

Пример 1.

Проанализируем работу склада готовых изделий завода железобетонных изделий методами теории массового обслуживания. Источниками заявок являются тележки с прицепами, подвозящие изделия на склад, и панелевозы, вывозящие эти изделия со склада. Каналами обслуживания являются краны. Если все краны заняты погрузочно-разгрузочными работами, тележки и панелевозы становятся в очередь и при освобождении кранов поступают на обслуживание в порядке очереди. Продолжительность обслуживания — случайная величина с показательным распределением и параметром μ (среднее число заявок, обслуживаемых одним каналом в единицу времени).

Интервал между поступлениями заявок — тоже случайная величина, распределенная по показательному закону с параметром α , (среднее число заявок, поступающих в СМО в единицу времени). Длина очереди и время пребывания в ней не ограничиваются. Принятая к обслуживанию заявка выполняется полностью, без прерываний; приоритета в обслуживании нет. Взаимопомощь между каналами отсутствует. Последовательное обслуживание тележки или панелевоза несколькими кранами рассматривается не как многофазная система (поскольку не все заявки требуют такого обслуживания), а как увеличение интенсивности входящего потока. Группового поступления заявок нет.

Проведя наблюдения за работой склада и статистическую обработку наблюдений, получим следующие параметры:

средние интенсивности потока панелевозов $\lambda_n = 5$ ед/ч;

тележек $\lambda_m = 0,3$ ед/ч (в каждом из 5 пролетов);

среднюю производительность каждого крана при обслуживании панелевозов $\mu_n = 4$ ед/ч, тележек $\mu_m = 2$ ед/ч;

количество работающих кранов $n = 5$ (по одному в каждом пролете);

среднее число изделий, нагружаемых на панелевоз, $b_n = 6$, на тележку $b_m = 20$.

Используя методы СМО, сравним два варианта организации работы склада: 1) с равномерным закреплением панелевозов и тележек за кранами, 2) без закрепления за кранами.

Решение.

Параметры работы СМО:

$\lambda_n = 5$ ед./ч — средняя интенсивность потока панелевозов;

$\lambda_m = 0,3$ ед./ч — средняя интенсивность потока тележек.

Средняя производительность кранов при обслуживании:

$\mu_n = 4$ ед./ч;

$\mu_m = 2$ ед./ч.

Количество кранов: $n = 5$ по одному в каждом пролете.

Сравниваем 2 варианта организации работ:

- с равномерным закреплением панелевозов за кранами;
- без закрепления.

1-й вариант: имеем 5 одноканальных систем с неограниченным ожиданием; 2-й вариант: одна пятиканальная система.

1-й вариант:

1. Средняя плотность потока заявок:

$$\lambda_1 = \frac{\lambda_n}{n} + \lambda_m; \lambda_1 = \frac{5}{5} + 0,3 = 1,3 \text{ (ед./ч)}.$$

2. Средняя производительность крана:

$$\mu_1 = \mu_n \cdot \frac{\lambda_n}{n\lambda_1} + \mu_m \cdot \frac{n\lambda_m}{n\lambda_1}; \mu_1 = 4 \cdot \frac{5}{5 \cdot 1,3} + 2 \cdot \frac{5 \cdot 0,3}{5 \cdot 1,3} = 3,54 \text{ (ед./ч)}.$$

3. Приведенная плотность потока заявок (среднее число заявок, поступающих за среднее время обслуживания одной заявки):

$$\rho = \frac{\lambda_1}{\mu_1}; \rho = \frac{1,3}{3,54} = 0,367.$$

4. Коэффициент загрузки каналов (для одноканальной системы):

$$\psi = \frac{\rho}{n}; \psi = \frac{0,367}{1} = 0,367.$$

Коэффициент простоя:

$$R_{np} = 1 - \psi; R_{np} = 1 - 0,367 = 0,633.$$

5. Среднее число простаивающих в очереди заявок:

$$\bar{N}_{line} = \frac{\rho^2}{1 - \rho}; \bar{N}_{line} = \frac{0,367^2}{1 - 0,367} = 0,213$$

6. Среднее число заявок в СМО:

$$\bar{N}_{sys} = \bar{N}_{line} + \rho; \bar{N}_{sys} = 0,213 + 0,367 = 0,58.$$

7. Среднее время ожидания заявки в очереди:

$$\bar{T}_{оч} = \frac{\bar{N}_{line}}{\lambda_1}; \bar{T}_{оч} = \frac{0,213}{1,3} = 0,165 \text{ (ч)}.$$

8. Среднее время пребывания заявки в системе:

$$\bar{T}_{sys} = \frac{\bar{N}_{sys}}{\lambda}; \bar{T}_{sys} = \frac{0,58}{1,3} = 0,446 \text{ (ч)} \approx 27 \text{ мин.}$$

2-й вариант

(имеем одну пятиканальную систему):

1. Средняя плотность потока заявок:

$$\lambda_5 = \lambda_n + n \cdot \lambda_m; \lambda_5 = 5 + 5 \cdot 0,3 = 6,5 \text{ (ед./ч)}.$$

2. Средняя производительность крана:

$$\mu_5 = \mu_n \cdot \frac{\lambda_n}{\lambda_5} + \mu_m \cdot \frac{n\lambda_m}{\lambda_5}; \mu_5 = 4 \cdot \frac{5}{6,5} + 2 \cdot \frac{5 \cdot 0,3}{6,5} = 3,54 \text{ (ед./ч)}.$$

3. Приведенная плотность потока заявок (среднее число заявок, поступающих за среднее время обслуживания одной заявки):

$$\rho = \frac{\lambda_5}{\mu_5}; \rho = \frac{6,5}{3,54} = 1,835.$$

4. Коэффициент загрузки каналов (для одноканальной системы):

$$\psi = \frac{\rho}{n}; \quad \psi = \frac{1,835}{5} = 0,367.$$

Коэффициент простоя:

$$R_{np} = 1 - \psi; \quad R_{np} = 1 - 0,367 = 0,633.$$

5. Среднее число простаивающих в очереди заявок:

$$\bar{N}_{line} = \left(n^n / n! \right) \cdot \frac{\psi^{n+1}}{(1-\psi)^2} \cdot \left(\sum_{k=0}^n \frac{n^k}{k!} \psi^k + \frac{n^n}{n!} \cdot \frac{\psi^{n+1}}{1-\psi} \right)^{-1};$$

$$\bar{N}_{line} = \left(5^5 / 5! \right) \cdot \frac{0,367^6}{(1-0,367)^2} \cdot \left(\sum_{k=0}^5 \frac{5^k}{k!} 0,367^k + \frac{5^5}{5!} \cdot \frac{0,367^6}{1-0,367} \right)^{-1} = 0,025$$

6. Среднее число заявок в СМО:

$$\bar{N}_{sys} = \bar{N}_{line} + \rho; \quad \bar{N}_{sys} = 0,025 + 1,835 = 1,86.$$

7. Среднее время ожидания заявки в очереди:

$$\bar{T}_{оч} = \frac{\bar{N}_{line}}{\lambda_1}; \quad \bar{T}_{оч} = \frac{0,025}{6,5} = 0,0039 \text{ (ч)}.$$

8. Среднее время пребывания заявки в системе:

$$\bar{T}_{sys} = \frac{\bar{N}_{sys}}{\lambda}; \quad \bar{T}_{sys} = \frac{1,86}{6,5} = 0,286 \text{ (ч)} \approx 17,2 \text{ мин}.$$

Видно, что все характеристики у пятиканальной системы лучше, чем у пяти одноканальных СМО. Следовательно, более рациональной является организация работы склада без закрепления панелевозов и тележек за кранами.

Пример 2.

Экскаватор погружает за один рабочий цикл 50 м³/час грунта. Грузоподъемность самосвала равна 5 м³. Время обращения самосвала равно 0,3 час. Рассчитать оптимальный состав заготовительно-транспортного подразделения, при котором суммарные потери от простоев техники будут наименьшими. Стоимость простоя экскаватора составляет 450 у.е./час, а самосвала - 150 у.е./час.

Решение.

Обозначим суммарные потери от простоев техники C_{Σ}^{np} , потери от простоя экскаватора C_{Σ} , а от простоя самосвала $C_{сам}$, запишем целевую функцию

$$C_{\Sigma}^{np} = C_{\Sigma} p_0 + \bar{N}_{line} C_{сам} \rightarrow \min,$$

где p_0 - вероятность простоя экскаватора:

\bar{N}_{line} - среднее число самосвалов в очереди на обслуживание (погрузку).

Чтобы решить задачу, необходимо найти $N_{сам}^{opt}$.

Для этого следует, меняя число самосвалов, рассчитывать значения p_0

и \bar{N}_{line} и вычислить показатель C_{Σ}^{np} .

В замкнутой СМО:

$$p_0 = \frac{1}{1 + N_{сам}! \sum_{i=1}^{N_{сам}} \frac{\rho_1^i}{(N_{сам} - i)!}};$$

$$\rho_1 = \frac{1}{\lambda_1};$$

$$\lambda_1 = \frac{1}{t_p}, \text{ где } t_p - \text{ время рейса};$$

$$\bar{N}_{line} = N_{сам} - (1 - p_0) \cdot \frac{1 + \rho_1}{\rho_1};$$

$$\bar{N}_{sys} = N_{сам} - \frac{1 - p_0}{\rho_1}.$$

Изменение потерь из-за простоя экскаватора, самосвалов, а также суммарных потерь в зависимости от числа самосвалов показано в таблице 1.

Таблица 1

Зависимость потерь из-за простоя техники от числа самосвалов

Число самосвалов	p_0	$C_3 p_0$	\bar{N}_{line}	$\bar{N}_{line} C_{сам}$	$C_{\Sigma}^{np} = C_3 p_0 + \bar{N}_{line} C_{сам}$
1	0,77	346,5	0,01	1,5	348
2	0,56	252	0,09	13,5	265,5
3	0,38	171	0,31	46,5	217,5
4	0,25	112,5	0,75	112,5	225
5	0,14	63	1,28	192	255

По данным таблицы 1 построен график (рис. 1), из которого легко определить $N_{сам}^{opt} = 3$. При меньшем числе самосвалов велики потери из-за простоя экскаватора, при большем рост потерь связан с простоями самосвалов.

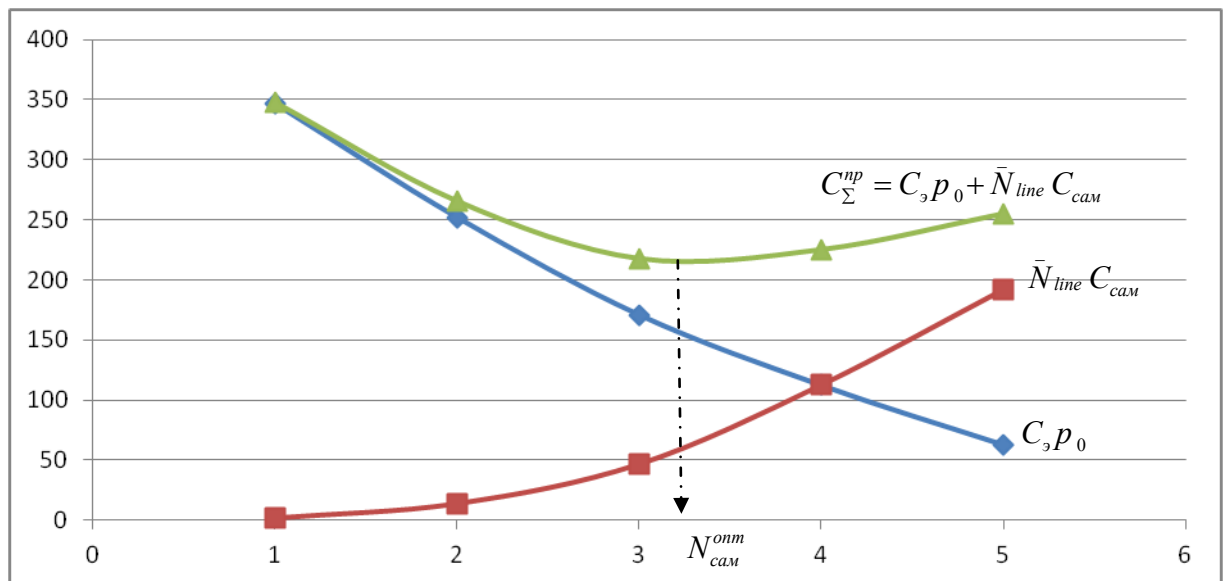


Рис. 1. Зависимость потерь из-за простоя техники от числа самосвалов

Пример 3.

Для работы в карьере по добыче камня требуется выбрать экскаватор, если имеется возможность использовать для этой цели любой из трех типов экскаваторов, охарактеризованных в таблице 5.1. В среднем в карьер на погрузку прибывают 14 автомобилей в час. Объем материала, вывозимого за один рейс автомобилем-самосвалом 3 м³. Стоимость машино-смены автомобиля-самосвала - 15 у.е.

Таблица 2

Исходные данные		
Емкость ковша экскаватора, м ³	Стоимость 1 маш.-смены, у.е.	Производительность м ³ /смена
0,65	20	60
1	40	90
1,5	60	135

Исходные данные:

$$\lambda=14. Q_{сам}=3 \text{ м}^3.$$

Необходимо найти $\mu_{опт}$ при заданном λ .

$$\rho_{опт} = \frac{\lambda}{\mu_{опт}} = 1 - \sqrt{\frac{C_{сам}}{C_{сам} + C_э}}; \quad \mu_{опт} = \frac{\lambda}{1 - \sqrt{\frac{C_{сам}}{C_{сам} + C_э}}}.$$

Экскаватор, у которого $\mu_{опт}$ совпадает со значением μ и будет оптимальным для работы в карьере.

Таблица 3

Емкость ковша экскаватора, м ³	Стоимость 1 маш.-смены, у.е.	Производительность м ³ /смена, $P_{пр}$	$\mu = \frac{P_{пр}}{Q_{сам}}$	$\mu_{опт} = \frac{\lambda}{1 - \sqrt{\frac{C_{сам}}{C_{сам} + C_э}}}$
0,65	20	60	20	41
1	40	90	30	29
1,5	60	135	45	25

Таким образом, в карьер следует поставить экскаватор с ковшом емкостью 1 м³, так как только для него величина $\mu_{опт}=29$ близка к $\mu=30$.

Определим суммарные потери от простоев техники

$$C_{\Sigma}^{np} = C_э p_0 + \bar{N}_{line} C_{сам},$$

где

$$p_0 = 1 - \rho; \quad \bar{N}_{line} = \frac{\rho^2}{1 - \rho}.$$

Таблица 4

Емкость ковша экскаватора, м ³	ρ	$p_0 = 1 - \rho$	$C_э p_0$	\bar{N}_{line}	$\bar{N}_{line} C_{сам}$	$C_{\Sigma}^{np} = C_э p_0 + \bar{N}_{line} C_{сам}$
0,65	0,7	0,3	6	1,63	24,5	30,5
1	0,467	0,533	21,32	0,41	6,14	27,45
1,5	0,311	0,689	41,34	0,14	2,11	43,45

Пример 4.

Определить оптимальное число автомобилей-самосвалов, которые нужно прикрепить к экскаватору производительностью $35 \text{ м}^3/\text{ч}$. Объем гравийного материала, перевозимого автомобилем-самосвалом за один рейс $2,5 \text{ м}^3$. Стоимость простоя экскаватора составляет $19,4 \text{ руб/час}$, а самосвала – $15,6 \text{ руб/час}$. Время движения автомобиля-самосвала с грузом и обратно без груза составляет суммарно 1 ч . Сравнить оптимальное число автомобилей-самосвалов $n_{\text{опт}}$ и расчетное значение числа автомобилей-самосвалов n , определите потери от простоя в обоих случаях, приходящихся на 1 м^3 вывозимого материала. Сравнить производительность автомобиля-самосвала при прикреплении к экскаватору $n_{\text{опт}}$ и n автомобилей.

1. Определим

$$\rho_{\text{опт}} = \frac{\lambda}{\mu_{\text{опт}}} = 1 - \sqrt{\frac{C_{\text{сам}}}{C_{\text{сам}} + C_s}} \cdot \rho_{\text{опт}} = 1 - \sqrt{\frac{15,6}{15,6 + 19,4}} = 0,33.$$

2. Определим полное время рейса автомобиля-самосвала t_p . При этом, на основе производственных данных, примем $t_{\text{выг}} = 0,5t_{\text{ног}}$.

$$t_p = t_{\text{ног}} + t_{\text{выг}} + t_{\text{ов}} + \bar{t}_f; \quad t_p = \frac{1}{\mu} \cdot 1,5 + 1,0 + \frac{1}{\mu} \cdot \frac{\rho_{\text{опт}}}{1 - \rho_{\text{опт}}};$$

$$\mu = \frac{P_{\text{нр}}}{Q_{\text{сам}}}; \quad \mu = \frac{35}{2,5} = 14.$$

Тогда

$$t_p = \frac{1}{14} \cdot 1,5 + 1,0 + \frac{1}{14} \cdot \frac{0,33}{1 - 0,33} = 1,15 \text{ ч}.$$

3. Определим оптимальное число автомобилей, прикрепляемых к средству погрузки:

$$n_{\text{опт}} = t_p \mu \rho_{\text{опт}}; \quad n_{\text{опт}} = 1,15 \cdot 14 \cdot 0,33 = 5,3.$$

4. Определим необходимое число автомобилей, прикрепляемых к средству погрузки, n .

Для этого предварительно нужно найти среднюю продолжительность ожидания перед погрузкой \bar{t}_f для случая, когда экскаватор загружен полностью ($\rho \rightarrow 1$). Величину определим при $\rho = 0,85$, что соответствует внутрисменному коэффициенту использования времени экскаватора k_g .

$$\bar{t}_f = \frac{1}{\mu} \cdot \frac{\rho}{1 - \rho}; \quad \bar{t}_f = \frac{1}{14} \cdot \frac{0,85}{1 - 0,85} = 0,404 \text{ ч}.$$

При этом время рейса будет:

$$t_p = t_{\text{ног}} + t_{\text{выг}} + t_{\text{ов}} + \bar{t}_f; \quad t_p = \frac{1}{14} \cdot 1,5 + 1,0 + 0,404 \cong 1,51 \text{ ч}.$$

Количество автомобилей-самосвалов составит:

$$n = t_p \mu k_g; \quad n = 1,51 \cdot 14 \cdot 0,85 = 18.$$

5. Вычислим производительность автомобиля-самосвала для обоих случаев, т.е. когда $n_{\text{опт}} = 5$ и $n = 18$.

Для $n_{\text{опт}} = 5$ получим

$$P_{np_5} = \frac{t_{cm} Q_{сам} k_e}{t_p} = \frac{7 \cdot 2,5 \cdot 0,85}{1,15} \cong 13 \text{ м}^3/\text{смену}.$$

Для $n = 18$ получим

$$P_{np_{18}} = \frac{t_{cm} Q_{сам} k_e}{t_p} = \frac{7 \cdot 2,5 \cdot 0,85}{1,51} \cong 10 \text{ м}^3/\text{смену}.$$

Таким образом, для оптимальной численности звеньев производительность автомобиля-самосвала возрастет на 30%.

6. Определим суммарные потери от простоя экскаватора и автомобилей-самосвалов за одну смену их работы.

Для $n_{онм} = 5$ имеем

$$C_{\Sigma}^{np} = C_3 p_0 + \bar{N}_{line} C_{сам} = C_3 (1 - \rho_{онм}) + \frac{\rho_{онм}^2}{1 - \rho_{онм}} C_{сам};$$

$$C_{\Sigma_5}^{np} = 19,4 \cdot (1 - 0,33) + \frac{0,33^2}{1 - 0,33} \cdot 15,6 = 15,53 \text{ руб.}$$

Для $n = 18$ имеем

$$C_{\Sigma_{18}}^{np} = 19,4 \cdot (1 - 0,85) + \frac{0,85^2}{1 - 0,85} \cdot 15,6 = 78 \text{ руб.}$$

Потери, приходящиеся на 1 м^3 вывозимого материала C_0 составят:

Для $n_{онм} = 5$ имеем

$$C_0 = \frac{C_{\Sigma_5}^{np}}{n_{онм} P_{np_5}}; C_0 = \frac{15,53}{5 \cdot 13} = 0,24 \text{ руб/м}^3.$$

Для $n = 18$ имеем

$$C_0 = \frac{C_{\Sigma_{18}}^{np}}{nP_{np_{18}}} C_0 = \frac{78}{18 \cdot 10} = 0,43 \text{ руб/м}^3.$$

7. Определим условную себестоимость одного кубометра материала $C_{ед}$ для обоих рассмотренных случаев.

Для $n_{онм} = 5,3$ имеем

$$C_{ед} = \frac{C_3 + n_{онм} C_{сам}}{n_{онм} P_{np_5}}; C_{ед} = \frac{19,40 + 5,3 \cdot 15,6}{5,3 \cdot 13} = 1,48 \text{ руб/м}^3.$$

Для $n = 18$ имеем

$$C_{ед} = \frac{C_3 + n C_{сам}}{nP_{np_{18}}}; C_{ед} = \frac{19,40 + 18 \cdot 15,6}{18 \cdot 10} = 1,67 \text{ руб/м}^3.$$

Пример 5.

Задана система "экскаватор - самосвалы". Экскаватор погружает за один рабочий цикл 1 т грунта. Грузоподъемность самосвала равна 7 т. Число самосвалов, обслуживающих экскаватор, равно 5. Рабочий цикл экскаватора длится 0,295 мин, а время обращения самосвала равно 10 мин. Проанализировать поведение данной системы массового обслуживания за первые полчаса ее функционирования. Определить промежуток времени, в течение которого система переходит в стационарный режим. Определить продуктивность экскаватора, а также среднее число простаивающих машин.

Исчисляем показатели обслуживания для одноканальной замкнутой СМО:

1. Интенсивность нагрузки.

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu} = \frac{0.1}{0.48} = 0.208$$

Интенсивность нагрузки $\rho=0.208$ показывает степень согласованности входного и выходного потоков заявок канала обслуживания и определяет устойчивость системы массового обслуживания.

2. Время обслуживания.

$$t_{\text{обс}} = \frac{1}{\mu} = \frac{1}{0.48} = 2.083 \text{ мин.}$$

2. Вероятность, что канал свободен (доля времени простоя каналов).

Определим вероятности состояния системы:

$$p_k = \frac{n!}{k!(n-k)!} \rho^k p_0, \quad 1 \leq k < R$$

$$p_k = \frac{n!}{R! R^{k-R} (k-R)!} \rho^k p_0, \quad R \leq k \leq n$$

$$p_1 = \frac{5!}{1! 1^{1-1} (5-1)!} \cdot 0.208^1 \cdot p_0 = 1.042 \cdot p_0$$

$$p_2 = \frac{5!}{1! 1^{2-1} (5-2)!} \cdot 0.208^2 \cdot p_0 = 0.868 \cdot p_0$$

$$p_3 = \frac{5!}{1! 1^{3-1} (5-3)!} \cdot 0.208^3 \cdot p_0 = 0.543 \cdot p_0$$

$$p_4 = \frac{5!}{1! 1^{4-1} (5-4)!} \cdot 0.208^4 \cdot p_0 = 0.226 \cdot p_0$$

$$p_5 = \frac{5!}{1! 1^{5-1} (5-5)!} \cdot 0.208^5 \cdot p_0 = 0.0471 \cdot p_0$$

Учитывая, что $\sum p_k = 1$, и используя результаты расчета p_k , вычислим p_0 :

$$\sum p_k = p_0 + 1.042p_0 + 0.868p_0 + 0.543p_0 + 0.226p_0 + 0.0471p_0$$

$$\text{Откуда } p_0 = 0.268$$

$$\text{Тогда: } p_1 = 0.28; p_2 = 0.233; p_3 = 0.146; p_4 = 0.0607; p_5 = 0.0126;$$

Вероятность того, что канал занят.

$$p_{\text{зан}} = 1 - p_0 = 1 - 0.268 = 0.732$$

Значит, 73% из числа поступивших заявок не принимаются к обслуживанию.

Вероятность обслуживания поступающих заявок (вероятность того, что клиент будет обслужен).

$$\text{Относительная пропускная способность: } Q = p_{\text{обс}} = 1.$$

Абсолютная пропускная способность (Интенсивность выходящего потока обслуженных заявок).

$$A = p_{\text{зан}} \cdot \lambda = 0.732 \cdot 0.1 = 0.073 \text{ заявок/мин.}$$

Среднее время простоя СМО.

$$t_{\text{пр}} = p_{\text{отк}} \cdot t_{\text{обс}} = 0.732 \cdot 2.083 = 1.524 \text{ мин.}$$

Вероятность образования очереди.

$$p_{оч} = p_1 = 0,28$$

Вероятность отсутствия очереди.

$$p = 1 - p_{оч} = 1 - 0.28 = 0.72$$

3. Среднее число заявок, находящихся в очереди (среднее число простаивающих машин).

$$L_{оч} = \sum(k-R)p_k = (1-1)*0.28 + (2-1)*0.233 + (3-1)*0.146 + (4-1)*0.0607 + (5-1)*0.0126 = 0.757$$

4. Среднее число заявок, находящихся под обслуживанием.

$$L_{обс} = 1 - p_0 = 1 - 0.268 = 0.732$$

5. Среднее число заявок в системе (т.е. среднее число источников, находящихся в пассивном состоянии).

$$L_{СМО} = L_{оч} + L_{обс} = \sum k * p_k = 1*0.28 + 2*0.233 + 3*0.146 + 4*0.0607 + 5*0.0126 = 1.488$$

6. Средняя интенсивность среднего суммарного входящего потока заявок (коэффициент использования оборудования).

$$I = 1 - L_{СМО} / n = 1 - 1.488/5 = 0.702$$

7. Среднее время пребывания заявки в СМО.

$$T_{СМО} = T_{обсл} = 2.083 \text{ мин.}$$

8. Коэффициент готовности – вероятность того, что произвольный источник находится в активном состоянии.

$$p_{акт} = 1 - \frac{L_{СМО}}{n} = 1 - \frac{1.488}{5} = 0.702$$

9. Среднее число каналов, простаивающих из-за отсутствия заявок.

$$r_1 = (1-0)*0.268 = 0.268$$

10. Среднее число рабочих, занятых обслуживанием.

$$n_3 = R - r_1 = 0.732$$

11. Коэффициент занятости каналов обслуживанием.

$$K_3 = \frac{n_3}{n} = \frac{0.732}{1} = 0.732$$

Следовательно, система на 73% занята обслуживанием.

12. Коэффициент простоя оборудования в очереди.

$$K_1 = \frac{L_{оч}}{n} = \frac{0.757}{5} = 0.151$$

Следовательно, система на 15% занята обслуживанием.

13. Коэффициент простоя каналов.

$$K_2 = \frac{r_1}{R} = \frac{0.268}{1} = 0.268$$

Следовательно, система на 15% занята обслуживанием.

14. Среднее время ожидания заявки в очереди (время ожидания обслуживания в очереди).

$$T_{оч} = \frac{1-I}{I\lambda} - t_{обс} = \frac{1-0.702}{0.702 \cdot 0.702} - 0 = 4.239 \text{ мин.}$$

15. Среднее время пребывания заявки в СМО.

$$T_{\text{СМО}} = T_{\text{обсл}} + T_{\text{оч}} = 4.239 + 0 = 4.239 \text{ мин.}$$

Средняя потеря производительности за счёт группы источников, находящихся в пассивном состоянии

$$P_{\text{пас}} = n - L_{\text{СМО}} = 5 - 1.488 = 3.512$$

Средняя производительность группы источников, находящихся в активном состоянии:

$$P_{\text{акт}} = n - P_{\text{пас}} = 5 - 3.512 = 1.488$$

Номинальная производительность СМО: $1 / 4.239 = 0.236$ заявок в мин.

Фактическая производительность СМО: $0.073 / 0.236 = 31\%$ от номинальной производительности.