

**МИНИСТЕРСТВО ЦИФРОВОГО РАЗВИТИЯ, СВЯЗИ И МАССОВЫХ
КОММУНИКАЦИЙ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ ФЕДЕРАЛЬНОЕ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ ИМ.
ПРОФ. М.А. БОНЧ-БРУЕВИЧА» (СПбГУТ)**

**ФАКУЛЬТУТ ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫХ СЕТЕЙ И СИСТЕМ
КАФЕДРА СЕТЕЙ СВЯЗИ И ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ**

Курсовой проект по теме: «Расчёт пропускной способности линий связи»

Дисциплина: «Математические модели в сетях связи»
Вариант

Выполнил:

Студент группы ИКПИ-

Подпись _____

Принял:

к.т.н., доцент кафедры СС и ПД
Гребенщикова А. А.

Подпись _____

Санкт-Петербург

2025 г.

Оглавление

1.	Введение	3
1.1.	Цель.....	3
1.2.	План выполнения работы	3
1.3.	Входные данные	3
2.	Расчет интенсивности производимого в узлах сети трафика	5
3.	Расчет коэффициентов распределения трафика по направлениям связи	6
4.	Расчет интенсивности трафика в направлениях связи	6
5.	Расчет кратчайших маршрутов между узлами сети	7
6.	Расчет интенсивности нагрузки на линиях связи.....	8
7.	Расчет количества потоков в линиях связи.....	9
8.	Расчет интенсивности трафика ПД для линий связи	10
9.	Расчет пропускной способности линий связи	11
10.	Оптимизация пропускной способности линий связи	11
11.	Выводы	13

1. Введение

1.1. Цель

Цель работы: рассчитать требуемые пропускные способности линий связи с заданными структурными параметрами для достижения поставленных требований. Оптимизировать пропускные способности линий связи для достижения необходимого целевого значения задержки

1.2. План выполнения работы

С целью достижения поставленной задачи, необходимо будет рассчитать интенсивность трафика, производимого в узлах связи. Исходя из полученных данных рассчитать коэффициенты распределения и интенсивность трафика по направлениям связи.

Рассчитать кратчайшие маршруты между узлами связи, и исходя из имеющихся данных рассчитать интенсивности нагрузки на линиях связи.

Рассчитать число потоков в линиях связи для выполнения поставленных требований к качеству обслуживания.

Рассчитать интенсивности трафика и пропускной способности передачи данных для линий связи.

Затем необходимо оптимизировать сеть связи для достижения целевого значения задержки.

1.3. Входные данные

n – число узлов. y_0 – интенсивность нагрузки, создаваемая одним абонентом. L – длина пакета. a_0 – скорость передачи данных в потоке. T_0 – требуемое значение задержки. q – процент обслуженных заявок

$$n = 20$$

$$y_0 = 0,1$$

$$L = 200 \text{ байт}$$

$a_0 = 85600$ бит/с

$T_0 = 0,1$ с

$q = 98\%$

На рисунке 1 представлено распределение абонентов по узлам связи

n	Абонентов
1	1514
2	5792
3	3670
4	4334
5	3135
6	8285
7	3365
8	3977
9	1273
10	6922
11	3555
12	8356
13	2535
14	7191
15	1836
16	9500
17	4396
18	5978
19	3614
20	2998

Рис 1. Распределение абонентов по узлам связи

На рисунках 2-3 показана матрица длин линий связи между узлами

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	0	7,885			11,82	40,58	42,77	71,58	81,74	79,55		21,11		13,13			88,81		31,17	
2	7,885	0		97,63		68,22	48,62	9,171	42,49			48,15		29,48	46,97				29,49	
3		0	63,06					18,88	95,76			34,48	11,18			13		61,21		57,57
4		97,63	63,06	0			88,92		84,34	37,04		56,95				31,23				
5	11,82				0		88,12	3,567	13,5	44,53			66,51					87,38		
6	40,58	68,22				0		13,58	3,486	27,44		12,05	50,15	77,18	67,02		0,944	13,09	24,18	
7	42,77	48,62		88,92	88,12		0	37,95	2,912	7,846		92,5		67,29	34,52	32,62	3,071	13,88		61,44
8	71,58	9,171	18,88		3,567		37,95	0		60,88			51	71,33				75,31	14,84	
9	81,74	42,49	95,76	84,34	13,5	13,58	2,912		0			2,439					38,68	83,65	39,86	
10	79,55			37,04	44,53	3,486	7,846	60,88		0		3,088				38,71		17,54	32,47	
11						27,44					0	10,03	62,93	73,05		76,01				
12	21,11		34,48	56,95			92,5		2,439	3,088	10,03	0	20,74		66,65	18,81	51,96	36,09	80,21	
13		48,15	11,18			12,05					62,93	20,74	0		33,59		49,46			
14					66,51	50,15	67,29	51			73,05			0	36,73		71,39		33,9	
15	13,13	29,48				77,18	34,52	71,33				66,65		36,73	0	27,79				
16		46,97	13	31,23		67,02	32,62				76,01	18,81	33,59		27,79	0			47,78	
17						3,071			38,68	38,71		51,96		71,39			0	28,36		30,66
18	88,81		61,21			0,944	13,88	75,31	83,65			36,09	49,46				28,36	0	97,08	
19						87,38	13,09	14,84	39,86	17,54		80,21				47,78		0		
20	31,17	29,49	57,57			24,18	61,44			32,47				33,9			30,66	97,08	0	

Рис 2. матрица расстояний

2. Расчет интенсивности производимого в узлах сети трафика

Для расчёта интенсивности трафика, производимого в узлах сети, необходимо умножить число абонентов в этом узле на y_0 . Результаты показаны на рисунке 4.

1	151,4
2	579,2
3	367
4	433,4
5	313,5
6	828,5
7	336,5
8	397,7
9	127,3
10	692,2
11	355,5
12	835,6
13	253,5
14	719,1
15	183,6
16	950
17	439,6
18	597,8
19	361,4
20	299,8
Сумма	9222,6

Рис 3. Интенсивности трафика, производимого в узлах сети

3. Расчет коэффициентов распределения трафика по направлениям связи

Для нахождения вектора коэффициентов распределения трафика по направлениям связи, необходимо поделить интенсивность трафика, созданную в этом узле на сумму трафика, созданного всеми узлами. При этом матрица коэффициентов, это 20 раз повторённый вектор, так что достаточно рассчитать лишь первую строку матрицы. Результаты показаны на рисунках 5 и 6.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0,016	0,063	0,040	0,046993	0,033993	0,089834	0,036486	0,043122	0,013803	0,075055
Сумма									1,000
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
0,038547	0,090604	0,027487	0,077972	0,019908	0,103008	0,047666	0,064819	0,039186	0,032507

Рис 4, 5. Коэффициенты распределения трафика по направлениям связи

4. Расчет интенсивности трафика в направлениях связи

Матрица интенсивностей трафика в направлениях связи рассчитывается по формуле, представленной на рисунке 7.

$$\mathbf{Y} = [y_{i,j}] \quad i, j = 1 \dots n$$

$$y_{i,j} = k_{i,j} y_i, \quad i, j = 1 \dots n$$

Рис 6. Формула нахождения матрицы интенсивностей трафика в направлениях связи

Где k – матрица коэффициентов распределения трафика по направлениям связи
Результат этих расчётов представлен на рисунке 8. Значения округлены до трёх значащих цифр

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	2,49	9,51	6,02	7,11	5,15	13,6	5,52	6,53	2,09	11,4	5,84	13,7	4,16	11,8	3,01	15,6	7,22	9,81	5,93	4,92
2	9,51	36,4	23	27,2	19,7	52	21,1	25	7,99	43,5	22,3	52,5	15,9	45,2	11,5	59,7	27,6	37,5	22,7	18,8
3	6,02	23	14,6	17,2	12,5	33	13,4	15,8	5,07	27,5	14,1	33,3	10,1	28,6	7,31	37,8	17,5	23,8	14,4	11,9
4	7,11	27,2	17,2	20,4	14,7	38,9	15,8	18,7	5,98	32,5	16,7	39,3	11,9	33,8	8,63	44,6	20,7	28,1	17	14,1
5	5,15	19,7	12,5	14,7	10,7	28,2	11,4	13,5	4,33	23,5	12,1	28,4	8,62	24,4	6,24	32,3	14,9	20,3	12,3	10,2
6	13,6	52	33	38,9	28,2	74,4	30,2	35,7	11,4	62,2	31,9	75,1	22,8	64,6	16,5	85,3	39,5	53,7	32,5	26,9
7	5,52	21,1	13,4	15,8	11,4	30,2	12,3	14,5	4,64	25,3	13	30,5	9,25	26,2	6,7	34,7	16	21,8	13,2	10,9
8	6,53	25	15,8	18,7	13,5	35,7	14,5	17,1	5,49	29,8	15,3	36	10,9	31	7,92	41	19	25,8	15,6	12,9
9	2,09	7,99	5,07	5,98	4,33	11,4	4,64	5,49	1,76	9,55	4,91	11,5	3,5	9,93	2,53	13,1	6,07	8,25	4,99	4,14
10	11,4	43,5	27,5	32,5	23,5	62,2	25,3	29,8	9,55	52	26,7	62,7	19	54	13,8	71,3	33	44,9	27,1	22,5
11	5,84	22,3	14,1	16,7	12,1	31,9	13	15,3	4,91	26,7	13,7	32,2	9,77	27,7	7,08	36,6	16,9	23	13,9	11,6
12	13,7	52,5	33,3	39,3	28,4	75,1	30,5	36	11,5	62,7	32,2	75,7	23	65,2	16,6	86,1	39,8	54,2	32,7	27,2
13	4,16	15,9	10,1	11,9	8,62	22,8	9,25	10,9	3,5	19	9,77	23	6,97	19,8	5,05	26,1	12,1	16,4	9,93	8,24
14	11,8	45,2	28,6	33,8	24,4	64,6	26,2	31	9,93	54	27,7	65,2	19,8	56,1	14,3	74,1	34,3	46,6	28,2	23,4
15	3,01	11,5	7,31	8,63	6,24	16,5	6,7	7,92	2,53	13,8	7,08	16,6	5,05	14,3	3,66	18,9	8,75	11,9	7,19	5,97
16	15,6	59,7	37,8	44,6	32,3	85,3	34,7	41	13,1	71,3	36,6	86,1	26,1	74,1	18,9	97,9	45,3	61,6	37,2	30,9
17	7,22	27,6	17,5	20,7	14,9	39,5	16	19	6,07	33	16,9	39,8	12,1	34,3	8,75	45,3	21	28,5	17,2	14,3
18	9,81	37,5	23,8	28,1	20,3	53,7	21,8	25,8	8,25	44,9	23	54,2	16,4	46,6	11,9	61,6	28,5	38,7	23,4	19,4
19	5,93	22,7	14,4	17	12,3	32,5	13,2	15,6	4,99	27,1	13,9	32,7	9,93	28,2	7,19	37,2	17,2	23,4	14,2	11,7
20	4,92	18,8	11,9	14,1	10,2	26,9	10,9	12,9	4,14	22,5	11,6	27,2	8,24	23,4	5,97	30,9	14,3	19,4	11,7	9,75

Сумм 9223

Рис 7. Матрица интенсивностей трафика в направлениях связи

5. Расчет кратчайших маршрутов между узлами сети

Матрицу кратчайших маршрутов найдём с помощью алгоритма Флойда-Уоршелла. Результат показан на рисунке 9.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
1	1	2	5	12	5	12	12	5	12	12	12	12	12	15	15	12	12	12	5	20	
2	1	2	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	1	1	8	8	8	8	20	
3	8	8	3	16	8	13	13	8	13	13	13	13	13	8	16	16	16	13	13	8	13
4	10	10	16	4	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	16	16	10	10	10	10	
5	1	8	8	9	5	9	9	8	9	9	9	9	8	8	1	9	9	9	8	8	
6	10	10	13	10	10	6	10	10	10	10	10	10	13	14	10	10	10	18	19	20	
7	9	9	10	10	9	10	7	9	9	10	9	9	10	10	15	9	17	10	10	17	
8	5	2	3	5	5	5	5	8	5	5	5	5	3	14	5	3	5	5	19	2	
9	12	5	12	12	5	12	7	5	9	12	12	12	12	12	12	12	7	12	12	12	
10	12	12	6	4	12	6	7	12	12	10	12	12	6	6	12	12	7	6	6	6	
11	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	11	12	12	12	12	12	12	12	12	12	
12	1	9	10	10	9	10	9	9	9	10	11	12	10	10	1	16	9	10	10	10	
13	6	3	3	6	3	6	6	3	6	6	6	6	13	6	3	3	6	6	6	6	
14	15	15	8	6	8	6	6	8	6	6	6	6	6	14	15	15	6	6	6	20	
15	1	1	16	16	1	1	7	1	1	1	1	1	16	14	15	16	7	1	1	1	
16	12	3	3	4	12	12	12	3	12	12	12	12	3	15	15	16	12	12	12	12	
17	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	17	7	7	20	
18	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	18	6	6	
19	8	8	8	6	8	6	6	8	6	6	6	6	6	6	8	6	6	6	19	6	
20	1	2	6	6	2	6	17	2	6	6	6	6	6	14	1	6	17	6	6	20	

Рис 8. Матрица кратчайших маршрутов

Матрица содержит номера узлов, которые являются промежуточными пунктами пути между узлами по выбранной строке и столбцу. Например: По этой матрице построим путь между 1-м и 3-м узлами.

Смотрим на 1-ю строку и 3-й столбец матрицы. Номер узла в указанной ячейке –

5. Значит, по пути между 1-м и 3-м узлами, надо пойти через 5-й узел.

5-ая строка 3-й столбец – узел 8.

8-ая строка 3-й столбец – узел 3

Таким образом маршрут между 1-м и 3-м узлом: 1, 5, 8, 3.

6. Расчет интенсивности нагрузки на линиях связи

Матрицу интенсивностей нагрузки на линиях связи построим на основе матриц, полученных в пунктах 5 и 6. Для этого требуется обойти всю матрицу интенсивностей трафика по направлениям связи. Для каждого направления

строить маршрут по матрице кратчайших маршрутов, и добавлять значение интенсивности к каждой линии связи на маршруте. Результат на рисунке 10.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	2,485	66,2	0	0	44,99	0	0	0	0	0	164,5	0	0	167,3	0	0	0	0	10,89	
2	66,2	36,38	0	0	0	0	0	480,9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	41,95	
3	0	0	14,6	0	0	0	0	236,5	0	0	0	0	256,3	0	0	194,1	0	0	0	
4	0	0	0	20,37	0	0	0	0	342,5	0	0	0	0	0	70,52	0	0	0	0	
5	44,99	0	0	0	10,66	0	0	627	682,4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
6	0	0	0	0	0	74,43	0	0	0	1625	0	0	349,4	410,2	0	0	0	559,1	269,2	
7	0	0	0	0	0	0	12,28	0	312,2	357,9	0	0	0	0	15,45	0	415,3	0	0	
8	0	480,9	236,5	0	627	0	0	17,15	0	0	0	0	0	84,07	0	0	0	78,07	0	
9	0	0	0	0	682,4	0	312,2	0	1,757	0	0	845,9	0	0	0	0	0	0	0	
10	0	0	0	342,5	0	1625	357,9	0	0	51,95	0	1382	0	0	0	0	0	0	0	
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	13,7	341,8	0	0	0	0	0	0	0	0	
12	164,5	0	0	0	0	0	0	845,9	1382	341,8	75,71	0	0	0	550	0	0	0	0	
13	0	0	256,3	0	0	349,4	0	0	0	0	0	6,968	0	0	0	0	0	0	0	
14	0	0	0	0	0	410,2	0	84,07	0	0	0	0	0	56,07	145,4	0	0	0	23,38	
15	167,3	0	0	0	0	0	15,45	0	0	0	0	0	0	145,4	3,655	114	0	0	0	
16	0	0	194,1	70,52	0	0	0	0	0	0	550	0	0	114	97,86	0	0	0	0	
17	0	0	0	0	0	0	415,3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20,95	0	25,23	
18	0	0	0	0	0	559,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	38,75	0	0	
19	0	0	0	0	0	269,2	0	78,07	0	0	0	0	0	0	0	0	0	14,16	0	
20	10,89	41,95	0	0	0	188,6	0	0	0	0	0	0	0	23,38	0	0	25,23	0	9,746	
																			Сумм: 23536	

Рис 9. Матрица интенсивности нагрузки на линиях связи

7. Расчет количества потоков в линиях связи

Требуемое число потоков рассчитаем исходя из 1-й формулы Эрланга и необходимого процента обслуженных заявок. Формулы на рисунке 11. Результат на рисунке 12.

$$\mathbf{V} = [v_{i,j}] \quad i, j = 1 \dots n$$

$$v_{i,j} = \arg \min_{v_{i,j}} |p(\tilde{y}_{i,j}, v_{i,j}) - p_0|, \quad p(\tilde{y}_{i,j}, v_{i,j}) \leq p_0$$

$$p(\tilde{y}_{i,j}, v_{i,j}) = \frac{\frac{\tilde{y}_{i,j}^{v_{i,j}}}{v_{i,j}!}}{\sum_{k=0}^{v_{i,j}} \frac{\tilde{y}_{i,j}^k}{k!}}$$

Рис 10. Формулы

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	7	78	0	0	56	0	0	0	0	0	0	179	0	0	181	0	0	0	0	18
2	78	46	0	0	0	0	0	495	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	52
3	0	0	22	0	0	0	0	251	0	0	0	0	271	0	0	209	0	0	0	0
4	0	0	0	29	0	0	0	0	0	357	0	0	0	0	0	82	0	0	0	0
5	56	0	0	0	18	0	0	640	695	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	86	0	0	0	1624	0	0	364	425	0	0	0	573	284	203
7	0	0	0	0	0	0	19	0	327	373	0	0	0	0	23	0	430	0	0	0
8	0	495	251	0	640	0	0	25	0	0	0	0	0	96	0	0	0	0	90	0
9	0	0	0	0	695	0	327	0	6	0	0	856	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	357	0	1624	373	0	0	63	0	1386	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	21	357	0	0	0	0	0	0	0	0
12	179	0	0	0	0	0	0	0	856	1386	357	88	0	0	0	564	0	0	0	0
13	0	0	271	0	0	364	0	0	0	0	0	0	13	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	425	0	96	0	0	0	0	0	67	159	0	0	0	0	32
15	181	0	0	0	0	0	23	0	0	0	0	0	0	159	9	127	0	0	0	0
16	0	0	209	82	0	0	0	0	0	0	0	0	564	0	0	127	111	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	430	0	0	0	0	0	0	0	0	0	29	0	0	34
18	0	0	0	0	0	573	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	49	0	0
19	0	0	0	0	0	284	0	90	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	22	0
20	18	52	0	0	0	203	0	0	0	0	0	0	0	32	0	0	34	0	0	16
																				Сумм 24528

Рис 11. Матрица количества потоков

8. Расчет интенсивности трафика ПД для линий связи

Чтобы найти интенсивность трафика для линий связи, умножим a_0 на матрицу количества потоков. Результат на рисунке 13

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	599200	6676800	0	0	4793600	0	0	0	0	0	15322400	0	0	15493600	0	0	0	0	0	1540800
2	6676800	3937600	0	0	0	0	0	42372000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4451200
3	0	0	1883200	0	0	0	0	0	21485600	0	0	0	0	23197600	0	0	17890400	0	0	0
4	0	0	0	2482400	0	0	0	0	0	30559200	0	0	0	0	0	7019200	0	0	0	0
5	4793600	0	0	0	1540800	0	0	0	54784000	59492000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	7361600	0	0	0	139014400	0	0	0	31158400	36380000	0	0	49048800	24310400	17376800
7	0	0	0	0	0	0	1626400	0	27991200	31928800	0	0	0	0	1968800	0	36808000	0	0	0
8	0	42372000	21485600	0	54784000	0	0	2140000	0	0	0	0	0	8217600	0	0	0	0	7704000	0
9	0	0	0	0	59492000	0	27991200	0	513600	0	0	73273600	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	30559200	0	139014400	31928800	0	0	5392800	0	118641600	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1797600	30559200	0	0	0	0	0	0	0
12	15322400	0	0	0	0	0	0	0	0	73273600	118641600	30559200	7532800	0	0	0	48278400	0	0	0
13	0	0	23197600	0	0	31158400	0	0	0	0	0	1112800	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	36380000	0	8217600	0	0	0	0	5735200	13610400	0	0	0	0	2739200	
15	15493600	0	0	0	0	0	1968800	0	0	0	0	0	0	13610400	770400	10871200	0	0	0	0
16	0	0	17890400	7019200	0	0	0	0	0	0	0	0	48278400	0	0	10871200	9501600	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	36808000	0	0	0	0	0	0	0	0	2482400	0	0	2910400
18	0	0	0	0	0	0	0	49048800	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4194400	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	24310400	0	7704000	0	0	0	0	0	0	0	0	1883200	0
20	1540800	4451200	0	0	0	17376800	0	0	0	0	0	0	2739200	0	0	2910400	0	0	1369600	
бит/c																			Сумма 2099596800	

Рис. 12 Матрица трафика для линий связи.

9. Расчет пропускной способности линий связи

Для расчёта пропускной способности линий связи, прибавим к значениям матрицы трафика значение равное L/T0. Результат на рисунке 14.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	615200	6692800	0	0	4809600	0	0	0	0	0	15338400	0	0	15509600	0	0	0	0	1556800	
2	6692800	3953600	0	0	0	0	0	42388000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4467200	
3	0	0	1899200	0	0	0	0	21501600	0	0	0	0	23213600	0	0	17906400	0	0	0	
4	0	0	0	2498400	0	0	0	0	30575200	0	0	0	0	0	7035200	0	0	0	0	
5	4809600	0	0	0	1556800	0	0	54800000	59508000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
6	0	0	0	0	0	7377600	0	0	0	139030400	0	0	0	31174400	36396000	0	0	49064800	24326400	
7	0	0	0	0	0	0	1642400	0	28007200	31944800	0	0	0	0	1984800	0	36824000	0	0	
8	0	42388000	21501600	0	54800000	0	0	2156000	0	0	0	0	8233600	0	0	0	0	7720000	0	
9	0	0	0	0	59508000	0	28007200	0	529600	0	0	73289600	0	0	0	0	0	0	0	
10	0	0	0	30575200	0	139030400	31944800	0	0	5408800	0	118657600	0	0	0	0	0	0	0	
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1813600	30575200	0	0	0	0	0	0	0	
12	15338400	0	0	0	0	0	0	0	73289600	118657600	30575200	7548800	0	0	0	48294400	0	0	0	
13	0	0	23213600	0	0	31174400	0	0	0	0	0	1128800	0	0	0	0	0	0	0	
14	0	0	0	0	0	36396000	0	8233600	0	0	0	0	0	5751200	13626400	0	0	0	2755200	
15	15509600	0	0	0	0	0	0	1984800	0	0	0	0	0	13626400	786400	10887200	0	0	0	
16	0	0	17906400	7035200	0	0	0	0	0	0	48294400	0	0	0	10887200	9517600	0	0	0	
17	0	0	0	0	0	0	0	36824000	0	0	0	0	0	0	0	2498400	0	0	2926400	
18	0	0	0	0	0	0	49064800	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4210400	0	0	
19	0	0	0	0	0	0	24326400	0	7720000	0	0	0	0	0	0	0	0	1899200	0	
20	1556800	4467200	0	0	0	17392800	0	0	0	0	0	0	0	2755200	0	0	2926400	0	1385600	
Сумма 2101004800																				

Рис. 13 Матрица пропускной способности для линий связи.

10. Оптимизация пропускной способности линий связи

Оптимизация пропускной способности линий связи предполагает оптимизацию значений пропускной способности линий связи для достижения целевого (самого часто встречающегося) значения задержки равного $T_0/2 = 0,05\text{с}$. Для этого используется следующий алгоритм:

Повышаем пропускную способность каждой линии связи по отдельности и считаем целевую функцию для них. Чем ниже целевая функция, тем меньше разброс значений относительного целевого значения задержки. Поэтому ищем ту линию связи, прибавка пропускной способности к которой понизила целевую функцию сильнее всего.

Повторяем алгоритм до тех пор, пока целевая функция уменьшается за прохождение 1 цикла. Когда целевая функция достигла минимума – выходим из цикла.

Результаты представлены на рисунках 14 и 15.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	0	0,032	0,062	0,056	0,026	0,041	0,058	0,035	0,036	0,033	0,043	0,024	0,061	0,042	0,012	0,049	0,066	0,059	0,063	0,044
2	0,032	0	0,037	0,076	0,018	0,061	0,054	0,01	0,032	0,054	0,063	0,044	0,05	0,074	0,044	0,062	0,062	0,079	0,038	0,04
3	0,062	0,037	0	0,058	0,036	0,033	0,062	0,028	0,062	0,041	0,069	0,05	0,013	0,066	0,05	0,025	0,069	0,051	0,056	0,06
4	0,056	0,076	0,058	0	0,058	0,03	0,043	0,066	0,044	0,023	0,051	0,032	0,05	0,058	0,058	0,033	0,051	0,048	0,056	0,057
5	0,026	0,018	0,036	0,058	0	0,043	0,036	0,008	0,014	0,035	0,045	0,026	0,049	0,047	0,038	0,051	0,043	0,061	0,037	0,058
6	0,041	0,061	0,033	0,03	0,043	0	0,029	0,052	0,029	0,008	0,036	0,017	0,02	0,028	0,053	0,042	0,036	0,018	0,025	0,027
7	0,058	0,054	0,062	0,043	0,036	0,029	0	0,044	0,022	0,021	0,053	0,034	0,049	0,056	0,046	0,059	0,007	0,046	0,054	0,053
8	0,035	0,01	0,028	0,066	0,008	0,052	0,044	0	0,023	0,044	0,054	0,035	0,041	0,038	0,047	0,053	0,052	0,069	0,029	0,05
9	0,036	0,032	0,062	0,044	0,014	0,029	0,022	0,023	0	0,021	0,031	0,012	0,049	0,057	0,049	0,037	0,029	0,047	0,054	0,056
10	0,033	0,054	0,041	0,023	0,035	0,008	0,021	0,044	0,021	0	0,028	0,009	0,028	0,035	0,046	0,034	0,028	0,026	0,033	0,034
11	0,043	0,063	0,069	0,051	0,045	0,036	0,053	0,054	0,031	0,028	0	0,019	0,056	0,064	0,056	0,044	0,06	0,054	0,061	0,063
12	0,024	0,044	0,05	0,032	0,026	0,017	0,034	0,035	0,012	0,009	0,019	0	0,037	0,045	0,036	0,025	0,041	0,035	0,042	0,044
13	0,061	0,05	0,013	0,05	0,049	0,02	0,049	0,041	0,049	0,028	0,056	0,037	0	0,048	0,063	0,038	0,056	0,038	0,045	0,047
14	0,042	0,074	0,066	0,058	0,047	0,028	0,056	0,038	0,057	0,035	0,064	0,045	0,048	0	0,03	0,054	0,063	0,045	0,053	0,05
15	0,012	0,044	0,05	0,058	0,038	0,053	0,046	0,047	0,049	0,046	0,056	0,036	0,063	0,03	0	0,025	0,053	0,071	0,075	0,057
16	0,049	0,062	0,025	0,033	0,051	0,042	0,059	0,053	0,037	0,034	0,044	0,025	0,038	0,054	0,025	0	0,066	0,059	0,067	0,068
17	0,066	0,062	0,069	0,051	0,043	0,036	0,007	0,052	0,029	0,028	0,06	0,041	0,056	0,063	0,053	0,066	0	0,054	0,061	0,046
18	0,059	0,079	0,051	0,048	0,061	0,018	0,046	0,069	0,047	0,026	0,054	0,035	0,038	0,045	0,071	0,059	0,054	0	0,043	0,044
19	0,063	0,038	0,056	0,056	0,037	0,025	0,054	0,029	0,054	0,033	0,061	0,042	0,045	0,053	0,075	0,067	0,061	0,043	0	0,052
20	0,044	0,04	0,06	0,057	0,058	0,027	0,053	0,05	0,056	0,034	0,063	0,044	0,047	0,05	0,057	0,068	0,046	0,044	0,052	0

Сумма 16,82

Рис. 14. Матрица задержек между узлами

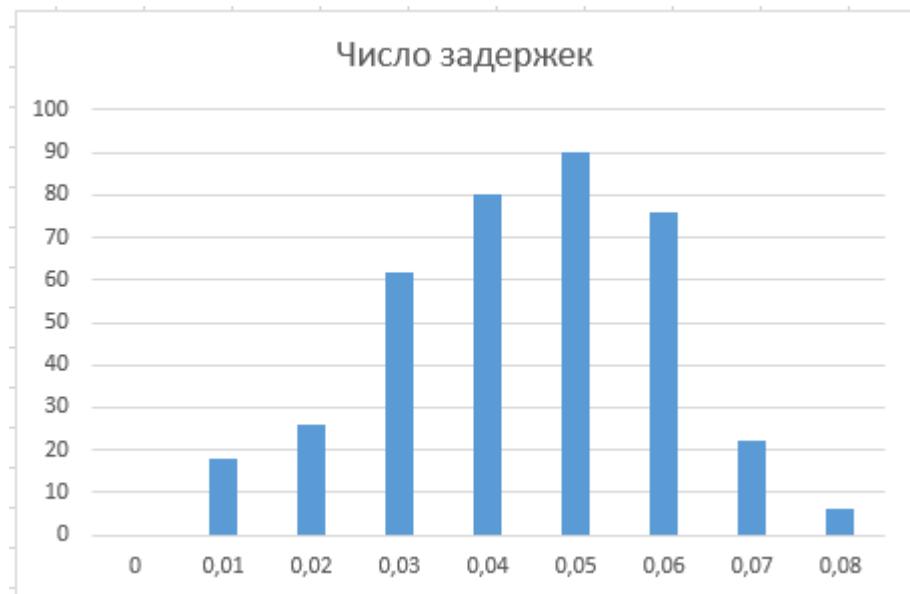


Рис. 15. Распределение задержек

На рисунке 15 отображено распределение числа задержек при округлении до 2х знаков после запятой.

То есть если задержка больше или равна 0,045 и меньше 0,055, то она попадает в подсчёт числа задержек, как задержка равная 0,05. Из этого рисунка видно, что действительно, значение задержки равное 0,05 после оптимизации является самым часто встречающимся.

11. Выводы

Успешно рассчитаны требуемые пропускные способности линий связи для обеспечения требуемого качества обслуживания, реализованы алгоритмы для выполнения поставленной задачи.

Успешно проведена оптимизация пропускных способностей каналов связи для достижения целевого значения задержки.

Поставленная задача выполнена успешно.