

Экономика, организация и менеджмент на предприятии

УДК 658.7:338.24

Оценка надежности системы снабжения предприятия на основе метода Монте-Карло

М.Н. Захаров, П.А. Николаев

Предложен алгоритм вычисления оценки надежности системы снабжения на предприятии с использованием метода Монте-Карло. Приведена методика формирования входных данных алгоритма. Описан принцип оценки надежности системы снабжения на основании результатов работы алгоритма.

Ключевые слова: логистика, надежность системы снабжения, метод Монте-Карло.

Assessment of the enterprise supply system reliability based on the Monte Carlo

M.N. Zakharov, P.A. Nikolaev

The paper proposes an algorithm for calculating the reliability of the enterprise supply system using the Monte-Carlo method. The technique of forming the algorithm input data is given. The principle of assessment of the supply system reliability on the basis of the algorithm results is described.

Keywords: logistics, supply chain reliability, Monte Carlo method.

Надежность системы снабжения предприятия определяется точностью расчета установленного времени выполнения заказов на поставку материалов и комплектующих, необходимых для производства продукции. Точность расчета времени выполнения заказа может быть охарактеризована величиной разброса времен выполнения заказов относительно средней величины или математически ожидаемого време-



ЗАХАРОВ

Михаил Николаевич
доктор технических наук,
профессор
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

ZAKHAROV

Mikhail Nikolaevich
Dr. Sc. Techn., Professor
(MSTU named
after N.E. Bauman)



НИКОЛАЕВ

Петр Александрович
аспирант
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

NIKOLAEV

Peter Alexandrovich
Post-Graduate
(MSTU named
after N.E. Bauman)

ни выполнения заказа. Высокая нестабильность времени выполнения заказа вынуждает предприятие хранить большой гарантированный запас материалов. Для оценки размера гарантированного запаса отдел снабжения должен рассчитывать время вероятной задержки поставки. В настоящей статье предложен метод оценки времени выполнения заказа, как ключевой характеристики надежности его выполнения.

Рассмотрим типовую систему снабжения [1], изображенную на рис. 1.

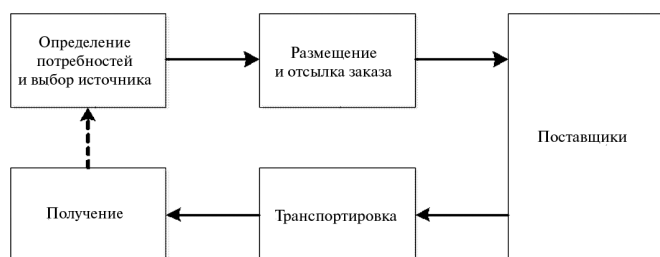


Рис. 1. Схема типовой системы снабжения

Процесс снабжения начинается с определения потребностей и выбора источника поставок. Для определения потребностей в некоторых изделиях достаточно знать об имеющихся запасах и последних продажах. Для других групп товаров это означает принятие рискованных решений о том, какие модели выбрать и в каком количестве закупить каждую из них. В «тянущих» схемах производства потребности отделу закупок предъявляют непосредственно производственные отделы.

При выборе поставщика необходимо учитывать не только стоимость, но и уровень обслуживания, приемлемость условий поставки, возможность урегулирования проблем с кредитом, графиком поставок, управлением запасами, а также предусмотреть действия при непредвиденных обстоятельствах. Выбор источника закупаемых товаров в данной статье будет рассматриваться, как выбор поставщика из тех, с кем уже ранее заключались договора о поставке.

Затем следует этап размещения и отсылки заказа поставщику. На данном этапе ведется окончательное обсуждение с поставщиком, которое устанавливает закупочные цены, объемы поставок, сроки поставок, поставки одной или несколькими партиями, издержки на транс-

порт и упаковку, гарантии качества товара, специальные предложения относительно слегка поврежденных товаров и пр.

После получения заказа и уточнения его условий поставщик готовит товары к отправке. Данный этап включает в себя: обработку заказа, подготовку готовой или изготовление требуемой продукции, упаковку и подготовку материалов к отправке. Длительность этапа зависит от вида технологического процесса на предприятии-поставщике.

Подготовленные товары отправляются заказчику. Время транспортировки определяется с момента погрузки товаров на транспорт до прибытия груза к месту назначения. Время транспортировки зависит от характера груза, расстояния от поставщика до места разгрузки, погодных условий, требований к качеству перевозки.

Получение товара включает в себя следующие процедуры: организация приема груза в установленном месте, сопоставление характеристик полученного товара с заявленными поставщиком, выставление претензий по факту отступления от условий договора и т. д. Далее полученные товары отправляются на склад, или непосредственно в производство.

Время выполнения заказа в приведенной схеме закупок — это сумма времени выполнения каждого этапа по-отдельности. Планируемое время выполнения заказа в процессе закупок — показатель, который нужно рассчитывать для каждого поставляемого материала отдельно, что следует из двух посылок:

1) если два и более требуемых товара доставляются от одного поставщика, то время их доставки может быть разным, если поставщик использует различные логистические цепочки для поставки этих товаров;

2) одинаковый товар может иметь несколько источников снабжения, которые могут использовать различную технологию логистического сервиса, поэтому могут доставлять товар в различные сроки.

Предприятие, работающее в стационарном режиме, т. е. с отработанной схемой закупок, уже имеет базу с информацией о времени исполнения каждого из этапов функционального цикла. На основании этой информации можно

составить функции плотности вероятности для каждого этапа, которые необходимы для расчета времени исполнения заказа методом Монте-Карло.

Метод Монте-Карло — достаточно простой метод оценки времени выполнения заказа с точки зрения математического обеспечения и легкости реализации. Метод Монте-Карло особенно результативен по сравнению с аналитическими методами по скорости вычисления и оценки времени выполнения заказа в случаях исследования сложных систем поставок.

Основная идея метода в контексте процесса закупок заключается в многократном моделировании функционального цикла снабжения. Для каждого отдельного этапа моделирования время выполнения выбирается случайным образом в соответствии с плотностью распределения вероятности выполнения этого этапа. Суммируя время выполнения каждого этапа цикла снабжения, получим итоговое время выполнения заказа. Применяя метод Монте-Карло, найдем плотность распределения вероятности выполнения заказа [2].

Входной информацией для моделирования является база данных отдела снабжения, в которой хранится история исполнения этапов функционального цикла снабжения (табл. 1). Следует отбирать лишь данные о выполнении нескольких последних циклов снабжения, так как недавние события лучше соответствуют текущему положению дел, чем те, которые произошли давно. Выбранные данные определим, как историю выполнения цикла снабжения.

Таблица 1

Пример истории исполнения одного из этапов в предыдущих заказах

Дата отправки	Дата получения	Время транспортировки, дни
10.01.12	15.01.12	5
11.02.12	16.02.12	5
02.03.12	06.03.12	4
05.05.12	09.05.12	4
14.06.12	19.06.12	5
05.07.12	10.07.12	5
26.07.12	01.08.12	6
01.09.12	05.09.12	4

Группируя историю исполнения по времени выполнения отдельно для каждого этапа (табл. 2), получим плотность распределения вероятности исполнения каждого этапа (рис. 2).

Таблица 2

Пример группировки по времени выполнения истории исполнения одного из этапов

Время транспортировки, дни	Количество циклов снабжения	Вероятность исполнения этапа
4	3	0,375
5	4	0,500
6	1	0,125

Выходной информацией, которая будет получена после моделирования процесса поставок методом Монте-Карло, является плотность распределения вероятности времени выполнения заказа. На основании полученных данных можно прогнозировать время, которое пройдет от момента возникновения потребности в материале до момента получения материалов.

Для описания алгоритма метода, введем ряд обозначений. Время выполнения каждого этапа процесса снабжения есть случайная величина:

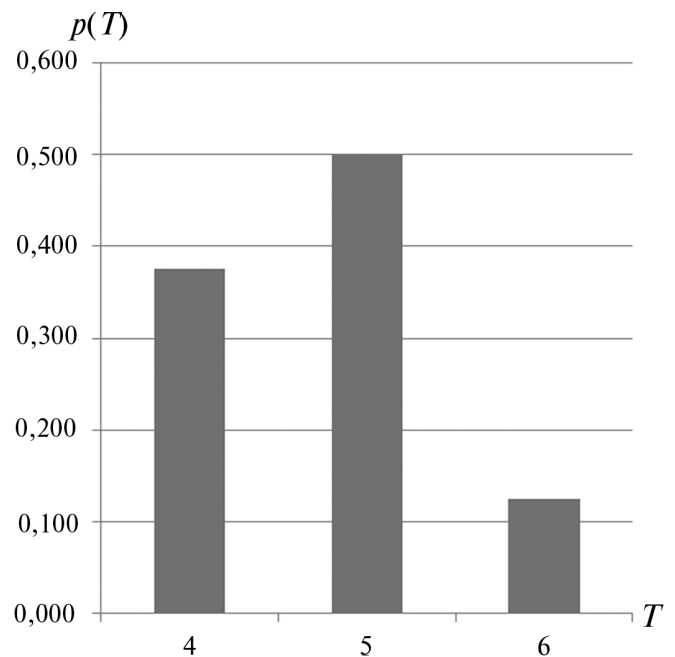


Рис. 2. Плотность распределения вероятности времени выполнения одного из этапов

$$\xi_i = \begin{pmatrix} x_1 & x_2 & \dots & x_j & \dots & x_n \\ p_1 & p_2 & \dots & p_j & \dots & p_n \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где i — номер этапа в функциональном цикле снабжения; $x_{i,j}$ — количество дней, за которое завершится i -й этап функционального цикла; $p_{i,j}$ — вероятность завершения i -го этапа за $x_{i,j}$ дней.

Обозначим ξ_{Σ} время завершения функционального цикла снабжения:

$$\xi_{\Sigma} = \sum_{i=1}^N \xi_i. \quad (2)$$

За $f_i(x)$ примем операцию получения случайной величины на основе плотности распределения вероятности, заданной значениями $p_{i,j}$.

За $\xi = f(x)$ примем операцию получения случайной величины на основе плотности распределения вероятности этой случайной величины.

Данная операция выполняется путем генерирования случайных чисел. Поскольку в настоящее время все вычисления производятся на ЭВМ, то допускается использовать генератор псевдослучайных чисел, и поскольку мы имеем дело с дискретной случайной величиной в ограниченном интервале, то наилучшим образом для простоты реализации и времени вычисления является метод, основанный на генераторе псевдослучайных чисел с равномерной плотностью распределения. В большинстве языков программирования такому распределению чаще всего подчиняется выборка, сгенерированная функцией `random`.

Таблица 3

Вероятность генерирования числа функцией `random(5)`

Random (5)	
Допустимый результата	Вероятность
0	0,2
1	0,2
2	0,2
3	0,2
4	0,2

Операцию генерации случайной величины — времени выполнения заказа — рассмотрим на следующем примере.

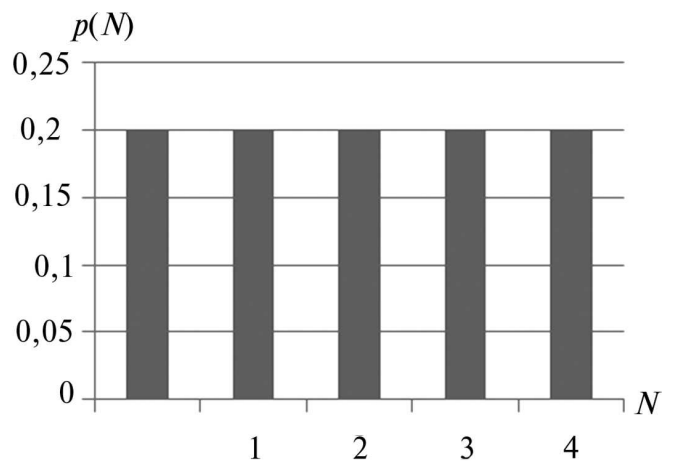


Рис. 3. Плотность распределения вероятности генерирования числа функцией `random(5)`

Допустим, время выполнения одного из этапов имеет статистику, собранную на основе 10 предыдущих циклов снабжения, отраженную в табл. 4, и имеющую плотность распределения, показанную на рис. 4.

Таблица 4

История выполнения одного из этапов, отсортированная по дате начала этапа

Дата начала этапа	Дни
20.04.2012	2
03.05.2012	1
15.05.2012	2
31.05.2012	2
07.06.2012	3
22.06.2012	1
11.07.2012	3
27.07.2012	2
08.08.2012	2
29.08.2012	3

Физический смысл получения случайной величины следующий: будем считать, что новый цикл по времени выполнения заказа повторяет один из 10 предыдущих. Какой конкретно — определит равномерный генератор псевдослучайных чисел.

Если отсортируем список, содержащий историю выполнения рассматриваемого этапа, по возрастанию времени исполнения этапов прошлых циклов снабжения, то получим соответствие (рис. 5) между результатом — временем исполнения этапа, и результатом работы гене-

ратора псевдослучайных чисел с равномерным распределением (табл. 5) [3].

Таблица 5

История выполнения одного из этапов, сгруппированная по длительности исполнения этапа

Дата начала этапа	Дни
03.05.2012	1
22.06.2012	1
20.04.2012	2
15.05.2012	2
31.05.2012	2
27.07.2012	2
08.08.2012	2
07.06.2012	3
11.07.2012	3
29.08.2012	3

Цель использования метода Монте-Карло — получение оценки надежности логистической цепи. Надежностью логистической цепи в данной статье является период времени в днях, в течение которого с вероятностью 95% на предприятие будут поставлены товары от поставщика. В этом случае оценка надежности логистической цепи может быть представлена в виде $\tau + \Delta\tau$.

Перейдем к описанию алгоритма получения оценки времени выполнения заказа методом Монте-Карло, примем за k — счетчик итераций моделирования (рис. 6).

На шаге 0 задаем входными значениями: m — количество итераций метода Монте-Карло, k — счетчик итераций метода (значение итераций выбирается исходя из располагаемого времени и мощности вычислений и требуемой точности результата); $f_i(x)$ — плотность

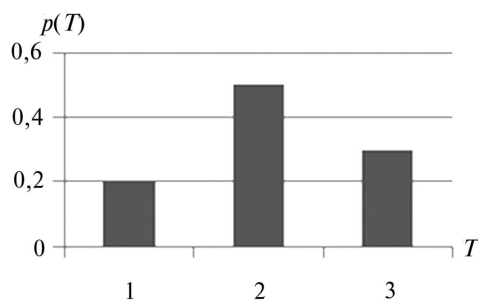


Рис. 4. Плотность распределения вероятности времени выполнения одного из этапов

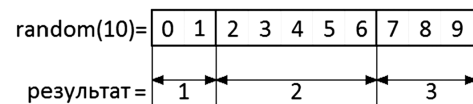


Рис. 5. Пример зависимости смоделированного времени выполнения этапа от результата, выданного генератором псевдослучайных чисел

распределений вероятности i -го этапа в логистической цепи, где i принадлежит диапазону значений $[1, N_{\text{этапов}}]$, $N_{\text{этапов}}$ — количество этапов в логистической цепи.

На шаге 1 начинается цикл, в ходе которого для каждого этапа логистической цепи вычисляется время исполнения этого этапа, неоднократно запуская генератор случайных чисел, который использует плотность распределения вероятности времени исполнения этого этапа.

На шаге 2 определяется итоговое время выполнения заказа, суммируя время выполнения операции, полученные на шаге 1.

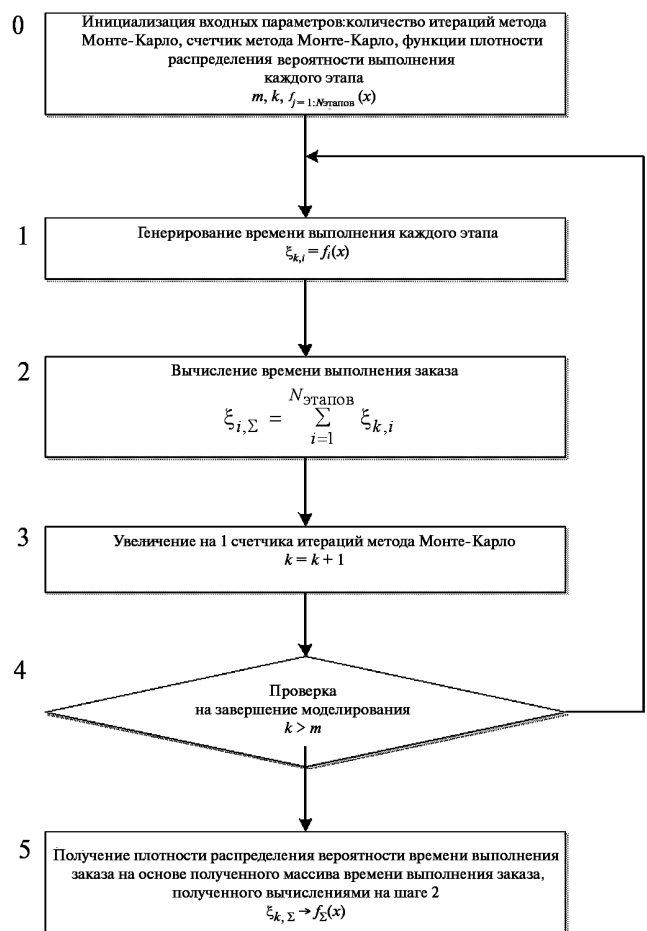


Рис. 6. Алгоритм метода Монте-Карло для получения оценки надежности логистической цепи

На шаге 3 счетчик итераций увеличивается на единицу.

На шаге 4 происходит проверка завершения алгоритма. Если число итераций k меньше заданного m , то запускается новая итерация. Если число итераций сравнялось с заданным количеством итераций, то цикл завершается.

На шаге 5 из полученного итогового массива времени выполнения заказа получаем плотность распределения вероятности времени выполнения заказа.

Результат работы алгоритма, построенный на основании входных данных (табл. 6), представлен на рис. 7.

По полученным результатам можно сделать оценку надежности цепи поставок: $(18,5 \pm 4,5)$ дня, что означает: с вероятностью 0,95 цикл снабжения завершится в промежутке [14...23] дня.

Из результатов моделирования следует, что наиболее вероятное время выполнения заказа не равно сумме наиболее вероятного времени каждого этапа логистической цепочки, т. е.

$$x_{\max(\xi_{\Sigma})} \neq \sum_{i=1}^n x_{\max(\xi_i)}, \quad (3)$$

где $x_{\max(\xi_{\Sigma})}$ — наиболее вероятное количество дней, требуемое для выполнения заказа; $x_{\max(\xi_i)}$ — наиболее вероятный срок выполнения i -го этапа.

Это связано с тем, что в ряде этапов логистической цепочки преобладает, или относительно велика вероятность завершения этих этапов позже наиболее вероятного срока. Так, например, для этапов 1–3 эта вероятность равна соответственно 0,466 ([2–3] дней), 0,566 ([3–5] дней), 0,466 ([8–11] дней). Это говорит

Таблица 6

Пример плотности распределения вероятности по этапам

Этап	Плотности распределения вероятности выполнения этапа												
1. Определение потребности и выбор поставщика	<table border="1"> <caption>Data for Stage 1 Chart</caption> <thead> <tr><th>T</th><th>p(T)</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>0.53</td></tr> <tr><td>2</td><td>0.33</td></tr> <tr><td>3</td><td>0.13</td></tr> </tbody> </table>	T	p(T)	1	0.53	2	0.33	3	0.13				
T	p(T)												
1	0.53												
2	0.33												
3	0.13												
2. Размещение и отсылка заказа	<table border="1"> <caption>Data for Stage 2 Chart</caption> <thead> <tr><th>T</th><th>p(T)</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>0.10</td></tr> <tr><td>2</td><td>0.33</td></tr> <tr><td>3</td><td>0.29</td></tr> <tr><td>4</td><td>0.23</td></tr> <tr><td>5</td><td>0.03</td></tr> </tbody> </table>	T	p(T)	1	0.10	2	0.33	3	0.29	4	0.23	5	0.03
T	p(T)												
1	0.10												
2	0.33												
3	0.29												
4	0.23												
5	0.03												

Этап	Плотности распределения вероятности выполнения этапа																
3. Поставщики	<table border="1"> <caption>Data for Stage 3: Suppliers</caption> <thead> <tr> <th>T</th> <th>p(T)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>5</td><td>0,07</td></tr> <tr><td>6</td><td>0,13</td></tr> <tr><td>7</td><td>0,33</td></tr> <tr><td>8</td><td>0,20</td></tr> <tr><td>9</td><td>0,13</td></tr> <tr><td>10</td><td>0,10</td></tr> <tr><td>11</td><td>0,04</td></tr> </tbody> </table>	T	p(T)	5	0,07	6	0,13	7	0,33	8	0,20	9	0,13	10	0,10	11	0,04
T	p(T)																
5	0,07																
6	0,13																
7	0,33																
8	0,20																
9	0,13																
10	0,10																
11	0,04																
4. Транспортировка	<table border="1"> <caption>Data for Stage 4: Transportation</caption> <thead> <tr> <th>T</th> <th>p(T)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>3</td><td>0,13</td></tr> <tr><td>4</td><td>0,20</td></tr> <tr><td>5</td><td>0,30</td></tr> <tr><td>6</td><td>0,20</td></tr> <tr><td>7</td><td>0,17</td></tr> </tbody> </table>	T	p(T)	3	0,13	4	0,20	5	0,30	6	0,20	7	0,17				
T	p(T)																
3	0,13																
4	0,20																
5	0,30																
6	0,20																
7	0,17																
5. Получение	<table border="1"> <caption>Data for Stage 5: Receipt</caption> <thead> <tr> <th>T</th> <th>p(T)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>0,83</td></tr> <tr><td>2</td><td>0,17</td></tr> <tr><td>3</td><td>0,00</td></tr> </tbody> </table>	T	p(T)	1	0,83	2	0,17	3	0,00								
T	p(T)																
1	0,83																
2	0,17																
3	0,00																

о том, что для оценки времени выполнения заказа недостаточно просто подсчитать сумму дней, с наиболее вероятным временем выполнения.

Допустим, мы можем повлиять на первые два звена цикла снабжения путем оптимизации технологических процессов и улучшением деловой дисциплины. Зададимся некоторыми критериями, которым должны соответствовать новые характеристики этапов.

Математические ожидания должны уменьшиться до следующих значений (табл. 7):

этап I — $M_0 = 1,600 \rightarrow M = 1,280$;

этап II — $M_0 = 2,767 \rightarrow M = 2,213$.

Допустим, что в результате проведенных мер оптимизации, были получены новые плотности распределения вероятности первых двух этапов при неизменившихся вероятностных характеристиках других трех этапов.

В соответствии с новыми, полученными в результате вычислений, данными (рис. 8), математическое ожидание всего цикла снизилось на 6% и новая оценка надежности логистической цепи составила (17 ± 4) дня, это означает, что новый интервал, на котором вероятность доставки товаров равна 0,95, равен [13...21] день.

Выводы

Метод Монте-Карло дает более точные оценки времени выполнения заказа, чем метод сложения наиболее вероятного времени выполнения заказа. Этот метод достаточно легко реализуем. Алгоритмы на его основе способны быстро предоставлять информацию, что может быть важно для информационных систем, к которым обращаются множество пользователей.

Данный метод может легко адаптироваться под изменяющуюся информацию. Так, например, в системах выдачи товаров в магазинах время выдачи изменяется в течение дня. Этим методом, при должной интеграции с базой данных магазина, можно рассчитывать ожидаемое время выдачи в автоматическом режиме.

Из недостатков можно указать сложности в подготовке входной информации: данные по выполнению этапов за предыдущие циклы закупок. Также ставится вопрос о точности применения данного метода, что является темой отдельной статьи.

Следует также определить, на сколько выше точность представленного метода по сравнению с оценкой по истории времени выполнения всего цикла целиком.

Таблица 7

Пример скорректированной плотности распределения вероятности по этапам

Этап	Плотности распределения вероятности выполнения этапа										
1. Определение потребности и выбор поставщика	<table border="1"> <caption>Data for Stage 1 Chart</caption> <thead> <tr> <th>T</th> <th>p(T)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>0.75</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>0.20</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>0.05</td> </tr> </tbody> </table>	T	p(T)	1	0.75	2	0.20	3	0.05		
T	p(T)										
1	0.75										
2	0.20										
3	0.05										
2. Размещение и отсылка заказа	<table border="1"> <caption>Data for Stage 2 Chart</caption> <thead> <tr> <th>T</th> <th>p(T)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>0.20</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>0.45</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>0.25</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>0.05</td> </tr> </tbody> </table>	T	p(T)	1	0.20	2	0.45	3	0.25	4	0.05
T	p(T)										
1	0.20										
2	0.45										
3	0.25										
4	0.05										

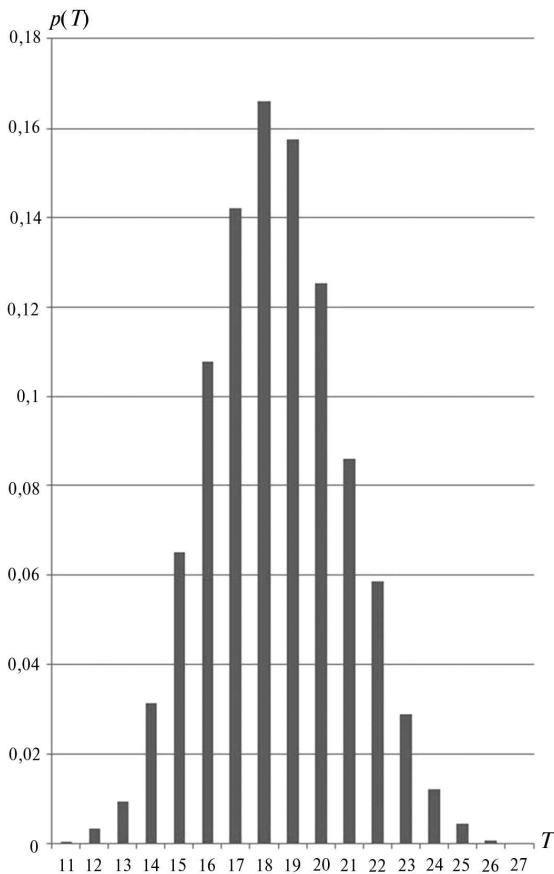


Рис. 7. Пример плотности распределения вероятности выполнения заказа

Литература

1. Бауэрсокс Доналд Дж., Клосс Дейвид Дж. Логистика: интегрированная цепь поставок / Пер. с англ. Барышниковой, Б.С. Пинскера. М.: ЗАО «Олимп-Бизнес», 2005. 640 с.
2. Джеймс Р. Сток, Дуглас М. Ламберт. Стратегическое управление логистикой, пер. с 4-го англ. изд. Изд-во: Инфра-М, 2005. 797 с.
3. Савелова Т.И. Метод Монте-Карло. М.: НИЯУ МИФИ, 2011. 152 с.

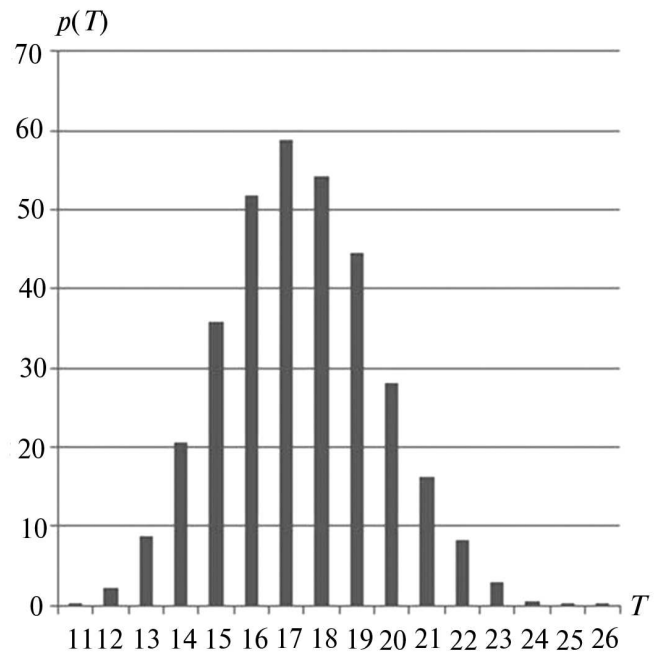


Рис. 8. Пример плотности распределения вероятности выполнения заказа с скорректированными первыми двумя этапами логистической цепочки

References

1. Bauersoks Donald Dzh., Kloss Deivid Dzh. *Logistika: integrirovannaja tsep' postavok* [Logistics: The Integrated Supply Chain]. Moscow, CJSC «Olympus-Business» publ., 2005. 640 p.
2. Dzheims R. Stok, Duglas M. Lambert. *Strategicheskoe upravlenie logistikoi* [Strategic management of logistics]. Infra-M publ., 2005. 797 p.
3. Savelova T.I. *Metod Monte-Karlo* [Monte Carlo method]. Moscow, NRNU MIFI Publ., 2011. 152 p.

Статья поступила в редакцию 15.10.2012

Информация об авторах

ЗАХАРОВ Михаил Николаевич (Москва) — доктор технических наук, профессор кафедры «Промышленная логистика». МГТУ им. Н.Э. Баумана (Россия, 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

НИКОЛАЕВ Петр Александрович (Москва) — аспирант кафедры «Промышленная логистика». МГТУ им. Н.Э. Баумана (Россия, 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: nikolaev_petr@inbox.ru).

Information about the authors

ZAKHAROV Mikhail Nikolaevich (Moscow) — Dr. Sc. Techn., Professor of «Industrial Logistics» Department. MSTU named after N.E. Bauman (BMSTU, building 1, 2-nd Baumanskaya, 5, 105005, Moscow Russia).

NIKOLAEV Peter Alexandrovich (Moscow) — Post-Graduate of «Industrial Logistics» Department. MSTU named after N.E. Bauman (BMSTU, building 1, 2-nd Baumanskaya, 5, 105005, Moscow Russia, e-mail: nikolaev_petr@inbox.ru).