УДК 658.7

С.В. Краснов, С.М. Сергеев, С.А. Краснова

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ 3PL-ПРОЦЕССОВ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОГО ТЕРМИНАЛА

Краснов Сергей Васильевич, *кандидат технических наук, окончил Ульяновское высшее военное командное училище связи, адъюнктуру Ульяновского высшего военного инженерного училища связи. Доцент Высшей школы технологий управления бизнесом Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. Имеет более 50 работ в области проектирования и внедрения информационных систем и технологий. [e-mail: hsm.krasnov@gmail.com].*

Сергеев Сергей Михайлович, *доцент, кандидат технических наук, окончил Ленинградский государственный университет им. А.А. Жданова. Доцент Высшей школы торговли и сервиса Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. Имеет более 100 работ в области математического моделирования в экономике и менеджменте. [e-mail: sergeev2@yandex.ru].*

Краснова Светлана Алексеевна, *окончила Ульяновский государственный технический университет. Старший преподаватель Военной академии связи им. С.М. Буденного. Имеет более 20 работ в области экономики и менеджмента. [e-mail: k.svetlana67@mail.ru].*

Аннотация

Крупные логистические центры, такие как морские порты, требуют постоянного управления логистическими потоками в целях удовлетворения потребностей различных коммерческих структур. В статье рассматривается задача моделирования логистических потоков таких центров, представленных в виде двухступенчатых складских систем. Формирование математической модели рассматривается в работе с привлечением методик описания стохастических процессов динамики прохождения товарных масс. В качестве ограничений при этом могут выступать временные ограничения. Описанная в статье математическая модель позволяет решить задачу определения оптимального управления потоками товаров в распределительном центре. Приведены расчеты, которые позволяют дать прогноз о целесообразности создания запасов по конкретной позиции спроса, что дает возможность оптимизации как расходов на содержание, так и объема площадей. В работе приводятся расчеты разработанной математической модели на примере Калининградского морского порта. Расчеты позволяют определить наличие значительных ресурсов для повышения таких показателей, как интенсивность использования складских объемов, равномерность загрузки, сокращение убытков по причине превышения допустимых сроков хранения продукции.

Ключевые слова: транспортно-логистический центр, оптимизация хранения товарных запасов, двухступенчатая складская система.

MATHEMATICAL MODELING OF 3PL PROCESSES OF THE DISTRIBUTION TERMINAL

Sergei Vasilevich Krasnov, *Candidate of Engineering; graduated from the Ulyanovsk Higher Military Command School of Communications, an adjunct of Ulyanovsk Higher Military Engineering Communication School. Associate Professor of Graduate School of Business Technologies of Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University; an author of more than 50 works in the field of design and implementation of information systems and technologies. e-mail: hsm.krasnov@gmail.com.*

Sergei Mikhailovich Sergeev, *Candidate of Engineering, Associate Professor; graduated from Leningrad State University named after A.A. Zhdanov; Associate Professor of Graduate School of Trade and Services of Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University; an author of more than 100 papers in the field of mathematical modeling in economics and management. e-mail: sergeev2@yandex.ru.*

Svetlana Alekseevna Krasnova, *graduated from Ulyanovsk State Technical University; Senior Lecturer of the Marshal Budjonny Military Academy of Signal Corps; an author of more than 20 papers in the field of economics and management. e-mail: k.svetlana67@mail.ru.*

Abstract

Major logistics centers such as ports require continuous management of logistic flows in order to meet the needs of various commercial structures. The article deals with the objective of logistics flows modeling of such centers presented in the form of two-stage inventory systems. The formation of the mathematical model is described involving the methods of description of stochastic processes of commodity masses passage dynamics. As constraints, herewith may be the time constraints. The mathematical model described in the article allows to solve the problem of determining optimal goods` control of flows in a distribution center. The calculations allowing to predict the feasibility of stock forming on the specific demand position were carried out. It gives an opportunity to optimize both maintenance costs and the space volume. The work presents the calculations of the developed mathematical model illustrated with an example of the Kaliningrad seaport. The calculations allow to identify the presence of significant resources to improve such indicators as intensity of warehouse volume`s usage, load uniformity, damages reduction by reason of excess of the maximum shelf life of production.

Key words: transport and logistics center, optimization of store inventory, two-level warehousing system.

Введение

Глобализация торговых и производственных процессов, объединение коммерческих структур торговли товарами и услугами в транснациональные сети содействовали развитию концепции распределительных систем, включающих в себя крупные терминалы, склады, выступающие как провайдеры 3PL (Third Party Logistics) услуг. При этом их функционал достаточно обширен и гибко подстраивается под конкретный сегмент коммерческой деятельности.

Если для предприятий ритейла уже имеются наработки по оптимальным алгоритмам складского, логистического обслуживания [1, 2], то задача организации потоков в крупных терминалах не может быть решена в рамках детерминированного подхода. Для поиска приемлемого на практике результата необходима разработка математических моделей [3] с привлечением методик описания стохастических процессов динамики прохождения товарных масс. При этом в качестве критерия берутся не только финансово-экономические показатели, но еще учитываются также ограничения по времени, обусловленные как предельными сроками хранения продуктов, так и нахождением в процессе перемещения, таможенных или иных процедур обработки грузов и связанной с ними информации.

Цель работы

В настоящей работе анализируется деятельность двухступенчатой складской подсистемы крупных транспортно-логистических узлов. При этом верхним уровнем служит распределительный центр DC (distribution center), как правило, реализованный в форме крупного объекта, объединяющего складские комплексы, относящиеся к категории «А» по классификации Knight Frank. Так как для математического описания [4] не имеют большого значения тип, тара, характеристики грузов, то в понятие DC вкладываются все типы хранилищ. При этом такие параметры, как температурный режим, различия между тарными, жидкими и сыпучими грузами, expiry date, отражены в их формализованных экономических показателях. Вторым уровнем является локальный склад SW (Store Warehouse) максимально приближенной к потребителю локации. Как правило, на один DC приходится несколько объектов SW, объединенных в системе spoke-hub distribution.

Разработка математического описания

Введем ряд формализмов [5], необходимых для составления математической модели:

w – уровень запасов DC/SW;

v – выраженный в стандартных единицах объем, $w \geq 0$;

$r = w + v$ – отражает суммарный объем запасов;

z – стохастическая переменная спроса, выраженного в стандартных единицах, $z \geq 0$;

$p(z)$ – функция распределения z;

D – объем запроса в товарных единицах в единицу времени;

L – продолжительность исполнения, длительность (last) интервала времени реализации заказа;

D_L – объем спроса в единицах или норма спроса на плановом отрезке времени L.

Ввиду сепарабельности процесса выполняется $D_L = D \cdot L$; $TC(v)$ – функция зависимости общих затрат; FC(fixed cost) с условием $FC > 0$ отражает накладные расходы; $\Phi(r)$ – функция ожидаемых затрат; β, удовлетворяющая условию $\beta > 0$, – затраты на содержание; γ – потери.

Определяемое как $\Omega^* = (\gamma - c) / (\gamma + \beta)$ значение Ω^* является критическим отношением $0 < \Omega^* < 1$; неотрицательная величина S равняется наименьшему целому числу из натурального ряда значений, для которого будет выполняться следующее неравенство:

$\Omega\,(S) = \sum_{z=0}^{S} p(z) \geq \Omega^*$; $\varphi(r \mid w)$ – средние затраты, равны расходам, когда объем запасов равен r при начальном объеме w.

Проведем анализ EOQ (Economic Order Quantity) модели на стабильность работы в условиях рыночной неопределенности. Устойчивость экономической деятельности распределительного [6] предприятия определяется выбором расчетных параметров EOQ, показателем Δ^*. Такой анализ позволит оценить конкурентоспособность в условиях рыночной неопределенности. Так как из выражения [7] оптимального значения $\Delta^* = \sqrt{\dfrac{2FC \cdot D}{\beta}}$ следует, что по отношению к размеру накладных расходов FC рост ниже линейной зависимости. Это обусловлено зависимостью Δ^* от корня из нормы спроса D и обратной от расходов β на содержание складских запасов. При двукратном колебании нормы спроса, EOQ увеличивается лишь в пределах 40%. Соответственно, когда β удорожается вдвое, то требуемое EOQ снижается лишь на 30%. При анализе формулы расчета T^* – времени между датами пополнения складских запасов $T^* = \dfrac{EOQ}{D} = \dfrac{\Delta^*}{D} = \sqrt{\dfrac{2FC}{\beta D}}$, следует, что при росте нормы спроса D растет Δ^*, но укорачивается промежуток, определяемый оптимальным значением T^*. В реальной деятельности DC это проявляется в более частом обращении к поставщикам для поддержания эмерджентного запаса. При оценке динамики [8] работы распределительного склада принципиален выбор EOQ при наличии ограничений по кратности. Такой вид регламента обусловлен, как правило, стандартами тары, логистикой и фигурирует как в виде минимальных объемов поставок, так и в упаковочных единицах. Расчет Δ^* на практике сводится к выбору Δ, наиболее приближенному к оптимальному. Тогда реальный кратный заказ вычисляется по формуле:

$\Delta = \tau \cdot \Delta^* = \tau \cdot \sqrt{2KM/h}$, где $\tau > 0$.

Отсюда из формулы расчета средних затрат $AC = \dfrac{FC \cdot D}{\Delta} + cD + \dfrac{\beta\Delta}{2}$, переменную составляющую возможно представить как

$$VC(\tau) = \frac{FC \cdot D}{\Delta^*} + \frac{\beta \cdot \Delta^*}{2} =$$
$$= \frac{FC \cdot D\sqrt{\beta}}{\tau\sqrt{2FC \cdot D}} + \frac{\beta r\sqrt{2FC \cdot D}}{2\sqrt{\beta}}.$$

Здесь вместо Δ^* подставлено фактическое, кратное значение и, кроме того, исключена компонента Fixed cost, равная cD. Из анализа выражения $\xi = VC(\tau)/VC(1) = \dfrac{\left(\tau^{-1} + \tau\right)}{2}$ и расчета с применением ЭВМ зависимости переменной составляющей затрат от значения τ можно делать вывод о низкой чувствительности Δ, что отражено на рисунке 1.

При этом отклонение переменных расходов не превышает 10% или $VC(\tau) \le 1{,}1 \cdot VC(1)$ в интервале $0{,}55 \le \tau \le 1{,}6$, то есть отмечается весьма незначительное влияние фактора кратности, выраженного в отклонении Δ от оптимума Δ^*. Для целей анализа оставим половинный диапазон путем ввода $\tau' = \tau^{-1}$, будем учитывать, что соотношение $VC(\tau)\,/\,VC(1)$ инвариантно к замене τ на τ'.

Реальная деятельность распределительных центров и эмерджентных [9] складов любых структур проходит при дискретном характере как объемов размещаемых единиц товаров, так и периодов планирования пополнения запасов.

Для получения результатов моделирования в условиях дискретности числа товаров, временных периодов, а также кратности товарных единиц, под параметром D в модели будем считать число товаров, обусловленных спросом в единичный период.

Реализация поставок DT единиц товара сопровождается расходами C_T, где $T = 1,\ 2,\ ...$ – натуральное число. Это равносильно C_T, как показателю, отражающему расходы за период в T плановых единиц времени. Его рассчитаем по формуле:

$C_T = FC + cDT + ½\beta D\ (T-1)T.$

Оптимальный режим работы определим из минимума C_T/T. При учете $T = 1,\ 2,\ ...$ его реализация равносильна поиску $\min\limits_T \left[\dfrac{FC}{T} + cD + \dfrac{1}{2}\beta D\left(T-1\right)\right]$.

Продифференцировав и приравняв к нулю, решим уравнение относительно T. Получим результат T^* в виде: $T^* = \sqrt{2FC/\beta D}$. Отсюда следует, что EOQ или Δ^* рассчитывается как: $\Delta^* = D \cdot T^* = \sqrt{2FC \cdot D/\beta}$. В завершение расчета округлим T^*как снизу, так и сверху. Это позволит, дополнив процедуру экономическим расчетом, найти из них самый выгодный вариант.

При оценке экономических индексов деятельности распределительного центра показатели формируются с определенной периодичностью. С помощью математической модели [10] можно связать расчеты с затратами на содержание складских запасов.

Режим онлайн-взаимодействия показывает, что DC находится частично в состоянии обусловленной договорными обязательствами отсрочки исполнения требований. Доля такого времени рассчитывается по формуле $-s/\Delta$, где принято $s \le 0$, т. е. допускается отрицатель-

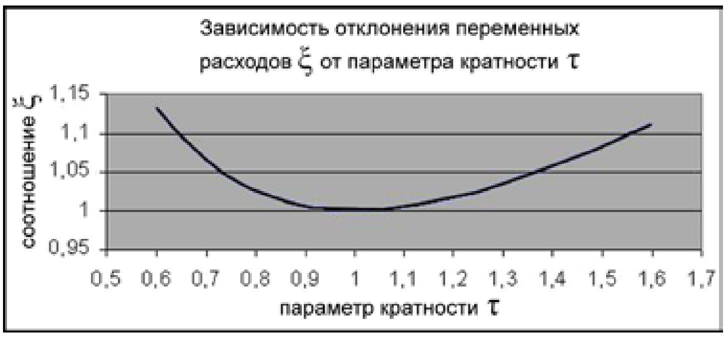

Рис. 1. Расчет чувствительности

ный критический уровень. Объем грузов за период отрицательного значения запасов на распределительном центре равен $(-s/2)$ товарных единиц. Отсюда вытекает экономически обусловленная потеря спроса, приведенная к единичному периоду планирования, исчисляемая, как $-s^2/2\Delta$. Это дает интегральные убытки по штрафам, потере репутации и неполученной выгоде. Коэффициент γ (>0) отражает потери за неудовлетворенный спрос в единичный период по товарной единице. Получим AC – размер средних затрат за период:

$$AC = \frac{FC \cdot D}{\Delta} + cD + \frac{(\beta+\gamma)S^2}{2\Delta} - \gamma S + \frac{\gamma}{2}\Delta.$$

При этом γ – интегральный показатель, и для поиска оптимального режима работы распределительного центра, найдем его минимум. Продифференцировав AC по S – эмерджентному запасу после пополнения DC, получим оптимальный объем запасов:

$$S^* = \left(\frac{\gamma}{\beta+\gamma}\right)\Delta.$$

При расчете оптимального EOQ с учетом S^* в итоге имеем Δ^*, S, s:

$$\Delta^* = \sqrt{2FC \cdot D\left(\frac{1}{\beta} + \frac{1}{\gamma}\right)},$$

$$S = \sqrt{2FC \cdot D\left(\frac{\gamma}{\beta(\beta+\gamma)}\right)},$$

$$s = -\sqrt{2FC \cdot D\left(\frac{\beta}{\gamma(\beta+\gamma)}\right)}.$$

Формирование общей модели

Полученные результаты по моделированию загрузки по отдельной позиции можно теперь распространить на всю ассортиментную матрицу.

Выше, при формировании динамической модели на промежутках горизонта планирования, полагались детерминированными затраты на реализацию деятельности FC, а также стоимость содержания текущих запасов. В реальной работе DC практически всегда $L>0$. Введем понятие z_L фактического потребительского спроса в промежутке от получения требования на товар и совершения поставки. Параметр z_L – случайная величина со своим законом распределения. Неравенство $z_L > s$ означает отсрочку получения груза.

Такая схема реализована в DC, ориентированных на технологию кросс-докинга. Наличие SW позволяет оптимизировать [11] уровень эмерджентных запасов на ограниченных локальных складских помещениях. Парадигма spoke-hub distribution востребована как раз в связи с тем, что 3PL-игрок решает множество проблем, в частности затраты на аренду, удаленность от потребителя, ограничения по сроку годности товаров.

Управляющие алгоритмы выбираются на основе критерия эффективности работы распределительного центра. Его выбор обусловлен рядом параметров, действие которых разнонаправлено. При программировании процедуры поиска экстремума функционала наиболее релевантно отразить снижение издержек при условии выполнения поставленных бизнесом задач.

Введем функцию распределение $p_L(z_L)$, как зависимость фактического потребления на промежутке L упреждения. Поскольку постулаты стационарности, ординарности и отсутствии последействия учтены самой постановкой вопроса о выборе ограничений при разработке функционала, можно утверждать о функции распределения $p_L(z_L)$, что на интервале T она подчиняется закону Пуассона: $p_L(T) = (M_T T)^{Z_L} \cdot e^{-M_T T} / Z_L!$. С одной стороны, такое представление существенно облегчает анализ и получение теоретических результатов. Однако на практике не всегда выполняется условие равенства математического ожидания и среднеквадратического отклонения, подтверждающего такую гипотезу. Реализация математической модели [12] всегда включает разработку программного комплекса, что позволяет заложить в расчеты произвольный вид функции распределения $p_L(z_L)$, расширяя возможности модели.

Введем в целевой функционал характеристику расходов θ_s на реализацию требований о поставке. Согласно полученным выражениям определения EOQ можно записать для них следующее: $\theta_s = FC \cdot D/\Delta + cD$.

Кроме того, определим расходы на содержание запасов, добавив оценку вероятных убытков. На промежутке планирования между последовательными требованиями на пополнение склада рассмотрим различные ситуации. Учтем вариант спроса, отвечающего неравенству $z_L < S$, и альтернативный. Для этого введем в ранее полученные уравнения расчета на рассматриваемом плановом отрезке выражения для функции распределения $p_L(z_L)$ и получим следующее:

$$C_T = \sum_{z_L=0}^{s} \frac{1}{2}\left[s + (s - z_L)\right] p_L(z_L) + {}$$

$$+ \sum_{z_L>s} \frac{1}{2}\left[s+0\right] p_L(z_L) =$$

$$= \frac{1}{2}\left[s + \sum_{z_L=0}^{s} (s - z_L) p_L(z_L)\right].$$

Из M_L – математического ожидания $p_L(z_L)$, следует усредненный уровень запасов на плановом участке от момента загрузки, до очередного заказа:

$$\frac{1}{2}\left[(s - M_L + \Delta) + s\right] = \frac{1}{2}(2s - M_L + \Delta). \quad (1)$$

В функционал экономических показателей DC введем полученные результаты с учетом весовых коэффициентов. Для ожидаемого уровня ресурсов склада определим весовой коэффициент $\mu = M_L / \Delta$, равный доле планового промежутка, относящейся к режиму ожидания. Усредненный уровень берем с весовым коэффициентом $(1 - M_L / \Delta)$, как дополнение к μ.

После преобразования, выражение для $\tilde{r}$ – среднего уровня ресурсов, приведенного к единичному периоду:

$$\tilde{r} = \frac{M_L}{2\Delta}\left[-2s + M_L - \Delta + s + \sum_{z_L=0}^{s}(s - z_L)p_L(z_L)\right] + \\ + \frac{1}{2}(2s - M_L + \Delta).$$

Так как для произвольной $p_L(z_L)$ выполняется соотношение:

$$\sum_{z_L=0}^{s}(s - z_L)p_L(z_L) = \\ = s - M_L - \sum_{z_L>s}(s - z_L)p_L(z_L),$$

и, выразив через $p_L(z_L)$ возможный дефицит товаров как: $\sum_{z_L>s}(s - z_L)p_L(z_L)$, рассчитаем ожидаемый дефицит в единицу времени планового периода через весовой коэффициент D / Δ. Полученные выражения в формализованном виде дают затраты $\tilde{\Phi}$ на содержание DC в единичный плановый период.

$$\tilde{\Phi} = \frac{FC \cdot D}{\Delta} + cD + \beta\left(\frac{\Delta}{2} - M_L + s\right) + \\ + \left(\frac{\beta M_L}{2\Delta} + \frac{D\gamma}{\Delta}\right)\sum_{z_L>s}(z_L - s)p_L(z_L). \quad (2)$$

Теперь становится возможным решить задачу определения оптимального управления потоками товаров в распределительном центре. Для этого необходимо найти экстремум выражения $\tilde{\Phi}$ путем вычисления частной производной и решения уравнения $\frac{\partial E[AC]}{\partial \Delta} = 0$ относительно входящей в него переменной Δ. Проведя несложные преобразования, получим искомое оптимальное значение в виде математического выражения:

$$\Delta^* = \sqrt{\frac{2FC \cdot D}{\beta} + \left(M_L + \frac{2D\gamma}{\beta}\right)\sum_{z_L>s}(z_L - s)p_L(z_L)}. \quad (3)$$

Так как решение проблемы можно считать законченным при условии нахождения целочисленных параметров, то, переходя к дискретному виду статистического распределения $\Omega_L(r) = \sum_{z_L=0}^{r} p_L(z_L)$, получим в результате оптимальное управляющее значение s^* при условии $(s^* > 0)$ в виде наименьшего целого числа, отвечающего неравенству:

$$\Omega_L(s^*) > \Omega^*, \text{ где } \Omega^* = 1 - \frac{\beta\Delta}{\beta M_L / 2 + D\gamma}. \quad (4)$$

Это и даст искомый критический уровень работы распределительного центра.

Из полученных результатов моделирования деятельности DC в условиях рыночной неопределенности можно сделать следующий вывод о том, что планируемые закупки и уровень товарных запасов только тогда экономически наиболее выгодны, если одновременно выполняются условия (3) и (4).

Только при таком подходе к управлению [13] эмерджентными запасами можно достичь минимума затрат, отвечающего проведению оптимальной бизнес-стратегии. Искомое значение при этом рассчитывается по формуле, учитывающей вышеприведенные рассуждения о расчете s^*:

$$\min\tilde{\Phi} = cD + \sqrt{2\beta\left[FC \cdot D + \left(\frac{\beta M_L}{2} + D\gamma\right)\sum_{z_L>s}\left(z_L - s^*\right)p_L(z_L)\right]} + \beta\left(s^* - M_L\right). \quad (5)$$

Расчеты по указанному выражению позволяют дать прогноз о целесообразности создания запасов по конкретной позиции спроса. Так как ассортимент складов DC настолько обширен, что физически невозможно держать запасы по всей номенклатуре и предварительный анализ уровней спроса, вероятности заказа на конкретную позицию и потерь из-за отсутствия такого товара в наличии даст возможность оптимизировать как расходы на содержание, так и объем площадей.

Отдельно можно рассмотреть вопрос о стохастическом характере величины L. Такая ситуация возникает не только в торговле, например при доставке товаров из различных складов, при трансграничных поставках, когда возможны случайные задержки при выполнении таможенных процедур и в очередях на границе, но и в сфере обслуживания, где спектр вероятных причин изменения L гораздо шире. Полученная модель полностью подходит и в этом случае, с той разницей, что меняется структура функции распределения $p_L(z_L)$, но поскольку, как указано выше, никаких ограничений на ее вид не накладывалось, то и результаты моделирования полностью реализуются при увеличении размерности функций.

Пример расчета деятельности DC

Расчет на конкретных значениях потоков грузов, ассортимента и параметров складов проведен с использованием отчетности ФГБУ «Администрация морских портов Балтийского моря» и при взаимодействии с Балтийским федеральным университетом.

В порту Калининграда ежегодно обслуживается около 10 тысяч крупных судов с общим объемом перевозок до 50 млн. тонн. Формат грузов разнообразный, обрабатываются как генеральные, так и насыпные и наливные. Разработанная математическая модель не рассматривает морской транспорт как элемент логистических схем или перевозчиков. В настоящем расчете использованы данные по сегменту складского хозяйства, обслуживающему суда, именно как клиентов, которые потребляют товары и услуги. Для этого в портовой инфраструктуре предусмотрены следующие сервисы:

- снабжение судна провизией, включая продукцию под собственной торговой маркой. При этом ассортимент данных грузов исключительно высок, включает 18400 артикулов, имеет ограниченные сроки годности, требует особых условий хранения. Поскольку в год загружаются около 1500 круизных судов, круизных лайнеров, паромов, данное направление работы составляет значительную долю в движении товарных запасов;
- поставка воды как технической, так и питьевой;
- заправка топливом;
- заправка транспортов всевозможными химикатами, смазочными материалами, рефрижераторного и климатического оборудования судов;
- снабжение энергией, паром как на стоянке, так и поставкой батарей электропитания, сменных аккумуляторов и другими источниками питания и видов энергии;
- снабжение расходными материалами, консумативами;
- поставка ассортимента для текущего техобслуживания судовых агрегатов, ремонтных и регламентных запчастей;
- другие виды материального снабжения, такие как гигиенические материалы, вещевое довольствие, лекарственные препараты и пр.

На первом этапе на компьютере смоделирована динамика [14] движения однопродуктовой загрузки (рис. 2), в зависимости от закона распределения $p_L(z_L)$ согласно формулам (1, 2) настоящей работы, а также для 4 продуктов (рис. 3).

При анализе результатов можно отметить, что в ряде случаев образуется расчетный отрицательный уровень загрузки (см. пунктирный график на рисунке 2). Это объясняется тем, что в резерве DC образовался отложенный спрос, обусловленный наличием временного лага между запросом [15] на некоторую позицию товара и его исполнением. Такой случай поведения достаточно распространен в практике online-взаимодействия и позволяет как планировать бизнес-деятельность распределительного центра, оптимизировать его объемы, так и минимизировать затраты на размещение в SW и их необходимые площади.

Далее на большом ассортименте было проведено моделирование движения суммарной загрузки распределительного центра в обычном режиме (рис. 4) и с применением формул (3–5) (рис. 5). Из полученных результатов можно судить об имеющемся ресурсе оптимизации складского пространства, что позволяет либо обойтись меньшими площадями, либо получить возможность дополнительного ресурса на увеличение числа судов, обслуживаемых данным DC.

Исследование результатов позволяет выдвинуть обоснованное предположение о том, что суммарный поток возможно моделировать при использовании функции распределения, отличающейся от Пуассоновского процесса. Основанием для этого служит тот факт, что в реальной работе DC происходит суммирование со-

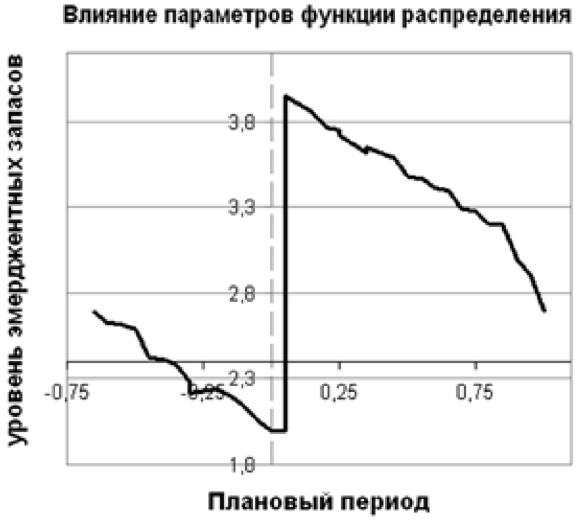

Рис. 2. Анализ функции распределения

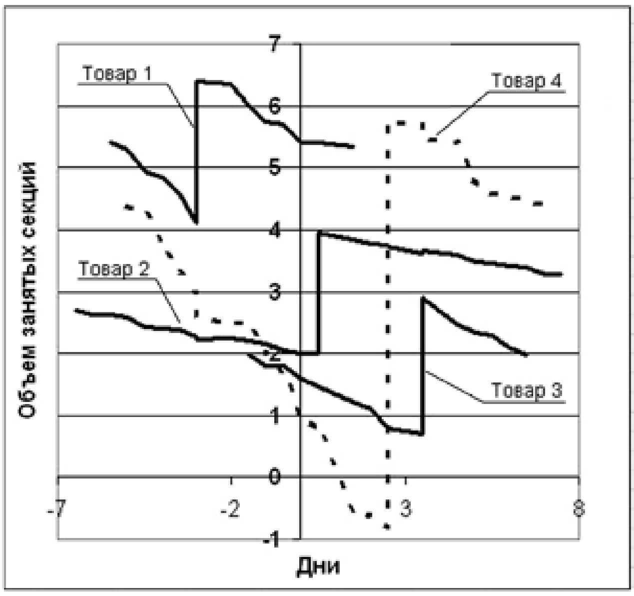

Рис. 3. Движение запасов DC

тен потоков, что укладывается в условия центральной предельной теоремы, и кроме того выполняется условие Линдеберга о сравнимой их интенсивности. Для обобщения результатов рассмотрим наиболее распространенную на практике модель использования Гауссового распределения вероятности. Ее применение выгодно отличается тем, что не ограничивается условием равенства математического ожидания и среднеквадратического отклонения, характерного для Пуассоновских процессов, что причиняет неудобства на практике.

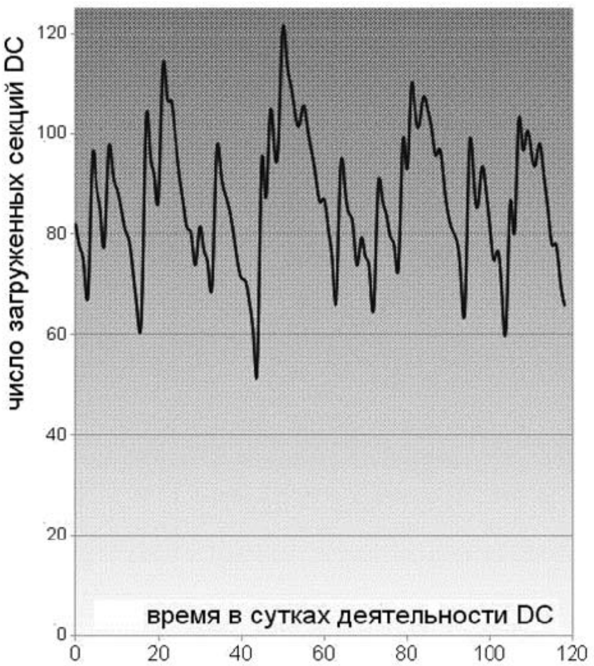

Рис. 4. Обычный режим работы

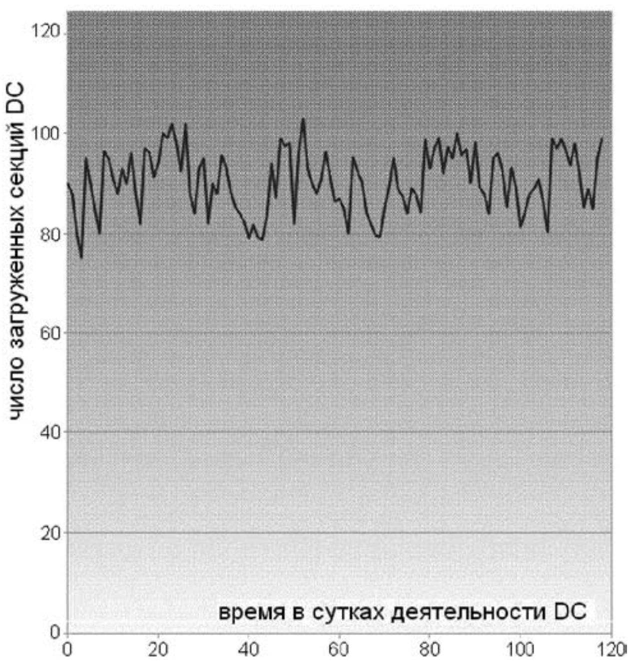

Рис. 5. Оптимальный режим работы

Для применения методов моделирования плановой [16] деятельности распределительного центра в условиях рыночной неопределенности введем приведенную случайную величину. Для этого необходимо переопределить z_L в центрированную и нормированную величину u_χ. Рассчитаем характеристики математического ожидания M_L и дисперсии $V_L = \sum_{z_L>0} (z_L - M_L)^2 p_L(z_L)$. Тогда можно определить: $u_\chi = \dfrac{\chi - M_L}{\sqrt{V_L}}$ и, соответственно, $\chi = M_L + u_\chi \sqrt{V_L}$. Исходя из ранее полученного выражения для $\Omega^* = 1 - \dfrac{\beta\Delta}{\beta M_L/2 + D\gamma}$, запишем обычное выражение функции Гаусса как: $G(u) = \int_{-\infty}^{u} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-t^2/2} dt$, а также интегральную функцию, корреспондирующую с ней и при этом нормированную в виде: $G^*(u) = \int_{u}^{\infty} (t-u) \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-t^2/2} dt.$

Отсюда следует, что для оценочных расчетов при условии принятия нормального характера функции распределения $p_L(z_L)$, можно использовать уравнение:

$$\sum_{z_L>\chi} (z_L - \chi) p_L(z_L) \approx \sqrt{V_L} \cdot G^*(u_\chi).$$

При этом для расчета u_χ вместо прежнего условия $\Omega_L(s^*) > \Omega^*$ используется другое: $G(u_\chi) = \Omega^*$, и для определения оптимальной величины Δ^* применяется уравнение:

$$\Delta^* = \sqrt{\frac{2FC \cdot D}{\beta} + \left(M_L + \frac{2D\gamma}{\beta}\right) \sqrt{V_L} \cdot G^*(u_\chi)}.$$

Выводы

Современный распределительный складской комплекс крупного порта представляет собой сложноорганизованную коммерческую структуру. Решение задачи совершенствования работы такого предприятия требует применения научных методик, основанных на использовании математических моделей с привлечение аппарата теории стохастических процессов и методов [17] теории оптимальных решений. Расчеты показывают значительные ресурсы повышения таких показателей, как интенсивность использования складских объемов, равномерность загрузки, сокращение убытков по причине превышения допустимых сроков хранения продукции.

Результатом должно стать повышение экономической эффективности всего комплекса распределительных складов, что с учетом капиталовложений и значительного оборота такого бизнеса даст не только существенное увеличение прибыли, но и предоставит конкурентное преимущество на активно развивающемся рынке оказания услуг распределительных центров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Краснов С.В., Краснова С.А. Особенности интеграции данных при внедрении информационной системы на предприятиях торговли // Проблемы экономики и управления в торговле и промышленности. – 2015. – № 1 (9). – С. 18–20.

2. Сергеев С.М. Математическое моделирование работы коммерческих сетей в условиях инноваций // Системы управления и информационные технологии. – 2012. – Т. 50, № 4. – С. 44–48.

3. Сергеев С.М. Математическое моделирование порожденного спроса в коммерческих сетях // Экономика и менеджмент систем управления. – 2015. – Т. 16, № 2. – С. 66–74.

4. Сергеев С.М. Моделирование клиентских потоков в узле ритейлера // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Экономические науки. – 2012. – № 3 (149). – С. 129–133.

5. Сергеев С.М. К вопросу моделирования рыночных стратегий при неполной информации // Современные методы прикладной математики, теории управления и компьютерных технологий (ПМТУКТ-2015) : сб. тр. VIII Междунар. конф. – Воронеж, 2015. – С. 326–328.

6. Sergeev S.M. Cross-systems method of approach to energy economy higher educational institutions // Economics. Society: Selected Papers of the International Scientific School «Paradigma» (Summer-2015, Varna, Bulgaria) Compiling Editor Dr.Sc., Prof. E. Sibirskaya. Yelm, WA, USA, 2015. pp. 38–41.

7. Harley M.Wagner. Princioles of operation research. Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs. New Jersey, 1969. Vol. 3. 502 p.

8. Борисоглебская Л.Н., Сергеев С.М. Моделирование динамических процессов в сетевых объектах с саморегулируемыми экономическими связями // Математика и ее приложения. – 2011. – № 1. – С. 7–14.

9. Сергеев С.М. Математическое моделирование кросс-узлов коммерческих сетей // Научные исследования и разработки в эпоху глобализации : сб. ст. Междунар. науч.-практ. конф. – Киров, 2016. – С. 90–92.

10. Сергеев С.М. Теоретический подход к управлению обеспеченностью коммерческой сети // Экономика и менеджмент систем управления. – 2015. – № 3.1 (17). – С. 175–183.

11. Сергеев С.М., Сидненко Т.И. Мультидисциплинарная конвергенция информационной образовательной среды // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – 2015. – № 5. – С. 88–95.

12. Сергеев С.М. Моделирование J.I.T. менеджмента кластера пищевой промышленности // Экономика и менеджмент систем управления. – 2013. – Т. 8, № 2. – С. 62–68.

13. Krasnov S.V., Sergeev S.M., Mukhanova N.V., Grushkin A.N. Methodical forming business competencies for private label // Reliability, Infocom Technologies and Optimization (Trends and Future Directions) : 6th International Conference ICRITO. 2017. pp. 569–574.

14. Кириченко В.В., Сергеев С.М. Математическая модель движения порожденного спроса // Роль инноваций в трансформации современной науки : сб. ст. Междунар. науч.-практ. конф. – Уфа, 2016. – С. 77–79.

15. Краснов С.В., Краснова С.А. Повышение эффективности принятия управленческих решений при использовании семантической составляющей в информационной системе предприятия // Проблемы экономики и управления в торговле и промышленности. – 2013. – № 4. – С. 21–25.

16. Sergeev S.M. Cross-system way of looking to business with limited resources // Selected Papers of the International Scientific School «Paradigma» Winter-2016 (Varna, Bulgaria) Compiling Editor Dr.Sc., Prof. O.Ja. Kravets. Yelm, WA, USA, 2016. pp. 95–102.

17. Краснов С.В., Краснова С.А. К проблеме выбора математического метода прогнозирования в маркетинговых информационных системах // Экономика и менеджмент систем управления. – 2016. – Т. 20, № 2. – С. 68–73.

REFERENCES

1. Krasnov S.V., Krasnova S.A. Osobennosti integratsii dannykh pri vnedrenii informatsionnoi sistemy na predpriiatiiakh torgovli [Features of Integration Data in the Implementation of the Information Systems in the Trading Enterprises]. *Problemy ekonomiki i upravleniia v torgovle i promyshlennosti* [Problems of Economics and Management in Trade and Industry], 2015, no. 1 (9), pp. 18–20.

2. Sergeev S.M. Matematicheskoe modelirovanie raboty kommercheskikh setei v usloviiakh innovatsii [Simulation of Commercial Networks in Terms of Innovation]. *Sistemy upravleniia i informatsionnye tekhnologii* [Automation and Remote Control], 2012, vol. 50, no. 4, pp. 44–48.

3. Sergeev S.M. Matematicheskoe modelirovanie porozhdennogo sprosa v kommercheskikh setiakh [Mathematical Modeling of Generated Demand in Business Networks]. *Ekonomika i menedzhment sistem upravleniia* [Economics and Management of Management Systems], 2015, vol. 16, no. 2, pp. 66–74.

4. Sergeev S.M. Modelirovanie klientskikh potokov v uzle riteilera [Calculation of the Flow in Retail Chain Store]. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta. Ekonomicheskie nauki* [St. Petersburg Polytechnic University Journal of Engineering Science and Technology. Economics], 2012, no. 3 (149), pp. 129–133.

5. Sergeev S.M. K voprosu modelirovaniia rynochnykh strategii pri nepolnoi informatsii [Revisiting the Modeling of Market Strategies under Incomplete Information]. *Sovremennye metody prikladnoi matematiki, teorii upravleniia i kompiuternykh tekhnologii (PMTUKT-2015). Sb. tr. VIII Mezhdunar. konf.* [Proc. of 8th International Conf. on State-of-the-Art Methods of Applied Mathematics, Management Theory and Computer Technologies (PMTUKT-2015)]. Voronezh, 2015, pp. 326–328.

6. Sergeev S.M. Cross-Systems Method of Approach to Energy Economy Higher Educational Institutions. *Economics. Society: Selected Papers of the International Scientific School "Paradigma"* (Summer-2015, Varna, Bulgaria). Compiling Editor Dr. Sc., Prof. E. Sibirskaya. Yelm, WA, USA, 2015, pp. 38–41.

7. Harley M. Wagner. *Principles of Operation Research.* Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1969, vol. 3, 502 p.

8. Borisoglebskaia L.N., Sergeev S.M. Modelirovanie dinamicheskikh protsessov v setevykh obektakh s samoreguliruemymi ekonomicheskimi sviaziami [The Modeling of Dynamic Processes in Network Objects with Self-Regulating Economic Relations]. *Matematika i ee prilozheniia* [Mathematics and its Applications], 2011, no. 1, pp. 7–14.

9. Sergeev S.M. Matematicheskoe modelirovanie kross-uzlov kommercheskikh setei [Mathematical Modeling of Cross-Units of Chain Store]. *Nauchnye issledovaniia i razrabotki v epokhu globalizatsii. Sb. st. Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Proc. of International Sci. and Practical Conf. on Research and Development for the Globalization Era]. Kirov, 2016, pp. 90–92.

10. Sergeev S.M. Teoreticheskii podkhod k upravleniiu obespechennostiu kommercheskoi seti [A Theoretical Approach to the Chain Store Community]. *Ekonomika i menedzhment sistem upravlenia* [Economics and Management of Management Systems], 2015, no. 3.1 (17), pp. 175–183.

11. Sergeev S.M., Sidnenko T.I. Multidistsiplinarnaia konvergentsiia informatsionnoi obrazovatelnoi sredy [A Multidisciplinary Convergence of Information Educational Environment]. *Izvestiia Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Izvestiya of St. Petersburg State Agrarian University], 2015, no. 5, pp. 88–95.

12. Sergeev S.M. Modelirovanie J.I.T. menedzhmenta klastera pishchevoi promyshlennosti [Modeling of J.I.T. Management of Food-Processing Industry Cluster]. *Ekonomika i menedzhment sistem upravleniia* [Economics and Management of Management Systems], 2013, vol. 8, no. 2, pp. 62–68.

13. Krasnov S.V., Sergeev S.M., Mukhanova N.V., Grushkin A.N. Methodical Forming Business Competencies for Private Label. *Reliability, Infocom Technologies and Optimization (Trends and Future Directions). The 6th Int. Conf. ICRITO.* 2017. pp. 569–574.

14. Kirichenko V.V., Sergeev S.M. Matematicheskaia model dvizhenia porozhdennogo sprosa [A Mathematical Model of the Generated Demand Motion]. *Rol innovatsii v transformatsii sovremennoi nauki. Sb. st. Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Proc. of Intern. Sci. and Practical Conf. on the Role of Innovation in Transformations of Modern Science]. Ufa, 2016, pp. 77–79.

15. Krasnov S.V., Krasnova S.A. Povyshenie effektivnosti priniatiia upravlencheskikh reshenii pri ispolzovanii semanticheskoi sostavliaiushchei v informatsionnoi sisteme predpriiatiia [Improving the Efficiency of Decision-Making in the Use of Semantic Component in the Enterprise Information System]. *Problemy ekonomiki i upravleniia v torgovle i promyshlennosti* [Problems of Economics and Management in Trade and Industry], 2013, no. 4, pp. 21–25.

16. Sergeev S.M. Cross-System Way of Looking to Business with Limited Resources. *Selected Papers of the International Scientific School "Paradigma" Winter-2016 (Varna, Bulgaria)*. Compiling Editor Dr. Sc., Prof. O.Ja. Kravets. Yelm, WA, USA, 2016, pp. 95–102.

17. Krasnov S.V., Krasnova S.A. K probleme vybora matematicheskogo metoda prognozirovaniia v marketingovykh informatsionnykh sistemakh [Revisiting the Selection Problem of a Mathematical Method of Forecasting in Marketing Information Systems]. *Ekonomika i menedzhment sistem upravleniia* [Economics and Management of Management Systems], 2016, vol. 20, no. 2, pp. 68–73.