

Анализ эффективности системы материально-технического снабжения нефтегазового предприятия методами имитационного моделирования

А. Р. Мударова, Д. А. Первухин

Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II

УДК 519.876.5

Аннотация. В статье рассматривается процесс обработки заявок на поставку материально-технических ресурсов в отделе снабжения промышленного предприятия. На основе аппарата систем массового обслуживания разработана имитационная модель в среде GPSS World. Проведен полный факторный эксперимент, построены регрессионные зависимости показателей эффективности от основных параметров системы. Выполнена проверка адекватности моделей и значимости коэффициентов. Сформулированы рекомендации по повышению пропускной способности отдела и снижению доли необработанных заявок.

Ключевые слова: имитационное моделирование, система массового обслуживания, оптимизация, полный факторный эксперимент, логистика

I. ВВЕДЕНИЕ

Объектом исследования является отдел материально-технического снабжения, функционирующий как система массового обслуживания: поступающие от производственных подразделений заявки обрабатываются специалистами, при этом в случае превышения допустимой нагрузки они выстраиваются в очередь или получают отказ.

Предмет исследования — количественные показатели эффективности работы отдела, а именно средняя длина очереди, среднее время ожидания заявки, вероятность отказа и коэффициент загрузки персонала. Эти характеристики позволяют оценить, насколько своевременно обеспечиваются потребности производства.

Цель работы — на основе имитационной модели определить степень влияния ключевых параметров (интенсивности поступления заявок, числа сотрудников, времени обработки) на перечисленные показатели и предложить варианты оптимизации режима работы отдела.

II. МЕТОДЫ

Для решения поставленных задач, то есть оценки текущего режима работы отдела снабжения и выявления возможностей его оптимизации, в работе применялись три основных метода: имитационное моделирование, полный факторный эксперимент и регрессионный анализ.

Выбор именно этих методов обусловлен вероятностной природой исследуемого процесса и необходимостью количественно оценить влияние различных факторов на его эффективность.

Аналитические методы теории массового обслуживания в таких случаях дают лишь приближенные оценки, тогда как имитационная модель позволяет проследить динамику системы во времени и получить более реалистичные результаты.

Модель реализована в среде GPSS World, специально ориентированной на моделирование систем массового обслуживания. Исходные параметры модели представлены в табл. 1:

ТАБЛИЦА I. Исходные данные имитационной модели

Траб	λ	n	m	$\bar{t}_{обс}$	ЗР	ε
62	30 / 22	6	8	5	экспонен.	0,1

Ниже (табл. 2) представлена расшифровка обозначений исходных данных:

ТАБЛИЦА II. Расшифровка принятых обозначений

Обозначение	Расшифровка
Траб	время работы СМО, дни
λ	интенсивность поступления заявок, ед./день
n	число специалистов, ед.
m	максимальная длина очереди заявок на поставку, ед.
$\bar{t}_{обс}$	среднее время обработки заявки, дни
ЗР	закон распределения времени обслуживания
ε	погрешность вычислений

Листинг модели (рис. 1) включает блоки GENERATE для создания потока заявок с экспоненциальным распределением интервалов, QUEUE для постановки в очередь, SEIZE для занятия канала, а RELEASE для его освобождения.

Проверка на превышение допустимой длины очереди реализована оператором TEST, если длина очереди достигает 8, заявка получает отказ и покидает систему.

```

OTDEL      STORAGE      6
           GENERATE    (EXPONENTIAL (1, 0, 22/30))
           TEST L      Q$ZAYAVKA, 8, OTKAZ
           QUEUE      ZAYAVKA
           ENTER      OTDEL
           DEPART     ZAYAVKA
           ADVANCE    (EXPONENTIAL (1, 0, 5))
           LEAVE     OTDEL
           TERMINATE
OTKAZ      TERMINATE
           GENERATE    62
           TERMINATE  1
           START      1
    
```

Рис. 1. Листинг моделирования СМО

Результаты первого прогона модели приведены в табл. 3, где отражены основные показатели: число

поступивших заявок (85), число отказов (11), коэффициент загрузки специалистов (0,922), средняя длина очереди (3,452) и среднее время ожидания (2,892).

Вероятность отказа составила 12,9%, что свидетельствует о перегруженном режиме работы и необходимости проведения факторного эксперимента.

ТАБЛИЦА III. РЕЗУЛЬТАТЫ ПЕРВОГО ПРОГОНА МОДЕЛИ СМО

Характеристика	Значение (ед., день.)
Заявок на поставку МТР	85
Не принято к исполнению	11
Коэффициент загрузки специалистов отдела	0,922
Средняя длина очереди	3,452
Среднее время ожидания в очереди	2,892
Среднее число занятых специалистов	5,531

Для выбора точки, относительно которой в дальнейшем будут варьироваться факторы, было проведено изменение интенсивности входного потока λ . Результаты приведены в табл. 4. Анализ показал, что при $\lambda = 29$ ед./мес. достигается максимальная абсолютная пропускная способность (29,0 заявок/мес.) при минимальной вероятности отказа. Этот режим принят за номинальный.

ТАБЛИЦА IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОГОНА МОДЕЛИ СМО ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ИНТЕНСИВНОСТИ

Параметр	Интенсивность, ед./мес.				
	$\lambda = 28$	$\lambda = 29$	$\lambda = 30$	$\lambda = 31$	$\lambda = 32$
Вероятность отказа	0,039	0,000	0,013	0,038	0,152
Относительная пропускная способность	0,961	1,000	0,987	0,962	0,848
Абсолютная пропускная способность	26,91	29,00	29,61	29,82	27,14
Коэффициент загрузки каналов	0,817	0,821	0,845	0,842	0,964

Исходя из полученных значений, можно сделать вывод о том, что при интенсивности поступления заявок $\lambda = 29$ ед./мес. режим работы СМО ближе всего к номинальному, поскольку при данном режиме вероятность отказа приемлема и абсолютная пропускная способность наиболее оптимальна, то есть имеет наибольшую величину при необходимом уровне загруженности отдела [2].

Для обеспечения заданной погрешности $\varepsilon = 0,1$ выполнено 8 предварительных запусков модели в номинальном режиме с разными генераторами случайных чисел. В качестве показателя выбрано среднее число занятых каналов. Результаты представлены в табл. 5.

ТАБЛИЦА V. ЗНАЧЕНИЯ СРЕДНЕГО ЧИСЛА ОБСЛУЖИВАЮЩИХ КАНАЛОВ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ НОМЕРА ГЕНЕРАТОРА

Номер генератора	1	2	3	4	5	6	7	8
Среднее число обслуживаемых каналов	4,926	5,560	5,338	5,196	5,321	5,456	5,424	5,098

По этим данным рассчитано среднеквадратическое отклонение [6]:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_1^8 (n_{cp} - \bar{n}_{cp})^2}{8}} = 0,194 \quad (1)$$

Тогда число прогонов рассчитывается по ниже представленной формуле при коэффициенте Стьюдента $t = 2,365$ и погрешности $\varepsilon = 0,1$ [6]:

$$N = \frac{t^2 \sigma^2}{\varepsilon^2} = 21 \quad (2)$$

Результаты моделирования при номинальном режиме с рассчитанным числом прогонов представлены ниже:

ТАБЛИЦА VI. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ НОМИНАЛЬНОМ РЕЖИМЕ И РАССЧИТАННОМ ЧИСЛЕ ПРОГОНОВ

Характеристика	Значение
Задач создано	1699
Получили отказ и не выполнено	246
Коэффициент загрузки каналов	0,956
Средняя длина очереди	4,270
Среднее время ожидания в очереди	3,826
Среднее число занятых каналов	5,737
Вероятность отказа	0,145
Относительная пропускная способность	0,885
Абсолютная пропускная способность	24,8

Для изучения влияния факторов на эффективность работы отдела применен полный факторный эксперимент. При $k = 4$ требуется $N = 16$ опытов.

В качестве факторов выбраны:

- X_1 — интенсивность поступления заявок, ед./день;
- X_2 — число специалистов, ед.;
- X_3 — максимальная длина очереди, ед.;
- X_4 — среднее время обработки заявки, дни.

Кодирование факторов выполняется по формуле:

$$X_j = \frac{\bar{X}_j - X_{j0}}{I_j} \quad (3)$$

где \bar{X}_j — натуральное значение фактора; I_j — интервал варьирования; X_{j0} — основной уровень; X_j — кодированное значение. В результате X_j принимает значения на границах $X_j \pm 1$, на основном уровне $X_j = 0$.

Уровни варьирования факторов приведены в табл. 7.

ТАБЛИЦА VII. РЕЗУЛЬТАТЫ ВАРИИРОВАНИЯ ФАКТОРОВ

Факторы	X_1, λ	X_2, n	X_3, m	$X_4, \bar{t}_{обс}$
Основной уровень	29	6	8	5
Интервал варьирования	8	1	1	1,5
Верхний уровень	37	7	9	6,5
Нижний уровень	21	5	7	3,5

В соответствии с матрицей полного факторного эксперимента было проведено 16 опытов при различных комбинациях уровней факторов. Для учета случайных колебаний каждый опыт повторялся пять раз ($M=5$), после чего для каждой комбинации факторов рассчитывалось среднее значение отклика.

В качестве функций отклика были рассмотрены:

- y_1 — средняя длина очереди;

- y_2 — среднее время ожидания заявки в очереди.

По результатам эксперимента строится следующая регрессионная модель:

$$\hat{y} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4. \quad (4)$$

Далее вычисляются коэффициенты модели. Свободный член b_0 определяется следующим образом:

$$b_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \bar{y}_i. \quad (5)$$

Коэффициенты регрессии, характеризующие линейные эффекты, вычисляются по зависимости:

$$b_j = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_{ij} \bar{y}_i. \quad (6)$$

Полученные коэффициенты представлены в табл. 8.

ТАБЛИЦА VIII. КОЭФФИЦИЕНТЫ РЕГРЕССИИ МОДЕЛЕЙ

По функции отклика средней длины очереди				
b ₀	b ₁	b ₂	b ₃	b ₄
2,631	1,467	-1,010	0,326	1,329
По функции отклика среднего времени ожидания				
b ₀	b ₁	b ₂	b ₃	b ₄
2,509	1,151	-1,123	0,231	1,555

В целях значимости коэффициентов проведён дисперсионный анализ. Для каждого опыта вычислена дисперсия параллельных измерений:

$$S_i^2 = \frac{1}{M-1} \sum_{m=1}^M (y_{im} - \bar{y}_i)^2. \quad (7)$$

Сумма дисперсий для y_1 составила 38,123, для y_2 – 35,891.

Дисперсия воспроизводимости:

$$S_{\text{воспр}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N S_i^2}{N}. \quad (8)$$

где \bar{y}_i – среднее арифметическое значение параметра оптимизации в i -м эксперименте; \hat{y}_i – значение параметра оптимизации по модели для условий i -го опыта; M – число параллельных измерений в каждом опыте; N – число экспериментов; k – число факторов в уравнении (параметров модели).

Для модели по функции отклика средней длины очереди дисперсия воспроизводимости составила 2,383, для модели по функции отклика среднего времени ожидания – 2,243.

Далее считалась ошибка коэффициентов:

$$S_{bj} = \sqrt{\frac{S_{\text{воспр}}^2}{N \cdot M}} \quad (9)$$

Были получены значения для y_1 и y_2 , составившие 0,173 и 0,167 соответственно.

Значимость коэффициентов проверялась по t -критерию Стьюдента.

Критическое значение: $t_{кр}(0,05; 64) = 1,998$.

Для модели средней длины очереди расчетные значения составили: $t_{p1} = 8,50$, $t_{p2} = 5,85$, $t_{p3} = 1,89$, $t_{p4} = 7,70$.

Коэффициент b_3 (при факторе максимальной длины очереди) оказался статистически незначимым, так как $t_{p3} < t_{кр}$.

Аналогично для модели среднего времени ожидания. Незначимым признан коэффициент b_3 ($t_{p3} = 1,38$, $t_{p3} < t_{кр}$). Остальные коэффициенты значимы. Таким образом, фактор X_3 был исключен из дальнейшего анализа.

Адекватность моделей проверялась по F -критерию Фишера. Дисперсия адекватности:

$$S_{\text{ад}}^2 = \frac{M \cdot \sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - \bar{y}_i)^2}{N - (k+1)} \quad (10)$$

Расчетное значение F -критерия [5]:

$$F_p = \frac{S_{\text{ад}}^2}{S_{\text{воспр}}^2} \quad (11)$$

Так как $F_p < F_{кр}$ для принятого уровня значимости ($\alpha = 0,05$) и соответствующих чисел степеней свободы: $k_1 = N - (k + 1)$ и $k_2 = N (M - 1)$, то дисперсии считаются однородными и модели считаются адекватными.

Регрессионные модели выглядят следующим образом:

$$\hat{y}_1 = 2,631 + 1,467x_1 - 1,010x_2 + 1,329x_4. \quad (12)$$

$$\hat{y}_2 = 2,509 + 1,151x_1 - 1,123x_2 + 1,555x_4. \quad (13)$$

Полученные модели позволяют количественно оценить влияние исследуемых факторов на эффективность работы отдела снабжения.

III. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Проведенное моделирование показало, что при исходных параметрах отдел работает в перегруженном режиме: вероятность отказа составила 14,5% при загрузке персонала 95,6%. Это означает, что система функционирует на пределе своих возможностей.

Анализ регрессионных моделей позволил количественно оценить влияние факторов.

Наибольшее влияние на длину очереди и время ожидания оказывают интенсивность поступления заявок (X_1) и среднее время обработки (X_4). Число специалистов (X_2) влияет отрицательно, причем сила влияния сопоставима с предыдущими факторами. Фактор максимальной длины очереди (X_3) оказался статистически незначимым, так как в исследуемом диапазоне изменение этого параметра не влияет на эффективность системы.

Практическая значимость подтверждена моделированием варианта с увеличенным штатом. При $n=7$ вероятность отказа снижается в среднем до 5,5%, что является приемлемым уровнем.

ТАБЛИЦА IX. ВЕРОЯТНОСТЬ ОТКАЗА ПРИ $n = 7$

Номер генератора	1	2	3	4	5	6	7	8
Вероятность отказа, %	9,8	3,2	11,1	13,2	0,0	0,0	3,6	3,0

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы разработана имитационная модель отдела материально-технического снабжения, позволяющая оценить его загрузку и вероятность отказов при разных параметрах. Установлено, что при текущих условиях отдел работает с перегрузкой — почти 15% заявок остаются необработанными.

Наиболее значимыми факторами, влияющими на длину очереди и время ожидания, оказались интенсивность поступления заявок, число сотрудников и время обработки. Максимальная длина очереди в исследованном диапазоне существенной роли не играет.

Увеличение штата на одного сотрудника снижает долю отказов до 5,5%, что делает работу отдела более стабильной. Разработанная модель может быть использована для прогнозирования последствий изменения нагрузки, обоснования штатной численности и планирования реорганизации отдела. Полученные регрессионные зависимости позволяют оперативно оценивать эффективность работы без проведения дополнительных экспериментов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Афанасьева О.В. Разработка имитационной модели на примере АО МХК «ЕвроХим» / О.В. Афанасьева, А. Андрейчук // Анализ и прогнозирование систем управления в промышленности, на транспорте и в логистике. XXIII Международная научно-практическая конференция молодых учёных, студентов и аспирантов. 2023. С. 45–51.
- [2] Охалов С.К. Моделирование систем массового обслуживания с применением средств вычислительной техники и среды моделирования GPSS World / Научно-практические исследования, 2020, Т. 31, № 8-2, с. 26–29.
- [3] Боргоякова Т.Г. Имитационное моделирование как инструмент системного анализа образовательного процесса / Инженерный вестник Дона, 2017, № 2, с. 1–9.
- [4] Матвеев А.И. Математические методы системного анализа: учебн. пособие для ВУЗов. Санкт-Петербург: Лань, 2021, 128 с.
- [5] Волкова В.Н. Теория систем и системный анализ: учебник для академического бакалавриата / В.Н. Волкова, А.А. Денисов. Москва: Юрайт, 2014
- [6] Кориков А.М. Теория систем и системный анализ / А.М. Кориков, С.Н. Павлов. Томск: Томск. гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники, 2008.