Санкт-Петербургский Государственный Университет Информационных Технологий Механики и Оптики

**Курсовая работа:**

**исследование сетей массового обслуживания**

Выполнил:

Непряхин Егор

Проверила:

Муравьева-Витковская Л.А.

2013 год

**1. Постановка задачи:**

Проведение комплексного исследования характеристик функционирования замкнутых и разомкнутых сетей массового обслуживания (СеМО) с однородным потоком заявок с использованием аналитического, численного и имитационного методов моделирования и изучение свойств и закономерностей, присущих процессам, протекающим в них.

**2. Исходные данные:**

*Структурные параметры и количество заявок в ЗСеМО*

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| К-во узлов n | Кол-во приборов в узлах | К-во заявок М | Номер узла | Тип модели | К-во Состояний |
| У1 | У2 | У3 | У4 |
| 4 | 1 | 2 | 1 | 2 | 2 | 1 | М4 | 10 |

Для неэкспоненциальной модели СеМО распределение длительности обслуживания заменяется на гиперэкспоненциальное с коэффициентом вариации 2.

*Вероятности передач и ср. длительности обслуживания заявок в ЗСеМО*

|  |  |
| --- | --- |
| Вероятности передач | Средние длительности обслуживания, с |
| p10 | p12 | p13 | b1 | b2 | b3 | b4 |
| 0,5 | 0,25 | 0,1 | 0,5 | 0,25 | 0,5 | 0,5 |



**3. Разработка моделей и проведение над ними экспериментов**

3.1.Разработка аналитических моделей замкнутой СеМО (ЗСеМО) и разомкнутой СеМО (РСеМО)

Разработка аналитических моделей ЗСеМО и РСеМО заключается в подготовке

следующих исходных данных (параметров) для проведения расчетов аналитическими методами:

1) количество узлов СеМО;

N = 3

2) количество обслуживающих приборов в узлах СеМО;

К1 = 1, К2 = 2, К2 = 1, К2 = 2.

3) матрица вероятностей передач и рассчитанные по этой матрице коэффициенты

передач;

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | **0** | **1** | **2** | **3** | **4** |
| **0** | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| **1** | 0,5 | 0 | 0,25 | 0,25 | 0 |
| **2** | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| **3** | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| **4** | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |

|  |
| --- |
| $$λ\_{0}=p\_{10}λ\_{1}=0,5λ\_{1}$$ |
| $$λ\_{1}=p\_{01}λ\_{0}+p\_{41}λ\_{2}=λ\_{0}+λ\_{4}$$ |
| $$λ\_{2}=p\_{12}λ\_{1}=0,25λ\_{1}$$ |
| $$λ\_{3}=p\_{13}λ\_{1}=0,25λ\_{1}$$ |
| $$λ\_{4}=p\_{24}λ\_{2}+p\_{34}λ\_{3}=λ\_{2}+λ\_{3}$$ |

Коэффициенты передач: α0= 1, α1=2, α2= 0,5, α2= 0,5,

α2= 1

4) для замкнутой СеМО - число заявок, циркулирующих в сети, М=2

 для разомкнутой СеМО - интенсивность входящего потока заявок, поступающих в сеть (определяется после расчета характеристик замкнутой СеМО и принимается равной производительности ЗСеМО); $λ\_{0}=$0.8191

5) средние длительности обслуживания заявок в узлах СеМО.

b1 =0,5, b2 = 0,25, b2 = 0,5, b2 = 0,5

 *Результаты аналитического моделирования*

|  |  |
| --- | --- |
| Характеристики СеМО | Замкнутая СеМО |
| Узел 1 | Узел 2 | Узел 3 | Узел 4 | Сеть |
| Загрузка | 0.8191126 | 0.051194537 | 0.20477815 | 0.20477815 | 1.2799 |
| Длина очереди | 0.4369 | 0.0 | 0.0273 | 0.0 | 0.4642 |
| Число заявок | 1.256 | 0.1024 | 0.2321 | 0.4096 | 2 |
| Время ожидания | 0.2667 | 0.0 | 0.0667 | 0.0 | 0.5667 |
| Время пребывания | 0.7667 | 0.25 | 0.5667 | 0.5 | 2.4417 |
| Производительность |  |  |  |  | 0.8191 |

|  |  |
| --- | --- |
| Характеристики СеМО | Разомкнутая СеМО |
| Узел 1 | Узел 2 | Узел 3 | Узел 4 | Сеть |
| Загрузка | 0.8191 | 0.05119375 | 0.204775 | 0.204775 | 1.2799 |
| Длина очереди | 3.7088 | 0.0003 | 0.0527 | 0.0179 | 3.7797 |
| Число заявок | 4.5279 | 0.1027 | 0.2575 | 0.4275 | 5.3156 |
| Время ожидания | 2.264 | 0.0007 | 0.1288 | 0.0219 | 4.6145 |
| Время пребывания | 2.764 | 0.2507 | 0.6288 | 0.5219 | 6.4895 |
| Производительность | 1,6382 | 0,4096 | 0,4096 | 0,8191 | 0.8191 |

Определим критическое число заявок , начиная с которого производительность ЗСеМО не изменяется (прирост производительности не превосходит 1-5%). Так же, определим предельную интенсивность поступления заявок в РСеМО, при которой в сети существует стационарный режим.

|  |  |
| --- | --- |
| Характеристики СеМО | Замкнутая СеМО |
| Число заявок | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Производительность | 0.5333 | 0.8191 | 0.9366 | 0.9792 | 0.9935 |

Критическое число заявок - 4

|  |  |
| --- | --- |
| Характеристики СеМО | Разомкнутая СеМО |
| Интенсивность поступления | 0.5333 | 0.8191 | 0.9792 | 0.9935 | 1 |
| Время пребывания | 3.0653 | 4.6145 | 47.1903 | 152.9619 | ∞ |

Максимальная интенсивность – 0,(9)

*График зависимости производительности ЗСеМО от изменения числа заявок*

 *График зависимости времени ожидания РСеМО от интенсивности потока заявок*

 «Узким местом» является узел 1, так как загрузка этого узла максимальна. Для его устранения уменьшаем время обслуживания заявок с 0,5 до 0,125.

|  |  |
| --- | --- |
| Характеристики СеМО | Замкнутая СеМО |
| Число заявок | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Производительность | 1,6179 | 2,1158 | 2,4556 | 2,6966 | 2,8747 |

Критическое число заявок - 5

|  |  |
| --- | --- |
| Характеристики СеМО | Разомкнутая СеМО |
| Интенсивность поступления | 1 | 2 | 3 | 3.99 | 4 |
| Время пребывания | 1.3254 | 1.7936 | 3.2724 | 300.2587 | ∞ |

Максимальная интенсивность – 3,(9)

3.2.Разработка Марковских моделей ЗСеМО

*Экспоненциальная ЗСеМО*

1) Перечень состояний Марковского процесса

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Состояние | E0 | E1 | E2 | E3 | E4 | E5 | E6 | E7 | E8 | E9 |
| (К1, К2, К3, К4) | 2000 | 1100 | 1010 | 0200 | 1001 | 0110 | 0020 | 0101 | 0011 | 0002 |

2)Размеченный граф переходов см. Приложение 1.

3) Матрица интенсивностей переходов

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|   | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| 0 | -1 | μ1p12 | μ1p13 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0 | -5 | 0 | μ1p13 | μ2 | μ1p13 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 0 | 0 | -3 | 0 | μ3 | μ1p12 | μ1p13 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 0 | 0 | 0 | -4 | 0 | 0 | 0 | 2\*μ2 | 0 | 0 |
| 4 | μ4 | 0 | 0 | 0 | -3 | 0 | 0 | μ1p12 | μ1p13 | 0 |
| 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | -6 | 0 | μ3 | μ2 | 0 |
| 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | -2 | 0 | μ3 | 0 |
| 7 | 0 | μ4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | -6 | 0 | μ2 |
| 8 | 0 | 0 | μ4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | -4 | μ3 |
| 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2\*μ4 | 0 | 0 | 0 | 0 | -4 |

4) Стационарные вероятности событий

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Состояние | E0 | E1 | E2 | E3 | E4 | E5 | E6 | E7 | E8 | E9 |
| Вероятность | 0,4369 | 0,0546 | 0,1092 | 0,0034 | 0,2184 | 0,0137 | 0,0273 | 0,0273 | 0,0546 | 0,05460 |

5) Расчет характеристик

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Характеристика | Прибор | Расчетная формула | Результат |
| Загрузка | Уз.1 | ρ1=p0+p1+p2+p4 | 0.8191 |
| Уз. 2 | ρ2=0.5p1+p3+0.5p5+0.5p7 | 0.0511 |
| Уз. 3 | ρ3=p2+p5+p6+p8 | 0.2048 |
| Уз. 4 | ρ4=0.5p4+0.5p7+0.5p8+p9 | 0.2048 |
| Сеть | R=ρ1+ρ2+ρ3+ρ4 | 1.2799 |
| Длина очереди | Уз.1 | l1= p0 | 6,7333 |
| Уз. 2 | l2= 0 | 0,0000 |
| Уз. 3 | l3= p6 | 0.0273 |
| Уз. 4 | l4= 0 | 0.0000 |
| Сеть | L=l1+l2+l3+l4 | 0.4641 |
| Число заявок | Уз.1 | m1= 2p0+p1+p2+p4 | 1.2560 |
| Уз. 2 | m2=p1+2p3+p5+p7 | 0.1023 |
| Уз. 3 | m3=p2+p5+2p6+p8 | 0.2321 |
| Уз. 4 | m4=p4+p7+p8+2p9 | 0.4096 |
| Сеть | M=m1+m2 | 2 |
| Время ожидания | Уз.1 | ω1=l1/λ1 | 0.2667 |
| Уз. 2 | ω2=l2/λ2 | 0,0000 |
| Уз. 3 | ω3=l3/λ3 | 0.0667 |
| Уз. 4 | ω4=l4/λ4 | 0,0000 |
| Сеть | W=α1ω1+ α2ω2+ α3ω3+ α4ω4 | 0.5667 |
| Время пребывания | Уз.1 | u1=m1/λ1 | 0.7667 |
| Уз. 2 | u2=m2/λ2 | 0.25 |
| Уз. 3 | u3=m3/λ3 | 0.5667 |
| Уз. 4 | u4=m4/λ4 | 0.5 |
| Сеть | U=α1u1+ α2u2+ α3u3+ α4u4 | 3.0887 |
| Производительность | Уз.1 | λ1= α1λ0 | 1.6382 |
| Уз. 2 | λ2=α2λ0 | 0.4096 |
| Уз. 3 | λ3=α3λ0 | 0.4096 |
| Уз. 4 | λ4=α4λ0 | 0.8191 |
| Сеть | λ0=ρ1/(α1b1) | 0.8191 |

*Неэкспоненциальная ЗСеМО*

1) Перечень состояний Марковского процесса

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Состояние | E0 | E1 | E2 | E3 | E4 | E5 | E6 |
| (К1, К2, К3, К4) | 21000 | 22000 | 11100 | 11010 | 12100 | 11001 | 12010 |
| Состояние | E7 | E8 | E9 | E10 | E11 | E12 | E13 |
| (К1, К2, К3, К4) | 0200 | 12001 | 0110 | 0020 | 0101 | 0011 | 0002 |

2)Размеченный граф переходов см. Приложение 2.

3) Матрица интенсивностей переходов



4) Стационарные вероятности состояний

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Состояние | E0 | E1 | E2 | E3 | E4 | E5 | E6 |
| Вероятность | 0,045144 | 0,229065 | 0,044103 | 0,038178 | 0,029402 | 0,090287 | 0,038178 |
| Состояние | E7 | E8 | E9 | E10 | E11 | E12 | E13 |
| Вероятность | 0,026247 | 0,138778 | 0,011263 | 0,019089 | 0,06188 | 0,111004 | 0,117382 |

5) Расчет характеристик

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Характеристика | Прибор | Расчетная формула | Результат |
| Загрузка | Уз.1 | ρ1=p0+p1+p2+p4+p5+p6+p8 | 0.6531 |
| Уз. 2 | ρ2=0.5p2+0.5p4+p7+0.5p9+0.5p11 | 0.0996 |
| Уз. 3 | ρ3=p3+p6+p9+p10+p10 | 0.2177 |
| Уз. 4 | ρ4=0.5p5+0.5p8+0.5p11+0.5p12+p13 | 0.3184 |
| Сеть | R=ρ1+ρ2+ρ3+ρ4 | 1.2888 |
| Длина очереди | Уз.1 | l1= p0+ρ1 | 0.2742 |
| Уз. 2 | l2= 0 | 0,0000 |
| Уз. 3 | l3= p10 | 0.0191 |
| Уз. 4 | l4= 0 | 0.0000 |
| Сеть | L=l1+l2+l3+l4 | 0.2933 |
| Число заявок | Уз.1 | m1= 2p0+2p1+p2+p3+p4+p5+p6+p8 | 0.9273 |
| Уз. 2 | m2=p2+p4+2p7+p9+p11 | 0.1991 |
| Уз. 3 | m3=p3+p6+p9+2p10+p12 | 0.2368 |
| Уз. 4 | m4=p5+p8+p11+p12+2p13 | 0.6367 |
| Сеть | M=m1+m2 | 2 |
| Время ожидания | Уз.1 | ω1=l1/λ1 | 0.2099 |
| Уз. 2 | ω2=l2/λ2 | 0,0000 |
| Уз. 3 | ω3=l3/λ3 | 0.0584 |
| Уз. 4 | ω4=l4/λ4 | 0,0000 |
| Сеть | W=α1ω1+ α2ω2+ α3ω3+ α4ω4 | 0.4491 |
| Время пребывания | Уз.1 | u1=m1/λ1 | 0.7099 |
| Уз. 2 | u2=m2/λ2 | 0.6098 |
| Уз. 3 | u3=m3/λ3 | 0.7251 |
| Уз. 4 | u4=m4/λ4 | 0.9748 |
| Сеть | U=α1u1+ α2u2+ α3u3+ α4u4 | 2.7093 |
| Производительность | Уз.1 | λ1= α1λ0 | 1.3063 |
| Уз. 2 | λ2=α2λ0 | 0.3266 |
| Уз. 3 | λ3=α3λ0 | 0.3266 |
| Уз. 4 | λ4=α4λ0 | 0.6531 |
| Сеть | λ0=ρ1/(α1b1) | 0.6531 |

Сравнительная таблица Экспоненциальной и Неэкспоненциальной ЗСеМО

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Характеристики СеМО | Экспоненциальная СеМО | Неэкспоненциальная СеМО |
| У1 | У2 | У3 | У4 | Сеть | У1 | У2 | У3 | У4 | Сеть |
| Загрузка | 0,8191 | 0,0511 | 0,2048 | 0,2048 | 1,2799 | 0,6531 | 0,0996 | 0,2177 | 0,3184 | 1,2888 |
| Длина очереди | 6,7333 | 0 | 0,0273 | 0 | 0,4641 | 0,2742 | 0 | 0,0191 | 0 | 0,2933 |
| Число заявок | 1,2560 | 0,1023 | 0,2321 | 0,4096 | 2,0000 | 0,9273 | 0,1991 | 0,2368 | 0,6367 | 2 |
| Время ожидания | 0,2667 | 0,0000 | 0,0667 | 0,0000 | 0,5667 | 0,2099 | 0 | 0,0584 | 0 | 0,4491 |
| Время пребывания | 0,7667 | 0,2500 | 0,5667 | 0,5000 | 3,0887 | 0,7099 | 0,6098 | 0,7251 | 0,9748 | 2,7093 |
| Производительность | 1,6382 | 0,4096 | 0,4096 | 0,8191 | 0,8191 | 1,3063 | 0,3266 | 0,3266 | 0,6531 | 0,6531 |

Сравнительная таблица для численного и аналитического моделирования

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Характеристики СеМО | Численное моделирование | Аналитическое моделирование |
| У1 | У2 | У3 | У4 | Сеть | У1 | У2 | У3 | У4 | Сеть |
| Загрузка | 0,8191 | 0,0511 | 0,2048 | 0,2048 | 1,2799 | 0.8191 | 0.0511 | 0.2048 | 0.2048 | 1.2799 |
| Длина очереди | 0,4369 | 0 | 0,0273 | 0 | 0,4641 | 0.4369 | 0 | 0.0273 | 0 | 0.4642 |
| Число заявок | 1,2560 | 0,1023 | 0,2321 | 0,4096 | 2,0000 | 1.256 | 0.1024 | 0.2321 | 0.4096 | 2 |
| Время ожидания | 0,2667 | 0,0000 | 0,0667 | 0,0000 | 0,5667 | 0.2667 | 0 | 0.0667 | 0 | 0.5667 |
| Время пребывания | 0,7667 | 0,2500 | 0,5667 | 0,5000 | 3,0887 | 0.7667 | 0.25 | 0.5667 | 0.5 | 2.4417 |
| Производительность | 1,6382 | 0,4096 | 0,4096 | 0,8191 | 0,8191 | 1,6382 | 0,4096 | 0,4096 | 0,8191 | 0.8191 |

При расчёте СеМО численным методом происходит замена сложных математических формул и отношений более простыми, что понижает точность вычислений. Для удобства представления данные были округлены до 4 знаков после запятой, но в выше приложенных таблицах можно заметить, что результаты аналитического моделирования точнее.

Для неэкспоненциальной ЗСеМО загрузка сети повысилась, но понизились средняя длина очереди и время ожидания. Это связано с тем, что коэффициент вариации распределения Эрланга 2 порядка(0.707) меньше чем у Экспоненциального распределения(1).

3.3.Разработка имитационных моделей РСеМО

Для РСеМО1:

Uz\_2 STORAGE 2

Uz\_4 STORAGE 2

w\_1 QTABLE 1,0,1,20

w\_2 QTABLE 2,0,0.5,20

w\_3 QTABLE 3,0,0.5,20

w\_4 QTABLE 4,0,0.5,20

U\_ TABLE M1,150,150,20

 GENERATE (Exponential(920,0, 1.22085))

Met\_1 QUEUE 1

 SEIZE Uz\_1

 DEPART 1

 ADVANCE (Exponential(920,0,0.5))

 RELEASE Uz\_1

 TRANSFER 0.5,,Buf

 TABULATE U\_

 TERMINATE 1

Met\_2 QUEUE 2

 ENTER Uz\_2

 DEPART 2

 ADVANCE (Exponential(920,0,0.25))

 LEAVE Uz\_2

 TRANSFER ,Met\_4

Buf TRANSFER 0.5,,Met\_2

Met\_3 QUEUE 3

 SEIZE Uz\_3

 DEPART 3

 ADVANCE (Exponential(920,0,0.5))

 RELEASE Uz\_3

 TRANSFER ,Met\_4

Met\_4 QUEUE 2

 ENTER Uz\_4

 DEPART 2

 ADVANCE (Exponential(920,0,0.5))

 LEAVE Uz\_4

 TRANSFER ,Met\_1

Для РСеМО2:

Uz\_2 STORAGE 2

Uz\_4 STORAGE 2

w\_1 QTABLE 1,0,1,20

w\_2 QTABLE 2,0,0.5,20

w\_3 QTABLE 3,0,0.5,20

w\_4 QTABLE 4,0,0.5,20

U\_ TABLE M1,150,150,20

 GENERATE 1.22085

Met\_1 QUEUE 1

 SEIZE Uz\_1

 DEPART 1

 ADVANCE (Exponential(920,0,0.5))

 RELEASE Uz\_1

 TRANSFER 0.5,,Buf

 TABULATE U\_

 TERMINATE 1

Met\_2 QUEUE 2

 ENTER Uz\_2

 DEPART 2

 ADVANCE (Exponential(920,0,0.25))

 LEAVE Uz\_2

 TRANSFER ,Met\_4

Buf TRANSFER 0.5,,Met\_2

Met\_3 QUEUE 3

 SEIZE Uz\_3

 DEPART 3

 ADVANCE (Exponential(920,0,0.5))

 RELEASE Uz\_3

 TRANSFER ,Met\_4

Met\_4 QUEUE 2

 ENTER Uz\_4

 DEPART 2

 ADVANCE (Exponential(920,0,0.5))

 LEAVE Uz\_4

 TRANSFER ,Met\_1

Для РСеМО3:

Uz\_2 STORAGE 2

Uz\_4 STORAGE 2

w\_1 QTABLE 1,0,1,20

w\_2 QTABLE 2,0,0.5,20

w\_3 QTABLE 3,0,0.5,20

w\_4 QTABLE 4,0,0.5,20

U\_ TABLE M1,150,150,20

 GENERATE 1.22085

Met\_1 QUEUE 1

 SEIZE Uz\_1

 DEPART 1

 ADVANCE (Exponential(920,0,0.25))

 ADVANCE (Exponential(920,0,0.25))

 RELEASE Uz\_1

 TRANSFER 0.5,,Buf

 TABULATE U\_

 TERMINATE 1

Met\_2 QUEUE 2

 ENTER Uz\_2

 DEPART 2

 ADVANCE (Exponential(920,0,0.25))

 LEAVE Uz\_2

 TRANSFER ,Met\_4

Buf TRANSFER 0.5,,Met\_2

Met\_3 QUEUE 3

 SEIZE Uz\_3

 DEPART 3

 ADVANCE (Exponential(920,0,0.5))

 RELEASE Uz\_3

 TRANSFER ,Met\_4

Met\_4 QUEUE 2

 ENTER Uz\_4

 DEPART 2

 ADVANCE (Exponential(920,0,0.5))

 LEAVE Uz\_4

 TRANSFER ,Met\_1

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Характеристики СеМО | РСеМО-1 | РСеМО-2 |
| У1 | У2 | У3 | У4 | Сеть | У1 | У2 | У3 | У4 | Сеть |
| Загрузка | 0,819 | 0,051 | 0,205 | 0,205 | 1,28 | 0,820 | 0,051 | 0,205 | 0,205 | 1,281 |
| Длина очереди | 3,675 | 0,018 | 0,053 | 0,000 | 3,746 | 1,869 | 0,014 | 0,047 | 0,000 | 1,93 |
| Число заявок | 4,494 | 0,428 | 0,258 | 0,41 | 5,59 | 1,972 | 0,424 | 0,867 | 0,205 | 3,468 |
| Время ожидания | 2,243 | 0,015 | 0,129 | 0,000 | 2,087 | 1,140 | 0,012 | 0,114 | 0,000 | 1,166 |
| Время пребывания | 2,742 | 0,265 | 0,630 | 0,499 | 6,453 | 1,64 | 0,252 | 0,614 | 0,5 | 4,234  |

|  |  |
| --- | --- |
| Характеристики СеМО | РСеМО-3 |
| У1 | У2 | У3 | У4 | Сеть |
| Загрузка | 0,820  | 0,051  | 0,205  | 0,205 | 1,281 |
| Длина очереди | 1,373  | 0,018  | 0,053 | 0 | 1,444 |
| Число заявок | 2,193 | 0,113 | 0,243 | 0,41 | 2,959 |
| Время ожидания | 0,837  | 0,008  | 0,093  | 0,0000 | 0,738 |
| Время пребывания | 1,337 | 0,258 | 0,593 | 0,5 | 3.612  |

При изменении КВ время пребывания заявок уменьшилось на 15% за счет меньшего разброса от математического ожидания, что говорит о достаточно большом влиянии КВ

Сравнительная таблица для имитационного и аналитического моделирования

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Характеристики СеМО | Имитационное моделирование | Аналитическое моделирование |
| У1 | У2 | У3 | У4 | Сеть | У1 | У2 | У3 | У4 | Сеть |
| Загрузка | 0,819 | 0,051 | 0,205 | 0,205 | 1,28 | 0.8191 | 0.0511 | 0.2047 | 0.2047 | 1.2799 |
| Длина очереди | 3,675 | 0,018 | 0,053 | 0,000 | 3,746 | 3.7088 | 0.0003 | 0.0527 | 0.0179 | 3.7797 |
| Число заявок | 4,494 | 0,428 | 0,258 | 0,41 | 5,59 | 4.5279 | 0.1027 | 0.2575 | 0.4275 | 5.3156 |
| Время ожидания | 2,243 | 0,015 | 0,129 | 0,000 | 2,087 | 2.264 | 0.0007 | 0.1288 | 0.0219 | 4.6145 |
| Время пребывания | 2,742 | 0,265 | 0,630 | 0,499 | 6,453 | 2.764 | 0.2507 | 0.6288 | 0.5219 | 6.4895 |

Для расчета характеристик СеМО имитационным методом используются генераторы псевдослучайных величин, которые не могут отобразить реальное распределение(только при бесконечной аппроксимации), что приводит к погрешностям.

Вывод:

Самые точные результаты дал метод аналитического моделирования. Численный метод дал худшие результаты, чем аналитический вследствие замены сложных математических формул и отношений на более простые. Имитационное моделирование дает наименее точные результаты из-за несовершенства генераторов случайных величин и из-за ограниченного количества пропускаемых транзактов.

Приложение 1

Размеченный граф переходов экспоненциальной ЗСеМО:

Приложение 2

Размеченный граф переходов неэкспоненциальной ЗСеМО:

