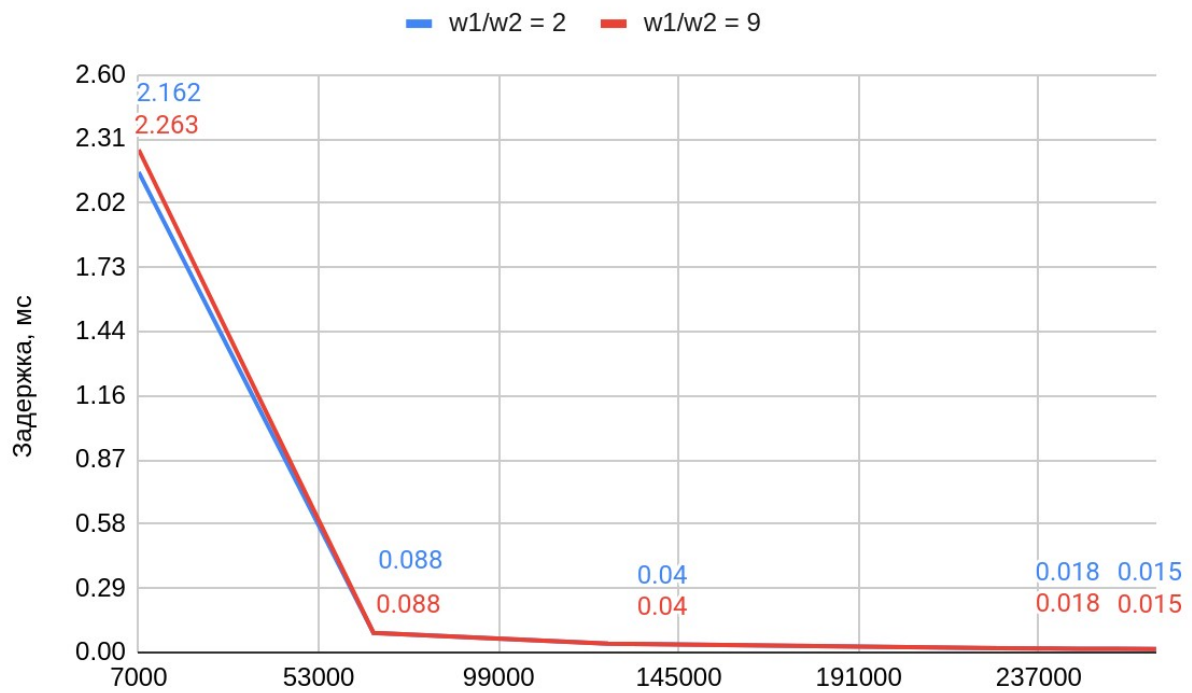


Рис. 18. Зависимость задержки от пропускной способности (ДО WFQ)

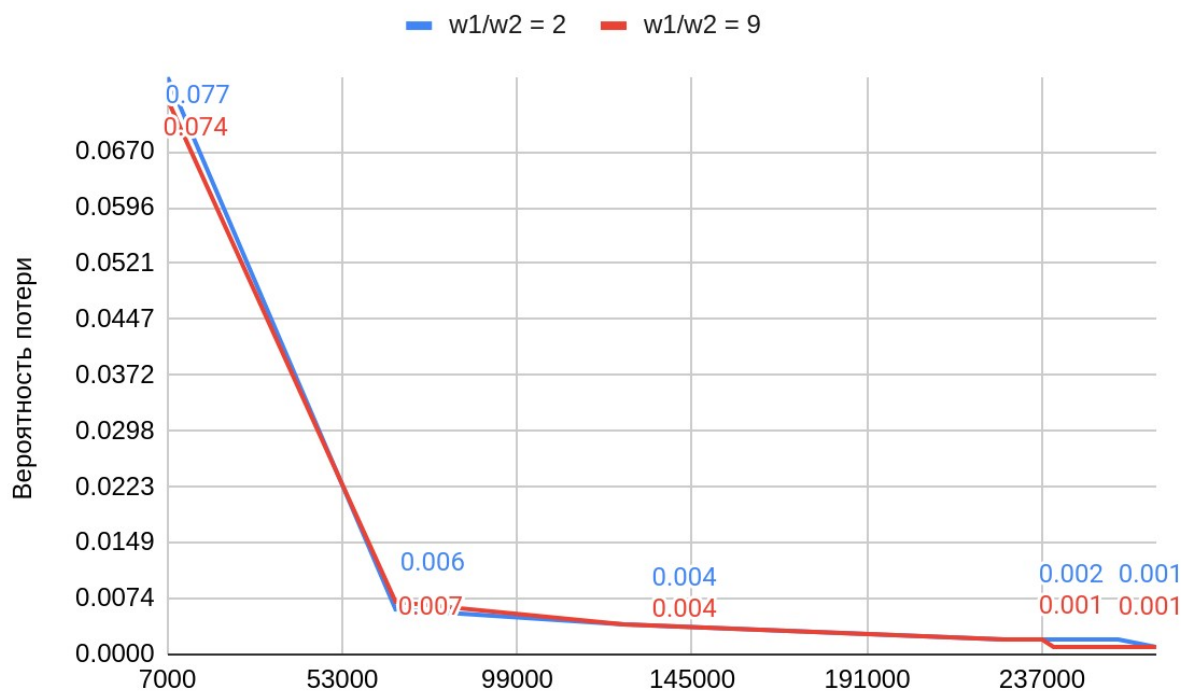


Рис. 19. Зависимость вероятности потери от пропускной способности (ДО WFQ)

Полученные результаты позволяют заключить, что увеличение коэффициента соотношения весов $K = w_1/w_2$ в ДО WFQ позволяет добиться лучших характеристик QoS для более приоритетного трафика.

Выводы

В ходе выполнения работы были рассмотрены три дисциплины обслуживания — FIFO, PQ, WFQ — для каждой из которых была установлена минимально возможная пропускная способность канала связи, при которой характеристики QoS Skype и ВПЗ трафика соответствуют нормам ITU-T Y.1541.

Поскольку задержка в рассмотренных случаях на порядок ниже, чем норма (100 мс для Skype и 1000 мс для ВПЗ), при сравнительном анализе ДО рассматривается только пропускную способность, которую по условию работы необходимо найти минимально возможную:

Таблица 1. Сравнение ДО

	FIFO	PQ	WFQ
Мин. пропускная способность, Кбит/с	215000	215000	240000
Задержка Skype, мс	0.021	0.028	0
Задержка ВПЗ, мс		0.01	0.018

В ходе работы было установлено, что при исходном размере буфера S равным 7 килобайт соответствующая нормам конфигурация требует канала с пропускной способностью не менее 215Мбит/с, что на практике труднодостижимо и экономически не целесообразно. При решении реальной задачи это может указывать на необходимость пересмотреть изначальное предположение о том, что единственным узким местом системы является пропускная способность канала.

Дисциплина обслуживания WFQ, хотя и обеспечивает наименьшую задержку трафика Skype, является более требовательной к пропускной способности в данной конфигурации, поэтому не может считаться оптимальной.

Сравнивая дисциплины обслуживания FIFO и PQ, можно отметить, что в проведенных экспериментах разница между ними уменьшалась по мере увеличения пропускной способности. FIFO имеет существенный недостаток в том, что трафик не делится на классы, что может привести к недопустимому возрастанию потери более требовательного трафика

при перегрузках. Таким образом, оптимальной дисциплиной обслуживания будем считать RQ.