Оптимизация уровня запасов как задача логистики

Виталий АНТИПЕНКО

Николай БАБИЧ

Константин ГАЛКИН

Виталий Сафронович Антипенко¹, Николай Сергеевич Бабич², Константин Владимирович Галкин³

^{1,2} Российский университет транспорта, Москва, Россия.

³ ООО «Дефшов», Москва, Россия.

✉ ¹ Antipenkovs7@mail.ru.

АННОТАЦИЯ

Запасы обеспечивают устойчивость работы производственной технической системы. На производстве имеются склады заготовок для создания конечных выходных деталей и склады готовой продукции для удовлетворения спроса потребителей. Запасы заготовок позволяют избежать простоя на производстве, а запасы готовой продукции – своевременно обеспечить спрос и избежать штрафных санкций за несвоевременные поставки готовых изделий потребителям.

С другой стороны, объекты, составляющие запасы – это «омертвевшие» материальные средства, не приносящие прибыли, что отрицательно сказывается на экономической эффективности и на конкурентоспособности. Согласно опубликованным данным, в экономически развитых

странах, таких как США, Япония, ФРГ и других, в запасах находится до 30–40 % продукции. Всё это указывает на актуальность вопроса оптимизации уровня запасов, проблемы установления и поддержания оптимального уровня запаса, своевременного его пополнения с учётом времени, необходимого для выполнения заявок.

Цель работы – предложить решение стохастической логистической задачи управления запасами со случайным временем задержки и случайным спросом, полученное авторами методами математической статистики, математического моделирования и производственной логистики для неизвестных и произвольного вида функций распределения спроса и времени задержки. Подходы к реализации предложенного решения демонстрируются на конкретных примерах.

Ключевые слова: логистика, запасные части, система управления запасами (СУЗ), стратегия управления, стохастический спрос, стохастическое время задержки, технико-экономические функции, целевой функционал, алгоритмы, динамика уровней запаса запчастей.

Для цитирования: Антипенко В. С., Бабич Н. С., Галкин К. В. Оптимизация уровня запасов как задача логистики // Мир транспорта. 2021. Т. 19. № 2 (93). С. 64–68. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2021-19-2-9>.

Полный текст статьи на английском языке публикуется во второй части данного выпуска.

The full text of the article in English is published in the second part of the issue.

ВВЕДЕНИЕ

Существует необходимость повышения эффективности систем управления запасами запчастей для транспорта и машин специального назначения путём построения моделей их оптимизации. Проблема управления запасами возникла достаточно давно. В транспортном машиностроении материальные запасы исполняют роль амортизатора в условиях несовпадения темпов производства и темпов поступления сырья. Наличие объёмов запасов на промышленном предприятии является объективной реальностью и экономической необходимостью. При этом материальные ресурсы, сосредоточенные в запасах, отвлекаются из сферы производства. Средства, вложенные в запасы, составляют наибольший удельный вес в оборотных средствах промышленных предприятий. Структура запасов состоит преимущественно из сырья, основных материалов, комплектующих изделий и покупных полуфабрикатов.

Научные теории управления запасами возникли в конце XIX века. Первые математические модели систем управления запасами (СУЗ) носили детерминистический характер. Используемые экономико-математические функции и построенные на их основе критерии эффективности систем управления запасами были линейными и зачастую унимодальными. Это, в свою очередь, диктовало выбор метода оптимизации предлагаемых моделей СУЗ. Предпринимались попытки аналитического решения проблемы. Позднее применялись методы линейного и динамического программирования. С усовершенствованием технологий промышленного производства, с усложнением и развитием связей и кооперации предприятий, в том числе и структур материально-технического снабжения, пришло понимание необходимости учёта влияния множества факторов на работу СУЗ. От детерминистических моделей пришлось отказаться как от не адекватных реальным условиям. Пришло время стохастических моделей СУЗ. Развитие промышленной логистики как системы управления потоками материальных средств и финансов привело к усложнению СУЗ, потребовало разработки качественно новых математических моделей, углублённого изучения их математических свойств. Например, в США доля запасов

в валовом внутреннем национальном продукте за почти 35-летний период составляет около 28 %. Отказавшись от традиционных подходов к управлению процессами снабжения, производством и сбытом, при которых управление каждым из этих процессов осуществлялось не комплексно, а отдельно и независимо друг от друга, американские фирмы добились значительного снижения издержек по содержанию и обслуживанию запасов и их доли в годовом объёме издержек. Переход на логистические подходы в СУЗ в американских фирмах позволил снизить долю оборотных средств, вложенных в запасы до 18 % в валовом внутреннем продукте США [1; 2].

В подавляющем числе публикаций последних лет отдается предпочтение логистике и стохастическим моделям как наиболее адекватно описывающим реальные условия [3; 4].

В этой связи *цель* работы – предложить решение стохастической логистической задачи управления запасами со случайным временем задержки и случайным спросом, полученное с использованием *методов* математической статистики, математического моделирования и производственной логистики для неизвестных и произвольного вида функций распределения спроса и времени задержки.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Рассмотрим математическую модель СУЗ, соответствующую одному из наиболее распространённых условий функционирования промышленного предприятия. При постановке задачи допустим, что спрос обычно носит случайный характер, а заявки выполняются со случайным временем задержки. Функции распределения спроса и времени задержки априори произвольны и неизвестны, и зачастую не унимодальны. В подобной постановке задача не решена. В этих условиях для достижения указанной цели естественно воспользоваться современными методами производственной логистики, в том числе методами математической статистики, математического моделирования, информационных технологий и, в частности, алгоритмами идентификации.

Пусть система управления запасами характеризуется функцией затрат Z на хранение запаса, доставку, дефицит и т.п. Управ-

ление запасами осуществляется путём выбора стратегии управления. Одной из достаточно эффективных и гибких стратегий является (s, S) -стратегия, согласно которой заказ величиной $S - y$ формируется по снижению уровня запаса y ниже уровня s , $s < S$. Для случайных спроса и задержки $Z = Z(y(s, S, x))$, где, согласно работе Ю. И. Рыжикова [5], $y(s, S, x)$ – текущий уровень запаса, x – случайный спрос, s, S – уровни в (s, S) -стратегии. Тогда критерием оптимальности системы J служит некоторая усреднённая функция от затрат Z :

$$J(s, S) = Mx \{F[y(s, S, x)]\} \rightarrow \min s, S. \quad (1)$$

Применяя к (1) один из методов информационных технологий – метод стохастической аппроксимации, получаем самосогласованную систему адаптивных алгоритмов [6–8]:

$$\begin{aligned} S[p+1] &= S[p] - \gamma_\alpha(S[p+1]) \cdot f_s \cdot \\ &\cdot F(Z(y(s[p], S[p], x[p+1]))); \\ s[p+1] &= s[p] - \gamma_\alpha(s[p+1]) \cdot f_s \cdot \\ &\cdot F(Z(y(s[p], S[p], x[p+1]))), \end{aligned} \quad (2)$$

где градиент по α – производная по направлению;

$\alpha \cdot \gamma_\alpha \cdot [p+1]$ – коэффициенты;

f_s, f_S – функции, учитывающие ограничения на s и S .

Предполагается, что функции F и Z – дифференцируемые, в противном случае можно применить поисковые алгоритмы. Достаточные условия сходимости (2) приведены в многочисленных монографиях по методам стохастической аппроксимации. В процессе вычисления в (2) необходимо знать явный вид функции $y(s, S, x)$ для нахождения производных по s и S . Запишем уравнение, моделирующее динамику запасов и использующее для управления (s, S) -стратегию. Известно, что в рамках (s, S) -стратегии при $y \geq s$ системе не требуется пополнение запасов, а при $y < s$ посылается заказ на пополнение запаса в размере $(S - y)$. Неудовлетворённые заявки не покидают систему, а ждут, пока дефицит запаса не будет устранён очередным заказом. Всё исследование проводится для дискретного спроса.

Перенумеруем заявки по мере поступления в систему. Можно считать, что их число бесконечно. Выполняется очевидное отношение:

$$\begin{aligned} y_k(x[i]) &= y_{k-1}(x[\eta_k - 1]) + \\ &+ (S - y_k(x[i]) \operatorname{sgn}(s - y_k(x[i - 1])) - x[i]), \end{aligned} \quad (3)$$

где $i = 1, 2, 3, \dots$;

$y_0(x([\eta_0]))$ – начальный уровень запаса;

k – номер периода по порядку;

η_k – номер последней заявки в k -м периоде, определяющийся из условия:

$$\operatorname{sgn}(s - y_k(x[i - 1]) - x[i]) = 1 \rightarrow i = \eta_k. \quad (4)$$

Следует отметить, что в (1)–(4) время не встречается в явной форме. Зависимость от времени существенна для объектов, функции затрат которых изменяются за рассматриваемый промежуток времени. Как правило, вид функции затрат для объектов машиностроения не изменяется за время оптимизации.

В то же время представляет значительный практический интерес проблема оптимизации запасов запасных инструментов и принадлежностей (ЗИП) для автомобильного, железнодорожного транспорта и для спецтехники.

Спецтехника – это большой класс транспортных средств специального назначения в строительстве, промышленности, транспортировке грузов, в военном деле. Автомобильную спецтехнику подразделяют по функциональному назначению: строительная, дорожно-строительная, сельхозтехника, пожарная спецтехника, железнодорожная спецтехника, и т.д., для успешного функционирования которых необходимы ЗИП в оптимальном количестве.

Фактор времени в СУЗ играет зачастую вспомогательную роль. На самом деле на складе важен уровень запаса в момент поступления очередной заявки, а не момент времени поступления заявок. Дефицит возможен только при $s < 0$. Если в системе существует задержка, то и при $s > 0$ может появиться дефицит. В этом случае при получении исходной информации и с использованием уравнения, аналогичного (3), можно обойтись в алгоритмах без использования времени в явной форме несмотря на то, что задержки имеют смысл промежутка времени. При моделировании динамики уровня запаса учтём случайную задержку через случайное количество заявок, приходящих в течение этого промежутка времени. При таком подходе удаётся отказаться от хронометрирования изменения уровня y , что существенно снижает трудоёмкость получения исходной информации. Нужны лишь данные о величине и очередности отдельных заявок, а не об их временном распределении. Сведения о величине и очередности заявок в далее рассматриваемых примерах устанавливались по отчётным документам.

Рис. 1. Графики изменения уровней запасов ЗИП-планки 1 для предприятий автомобильной промышленности (построены авторами).

Так как методы с использованием первой производной (градиента) являются необходимым условием экстремума, то будем сравнивать значения критерия в процессе вычисления $s[p], S[p]$ для различных p . Для функционала (1) воспользуемся алгоритмом типа (2):

$$J_e[p] = J_e - 1[p] - f_e[p] \{F(Z(y(s[p], S[p], x[e]))) - J_e - 1[p]\}, \quad (5)$$

где $J_e[p] = J_e(s[p], S[p])$.

В качестве возможного условного примера рассматривается математическая модель задачи оптимизации уровня запасов планок 1 и 2

Рис. 2. Графики изменения уровней запасов ЗИП-планки 2 для предприятий автомобильной промышленности (построены авторами).

(рис. 1, 2) для автопрома со случайным спросом и случайным временем задержки. Авторы проверили на приведённой модели движения запасов эффективность разработанной ими программы вычислений по системе алгоритмов (1)–(7). Во избежание не относящейся к содержанию работы дискуссии, авторы приводят данные в относительных единицах, хотя моделировался режим работы реального склада. Исходная информация о движении материальных объектов может быть получена из отчётных данных непосредственно на складе. Техничко-экономические функции могут быть получены из финансовых отчётов с последующей аппроксимацией исходных данных с помощью ортогональных полиномов Чебышева по известным методикам [9–11].

Результаты вычислений, проведённых авторами по соотношениям (1)–(5) для условных примеров, приведены на рис. 1, 2. По горизонтальной оси отложены номера заявок-спроса в порядке поступления в СУЗ, по вертикальной оси – изменения уровней s и S от исходных значений, установленных экспертным путём. Сошедшиеся значения s и S принимаются в качестве оптимальных как соответствующие минимуму целевого функционала.

ВЫВОДЫ

В работе приведена разработанная авторами на основе методов производственной логистики математическая модель стохастической СУЗ и предложен неявный способ учёта времени задержки доставки заказа на пополнение запаса на складе через учёт поступающих в течение времени задержки заявок (спрос), что и являлось целью данной публикации. Рекуррентные соотношения (2) получены методами теории идентификации [6]. Таким образом, использование современных методов производственной логистики позволило построить схему оптимизации уровня материальных средств на складе, что способно повысить эффективность и конкурентоспособность деятельности конкретных предприятий.

Следует отметить, что цифровые технологии, которые относят также к классу IT-технологий, в настоящее время находят большое применение в управлении промышленным производством и технологическими процессами. В частности, в транспортной сфере исследования по применению цифровых технологий проводятся в Государственном научном центре ФГУП «НАМИ», во множестве других организаций и ассоциаций транспортной отрасли.

Предложенная авторами модель может быть полезна для использования в практике управления запасами.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Бауэрсокс Д. Д., Клосс Д. Дж. Логистика: интегрированная цепь поставок. – 2-е изд. / Пер. с англ. – Москва: Олимп-Бизнес, 2006. – 639 с. ISBN 5-901028-84-8.
2. Waters, D., Rinsler, S. Global Logistics: New Directions in Supply Chain Management. CPI Group (UK), 2014, 512 p.
3. Afshar Sedigh, A. H., Haji, R., Sajadifar, S. M. Cost function and optimal boundaries for a two-level inventory system with information sharing and twoidential retailers. Scientia Iranica E, 2019, Vol. 26 (1), pp. 472–485. [Электронный ресурс]: http://scientiairanica.sharif.edu/article_20144_0bc9ef3cd5e3414551be58cda4fdde4f.pdf. Доступ 23.04.2020.
4. Сергеев В. И., Эльяшевич И. П. Логистика снабжения. – М.: Рид Групп, 2015. – 416 с.
5. Рыжиков Ю. И. Логистика и Теория очередей: Учебное пособие. – М.: Лань, 2019. – 456 с.
6. Цыпкин Я. З. Основы обучающих систем. – М.: Изд-во «Наука», 1970. – 252 с.
7. Антипенко В. С., Галкин К. В. Оптимальное управление запасами для спецтехники // «Грузовик». – 2011. – № 11. – С. 29–31. [Электронный ресурс]: <https://www.mashin.ru/files/2011/gz1111.pdf>. Доступ 23.04.2020.
8. Антипенко В. С., Галкин К. В., Шарипова Е. В., Безруков А. В. Управление запасами запасных частей и принадлежностей методами информационных технологий // Известия МГТУ МАМИ. – 2007. – № 2 (4). – С. 133–136. [Электронный ресурс]: <https://cyberleninka.ru/article/n/inventory-management-of-spare-parts-and-accessories-using-information-technologies/pdf>. Доступ 23.04.2020.
9. Радионов А. Р., Радионов Р. А. Менеджмент: нормирование и управление производственными запасами и оборотными средствами предприятия: Учеб. пособие. – М.: Экономика; Казань: ГУП ПИК Идел-Пресс, 2005. – 614 с.
10. Бородин Н. Н. Современные технологии и система управления ресурсами предприятий. – Тула: Изд-во Тул. гос. пед. ун-та им. Л. Н. Толстого, 2004. – 113 с.
11. Мерфи П. Р., Вуд Д. Ф. Современная логистика. – 8-е изд. / Пер. с англ. – М.: ООО «И.Д. Вильямс», 2017. – 720 с.

Информация об авторах:

Антипенко Виталий Сафронович – доктор технических наук, профессор Академии базовой подготовки Российского университета транспорта, Москва, Россия, Antipenkovs7@mail.ru.

Бабич Николай Сергеевич – аспирант Российского университета транспорта, Москва, Россия, babitch.col@yandex.ru.

Галкин Константин Владимирович – инженер ПТО ООО «ДЕФШОВ», Москва, Россия, galkin_kostya@bk.ru.

Статья поступила в редакцию 23.04.2020, актуализирована 04.12.2020, одобрена после рецензирования 05.02.2021, принята к публикации 23.04.2021.