

**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)**

---

**ФАКУЛЬТЕТ 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  $u_0$ . 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  |
| <u>Сумма</u> | 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, создаваемую в этом узле на сумму трафика, создаваемого 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.

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

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

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

[illegible]

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 | 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 3й 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     | 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     | 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     | 0           |
| 4  | 0     | 0     | 0     | 20,37 | 0     | 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     | 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 | 188,6       |
| 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     | 0           |
| 8  | 0     | 480,9 | 236,5 | 0     | 627   | 0     | 0     | 17,15 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 84,07 | 0     | 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     | 0           |
| 10 | 0     | 0     | 0     | 342,5 | 0     | 1625  | 357,9 | 0     | 0     | 51,95 | 0     | 1382  | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0           |
| 11 | 0     | 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     | 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     | 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     | 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     | 0           |
| 16 | 0     | 0     | 194,1 | 70,52 | 0     | 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     | 0     | 25,23       |
| 18 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 559,1 | 0     | 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     | 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     | 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.

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

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

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

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   | 564  | 0   | 0   | 127 | 111 | 0   | 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 а0 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        | 0         | 15322400 | 0        | 0        | 15493600 | 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        | 21485600 | 0         | 0        | 0         | 0        | 23197600 | 0        | 0        | 17890400 | 0        | 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        | 54784000 | 59492000  | 0        | 0         | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0          |
| 6     | 0        | 0        | 0        | 0        | 7361600   | 0        | 0        | 0        | 139014400 | 0        | 0         | 31158400 | 36380000 | 0        | 0        | 0        | 49048800 | 24310400 | 17376800 | 0          |
| 7     | 0        | 0        | 0        | 0        | 0         | 1626400  | 0        | 27991200 | 31928800  | 0        | 0         | 0        | 0        | 0        | 1968800  | 36808000 | 0        | 0        | 0        | 0          |
| 8     | 0        | 42372000 | 21485600 | 0        | 54784000  | 0        | 0        | 2140000  | 0         | 0        | 0         | 0        | 8217600  | 0        | 0        | 0        | 0        | 7704000  | 0        | 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        | 30559200 | 139014400 | 31928800 | 0        | 0        | 5392800   | 0        | 118641600 | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0          |
| 11    | 0        | 0        | 0        | 0        | 0         | 0        | 0        | 0        | 0         | 1797600  | 30559200  | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0          |
| 12    | 15322400 | 0        | 0        | 0        | 0         | 0        | 0        | 73273600 | 118641600 | 30559200 | 7532800   | 0        | 0        | 0        | 48278400 | 0        | 0        | 0        | 0        | 0          |
| 13    | 0        | 0        | 23197600 | 0        | 31158400  | 0        | 0        | 0        | 0         | 0        | 0         | 1112800  | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0          |
| 14    | 0        | 0        | 0        | 0        | 36380000  | 0        | 8217600  | 0        | 0         | 0        | 0         | 0        | 5735200  | 13610400 | 0        | 0        | 0        | 0        | 2739200  | 0          |
| 15    | 15493600 | 0        | 0        | 0        | 0         | 1968800  | 0        | 0        | 0         | 0        | 0         | 0        | 13610400 | 770400   | 10871200 | 0        | 0        | 0        | 0        | 0          |
| 16    | 0        | 0        | 17890400 | 7019200  | 0         | 0        | 0        | 0        | 0         | 0        | 48278400  | 0        | 0        | 10871200 | 9501600  | 0        | 0        | 0        | 0        | 0          |
| 17    | 0        | 0        | 0        | 0        | 0         | 36808000 | 0        | 0        | 0         | 0        | 0         | 0        | 0        | 0        | 0        | 2482400  | 0        | 0        | 2910400  | 0          |
| 18    | 0        | 0        | 0        | 0        | 0         | 49048800 | 0        | 0        | 0         | 0        | 0         | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 4194400  | 0        | 0        | 0          |
| 19    | 0        | 0        | 0        | 0        | 0         | 24310400 | 0        | 7704000  | 0         | 0        | 0         | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 1883200  | 0        | 0          |
| 20    | 1540800  | 4451200  | 0        | 0        | 0         | 17376800 | 0        | 0        | 0         | 0        | 0         | 0        | 2739200  | 0        | 0        | 2910400  | 0        | 0        | 0        | 1369600    |
| бит/с |          |          |          |          |           |          |          |          |           |          |           |          |          |          |          |          |          |          | 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  $L/T_0$ . 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         | 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        | 0        | 4467200    |
| 3  | 0        | 0        | 1899200  | 0        | 0        | 0         | 0        | 21501600 | 0         | 0         | 0       | 0         | 23213600 | 0        | 0        | 17906400 | 0        | 0        | 0        | 0          |
| 4  | 0        | 0        | 0        | 2498400  | 0        | 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        | 0          |
| 6  | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 7377600   | 0        | 0        | 0         | 139030400 | 0       | 0         | 31174400 | 36396000 | 0        | 0        | 0        | 49064800 | 24326400 | 17392800   |
| 7  | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0         | 1642400  | 0        | 28007200  | 31944800  | 0       | 0         | 0        | 0        | 1984800  | 0        | 36824000 | 0        | 0        | 0          |
| 8  | 0        | 42388000 | 21501600 | 0        | 54800000 | 0         | 0        | 2156000  | 0         | 0         | 0       | 0         | 8233600  | 0        | 0        | 0        | 0        | 7720000  | 0        | 0          |
| 9  | 0        | 0        | 0        | 0        | 59508000 | 0         | 28007200 | 0        | 529600    | 0         | 0       | 73289600  | 0        | 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        | 0          |
| 11 | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0         | 0        | 0        | 0         | 0         | 1813600 | 30575200  | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0          |
| 12 | 15338400 | 0        | 0        | 0        | 0        | 0         | 0        | 73289600 | 118657600 | 30575200  | 7548800 | 0         | 0        | 0        | 48294400 | 0        | 0        | 0        | 0        | 0          |
| 13 | 0        | 0        | 23213600 | 0        | 0        | 31174400  | 0        | 0        | 0         | 0         | 0       | 1128800   | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0          |
| 14 | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 36396000  | 0        | 8233600  | 0         | 0         | 0       | 0         | 5751200  | 13626400 | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 2755200    |
| 15 | 15509600 | 0        | 0        | 0        | 0        | 0         | 1984800  | 0        | 0         | 0         | 0       | 0         | 0        | 13626400 | 786400   | 10887200 | 0        | 0        | 0        | 0          |
| 16 | 0        | 0        | 17906400 | 7035200  | 0        | 0         | 0        | 0        | 0         | 0         | 0       | 48294400  | 0        | 0        | 10887200 | 9517600  | 0        | 0        | 0        | 0          |
| 17 | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0         | 36824000 | 0        | 0         | 0         | 0       | 0         | 0        | 0        | 0        | 0        | 2498400  | 0        | 0        | 2926400    |
| 18 | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 49064800  | 0        | 0        | 0         | 0         | 0       | 0         | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 4210400  | 0        | 0          |
| 19 | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 24326400  | 0        | 7720000  | 0         | 0         | 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        | 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  $T_0/2 = 0,05с$ . 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

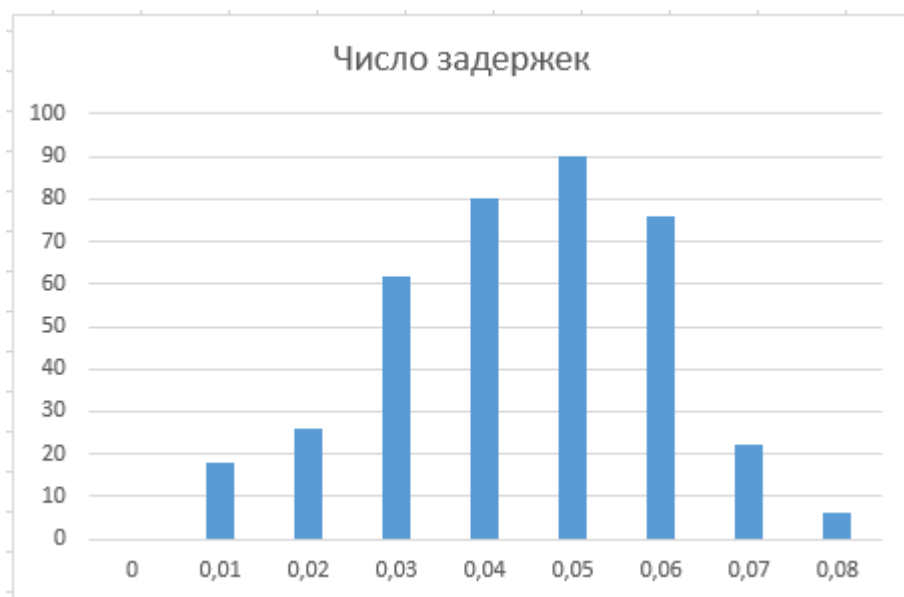


Рис. 15. Распределение задержек

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.