



УДК 658.7.01: 519.876.5

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЦЕПИ ПОСТАВОК В УСЛОВИЯХ КОЛЕБАНИЙ СПРОСА

С.А. Андронов, А.А. Ярцева

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения»

*В статье рассмотрена методика имитационного моделирования влияния колебаний спроса на устойчивость работы цепи поставок, предложены возможные пути повышения эффективности функционирования цепи в условиях колебаний спроса.*

*Ключевые слова: цепь поставок, имитационное моделирование, агентное моделирование, дискретно-событийное моделирование, AnyLogic, «эффект хлыста», интегрированное управление.*

**Для цитирования:**

*Андронов С.А. Ярцева А.А. Моделирование цепи поставок в условиях колебаний спроса // Системный анализ и логистика: журнал.: выпуск №1(19), ISSN 2007-5687. – СПб.: ГУАП., 2019 – с.52-63. РИНЦ.*

## SUPPLY CHAIN SIMULATION IN CONDITIONS OF DEMAND VARIABILITY

S.A. Andronov, A.A. Yartseva

Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

*The article discusses the method of simulation of the influence of fluctuations in demand on the stability of the supply chain, suggested possible ways to improve the performance of the chain in the face of fluctuations in demand.*

*Key words: supply chain, simulation modeling, agent-based modeling, discrete event simulation, AnyLogic, bullwhip effect, integrated management.*

**For citation:**

*Andronov S.A., Yartseva A.A. Supply chain simulation in conditions of demand variability // System analysis and logistics.: №1(19), ISSN 2007-5687. – Russia, Saint-Petersburg.: SUAI., 2019 – p.52-63.*

### 1. Введение

Борьба за конкурентное преимущество на рынке заставляет предприятия координировать свою деятельность при работе в рамках цепей поставок (ЦП). В неоптимизированных (или децентрализованных) ЦП, когда предприятия рассматриваются как изолированные элементы, самостоятельно планирующие свои потребности и покупки, возникают существенные отклонения от желаемых показателей. Поэтому задачи управления ЦП в настоящее время оказываются весьма актуальными.

Разветвленные многоуровневые ЦП являются сложными объектами управления, функционирующими в условиях динамично развивающейся среды и значительной неопределенности. Источниками неопределенности могут служить колебания спроса, ошибочное решение менеджеров, неправильная интерпретация информации, её неточность, ошибки прогнозов, изменения природных условий и прочее. Такие случайные процессы могут приводить к различным негативным последствиям. Поэтому снижение влияния неопределенности служит основным критерием при выборе той или иной системы управления.

В децентрализованных ЦП каждый участник оптимизирует свою результативность и пренебрегает информационным обменом, в такой ЦП возникает, так называемый, «эффект хлыста» (или Bullwhip-эффект), который заключается в усилении амплитуды колебания спроса по мере удаления от реального источника спроса в ЦП [1]. Очевидно, что в присутствии разного рода неопределенностей, а также при наличии внешних возмущений, которым в реальности подвергаются-



ся ЦП, названный эффект будет проявляться в большей степени. В этой связи интерес представляет преодоление негативных последствий «эффекта хлыста» связанных с вышеназванными факторами на основе имитационного моделирования.

## 2. Постановка задачи

Целью исследования в данной работе является рассмотрение противодействия влияния на ЦП неопределенного поведения среды, в частности, колебаний спроса потребителей и исследование последствий введения интегрированной политики управления ЦП. Ниже рассматривается механизм оперативного взаимодействия участников ЦП для снижения негативного влияния «эффекта хлыста» в условиях колебаний спроса. Также для названной цели применен аналог совместного планирования участников ЦП в виде оптимизационного эксперимента.

Основой для исследования любой сложной системы служит ее представление в том или ином удобном для обработки виде. Таким представлением является модель системы. Для разработки модели ЦП решено применить методологию имитационного моделирования, которая позволяет проводить вычислительные эксперименты над математическими моделями.

Одним из основных преимуществ такого способа моделирования является то, что последнее позволяет исследовать ЦП в динамике в тех случаях, когда аналитическое описание процессов недоступно или затруднено, а влиянием случайностей пренебречь нельзя. Вместе с тем, как известно, имитационный подход не лишен недостатков, а именно: найденные решения справедливы лишь при заданных значениях параметров, а возможности получаемых оценок ограничены уже структурно и функционально сформированными моделями ЦП [2]. Следует отметить, однако, что первую из названных трудностей, удастся преодолеть при наличии модуля «анализ чувствительности» в имитационном пакете.

Выделяют три основных подхода к имитационному моделированию: дискретно-событийное, агентное и системно-динамическое. Поскольку ЦП относят к системам, в которых каждый участник характеризуется собственным поведением, то для более углубленной детализации модели реальной системы целесообразно использовать агентный подход. Последнее позволяет сделать выводы о глобальном поведении системы, основываясь на поведении её взаимодействующих компонентов. С другой стороны, для описания процессов, характеризующих поведение отдельных активных агентов, следует использовать дискретно-событийное моделирование. Оно позволяет представить процесс обработки материального потока в каждом звене отдельно и учесть взаимосвязь элементов, образуемую им. Наконец, для учета естественных инерционных процессов, связанных, в частности, с процессами продвижения товара, присутствием в контуре управления ЦП людей, в моделях ЦП могут быть использованы идеи системной динамики [3]. Таким образом, в общем случае, очевидно, что для более полного представления реальности ЦП предпочтительным является многоподходное моделирование. Несмотря на то, что к настоящему времени известно большое количество программных средств имитационного моделирования, отмеченный выше принцип многоподходности поддерживают лишь единицы, среди которых в отечественных разработках лидирует пакет AnyLogic [4]. По этой причине в контексте рассматриваемой задачи используется данное программное обеспечение.

## 3. Разработка модели

В настоящей работе рассмотрена абстрактная линейная 4-х уровневая ЦП, состоящая из таких элементов как поставщик, производитель, дистрибьютор и ритейлер, взаимодействующих посредством материального и информационного потоков. Для имитационной модели в среде Anylogic разработаны соответственно четыре активных класса объектов и сконфигурирована ЦП (рис. 1). Заметим, что на основе названных классов объектный подход позволяет формировать модели разветвленных ЦП любой сложности.

Материальный поток, протекающий в ЦП в прямом направлении, двигается в модели по блокам enter и exit звеньев цепи, а информация о заказах передается в обратном направлении без задержек по каналу connections, который организует связь между агентами.

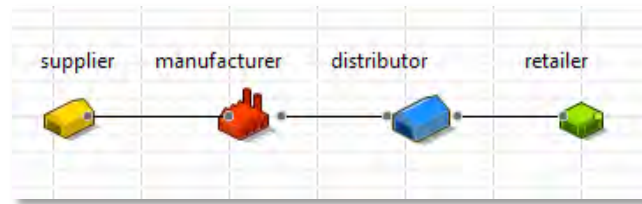


Рис. 1. Конфигурация исходной ЦП

Рассмотрим модель производителя, как одну из самых сложных. Производитель имеет план выпуска изделий, основанный на прогнозе уровня спроса на изготавливаемую продукцию. На производстве имеется две линии, но по текущему уровню спроса на первом этапе применяется только одна. Представляется логичным в рамках логистического подхода рассмотреть процесс управления на данном компоненте в виде трех состояний: обычный объем, увеличенный и без производства.

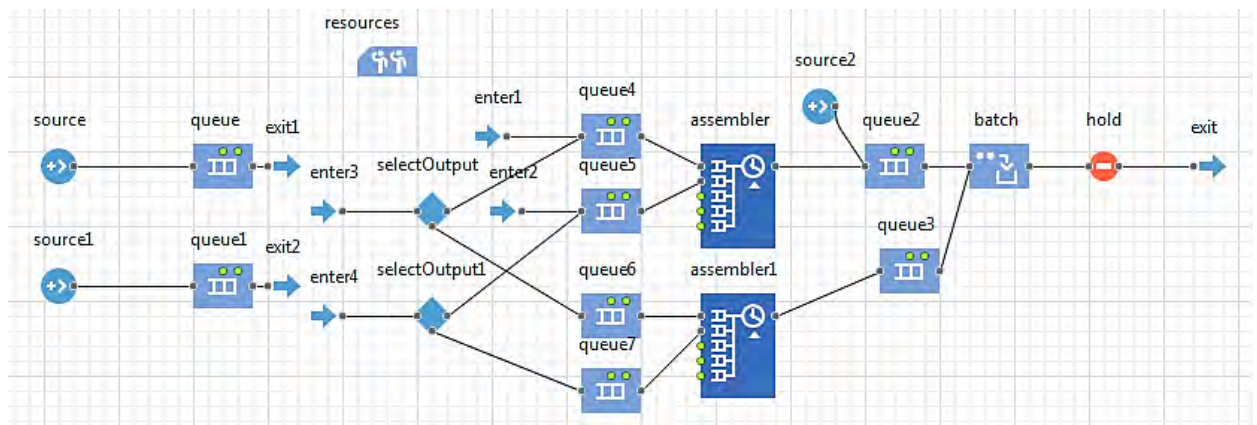


Рис. 2. Дискретно-событийная модель функционирования производителя

Дискретно-событийная модель производителя представлена на рисунке 2 и содержит следующие элементы:

- 1) Source вводит в модель производителя заявки на изготовление, сырье доставляемое поставщиком и начальный уровень запаса продукции.
- 2) Enter и Exit служат для переключения модели с работы одной производственной линии на работу двух одновременно.
- 3) Assembler олицетворяет процесс изготовления готового продукта, новый агент собирается, когда на вход блока поступают по одному объекту из двух очередей (заявка и сырье) и использует для проведения этого процесса один человеческий ресурс. Предполагается, что в среднем на изготовление одной единицы затрачивается 10-15 минут. Время сборки задается как время задержки, в рассматриваемом примере оно задается треугольным распределением:  $\text{triangular}(0.16, 0.25, 0.2)$  и измеряется в часах.
- 4) Queue моделируют работу склада. Изготовленный товар поступает на склад и там ожидает момента отгрузки дистрибьютеру.
- 5) Batch служит для формирования партии, соответствующей размеру заказа дистрибьютера, на выходе из этого блока получаем экземпляр агента Shipment.
- 6) Hold и Exit моделируют процесс доставки, блок остановки открывается только по истечении срока доставки.

Предполагается, что дистрибьютор и ритейлер реализуют минимаксную стратегию управления запасами, а производитель использует стратегию с фиксированным объемом и периодичностью заказа. Модель дистрибьютора походит на модель работы склада и представлена



на рисунке 3. В блок enter поступают отгрузки производителя в виде объектов Shipment. Для извлечения товаров из поставки применяется блок unbatch, полученные на выходе агенты поступают на хранение в блок queue, где ждут отгрузки. Блоки batch, hold и exit, выполняют те же действия, что и в модели производителя, но поставка доставляется розничному продавцу (retailer). Решения для остальных агентов разрабатываются в таком же ключе.

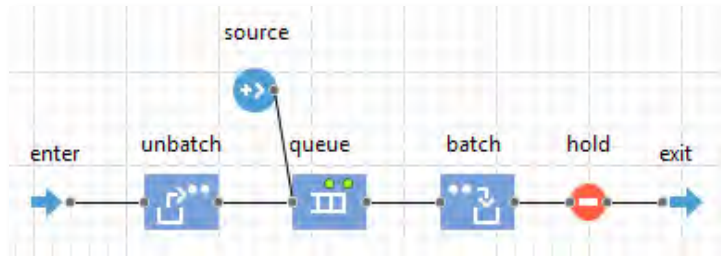


Рис. 3. Дискретно-событийная модель функционирования дистрибьютора

#### 4. Процесс моделирования

Исследование работы цепи проводилось с помощью симуляционного эксперимента Anylogic. На рисунке 4 изображена динамика изменения уровней запасов участников ЦП, полученных в результате проведения симуляции работы модели на протяжении двух месяцев. Функционирование системы в условиях отмеченного выше взаимодействия звеньев ЦП оказалось эффективным, так как объем неудовлетворенного спроса остался равным нулю.

Проведем теперь эксперимент с непредсказуемым изменением потребительского спроса. Рассматривается его скачкообразное повышение, которое может быть вызвано, различными факторами, в частности остановкой продаж товаров заменителей.

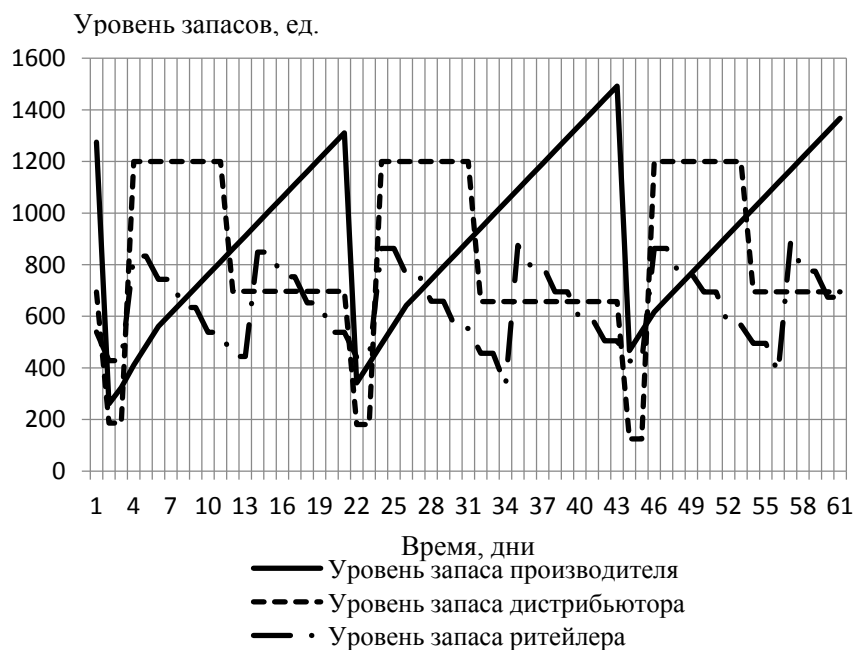


Рис. 4. Результаты эксперимента

Выполнение эксперимента в данных условиях позволяет наблюдать «эффект хлыста» (рис. 5). Можно заметить, что амплитуда уровня спроса дистрибьютора в разы превышает уровни спроса ритейлера и потребителей.



Влияние изменений спроса также наглядно можно проследить на графике, отражающем динамику изменения запасов (рис. 6). Период оформления заказа уменьшился для всех участников, и производитель перестал справляться с объемами заказов. В целом, объем неудовлетворенного спроса составил 560 единиц.

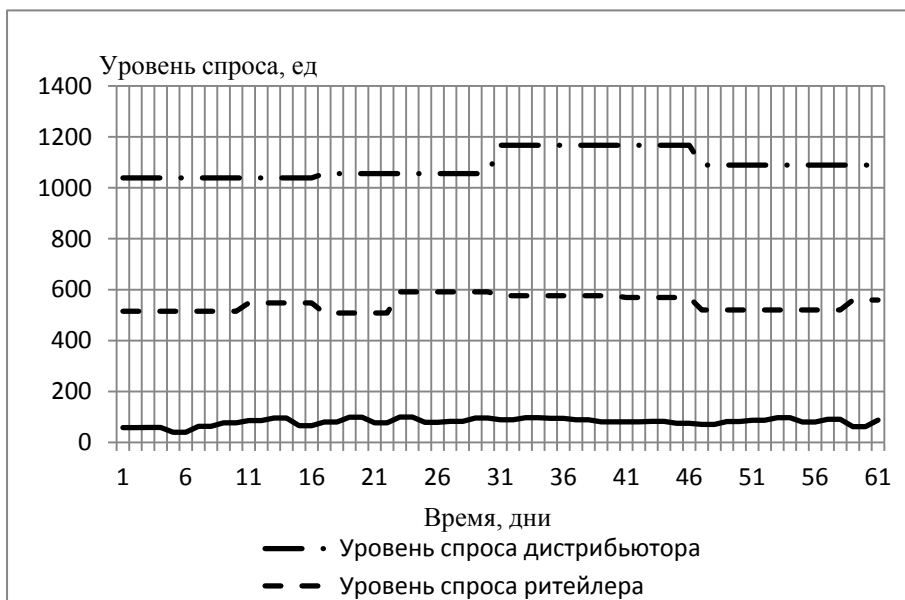


Рис. 5. Результаты моделирования изменения спроса в ЦП

Можно сделать вывод, что для бесперебойного функционирования в условиях повышенного спроса одной производственной линии не достаточно и существующая модель управления ЦП является непригодной. Моделирование влияния изменения спроса на ЦП должно служить основой для дальнейших принятых решений относительно её управления.

Улучшение информационной коммуникации между предприятиями признается одним из наиболее важных факторов влияющих на снижение «эффекта хлыста» в ЦП. При оперативном управлении возникает информационная асимметрия, которая характеризуется запаздыванием ее распространения. Быстрое реагирование – оперативный обмен информацией, который служит рычагом интегрированного управления и способствует снижению изменчивости в ЦП, их скоординированной работе и повышению эффективности управления запасами.

Модифицируем исследуемую модель, изменив схему поведения производителя. Теперь розничный продавец будет сообщать производителю о предельном повышении или понижении спроса. В случае получения такого сообщения, например, о повышении спроса производитель будет добавлять производственную мощность, открывая дополнительную производственную линию.



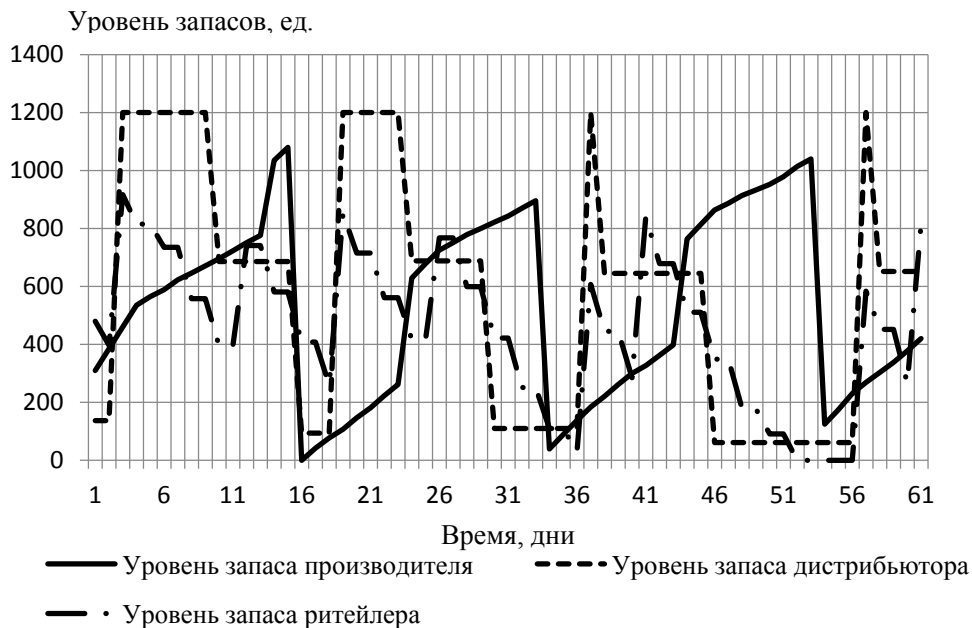


Рис. 6. Влияние изменения спроса на деятельность компонентов ЦП

Благодаря введению такого механизма взаимодействия устойчивость системы повышается. Уровень потерь в цепи снова равен нулю, а уровень производства достаточно стабилен и удовлетворяет спрос (рис. 7).

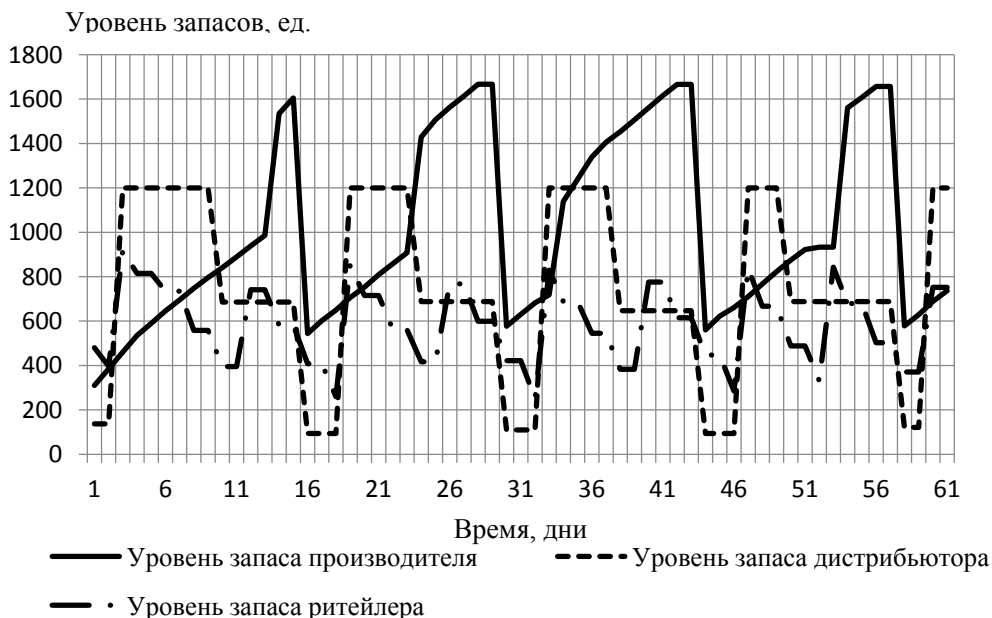


Рис. 7. Результаты применения усовершенствованной концепции управления

Рассмотрим более жизненную ситуацию: реакцию ЦП на линейно возрастающий спрос (рис. 8). В данном случае модели, повышающей информационный обмен, введенной выше, оказывается недостаточно для устойчивой работы ЦП. Объем неудовлетворенного спроса составил 977 единиц. Предлагается изменить схему и использовать оперативную информацию о текущем спросе в П на линейно возрастающий спрос (рис. 8). В данном случае модели, повышающей информационный



обмен, введенной выше, оказывается недостаточно для устойчивой работы ЦП. Объем неудовлетворенного спроса составил 977 единиц. Предлагается изменить схему и использовать оперативную информацию о текущем спросе в формировании плана производства. Для этого применяется простейшая модель прогноза – скользящее среднее за несколько периодов. Этот прием позволит плавно изменять мощность производства в зависимости от изменения спроса.

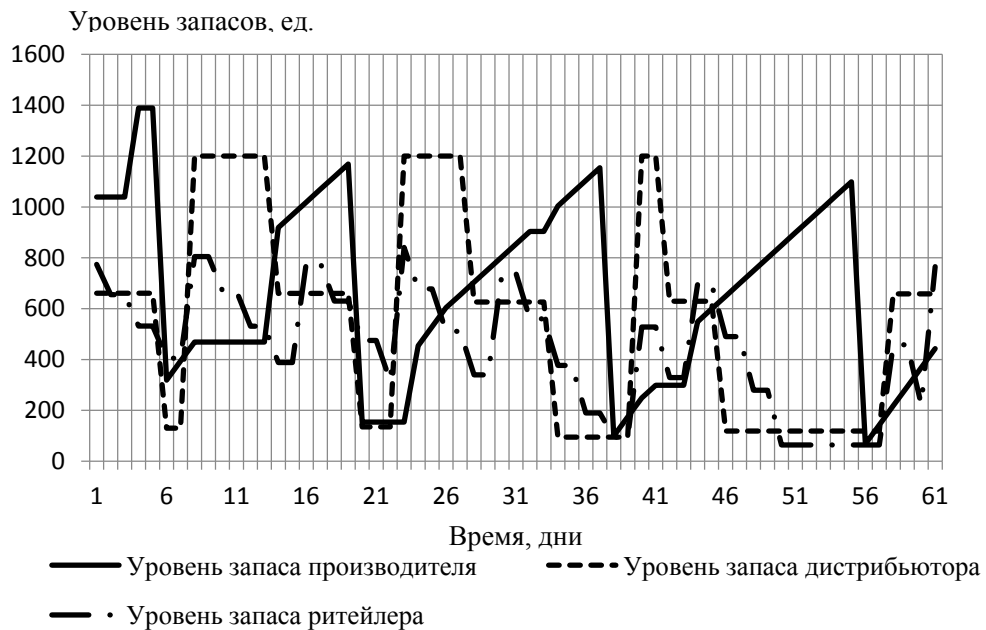


Рис. 8. Влияние линейного повышения спроса на деятельность компонентов ЦП

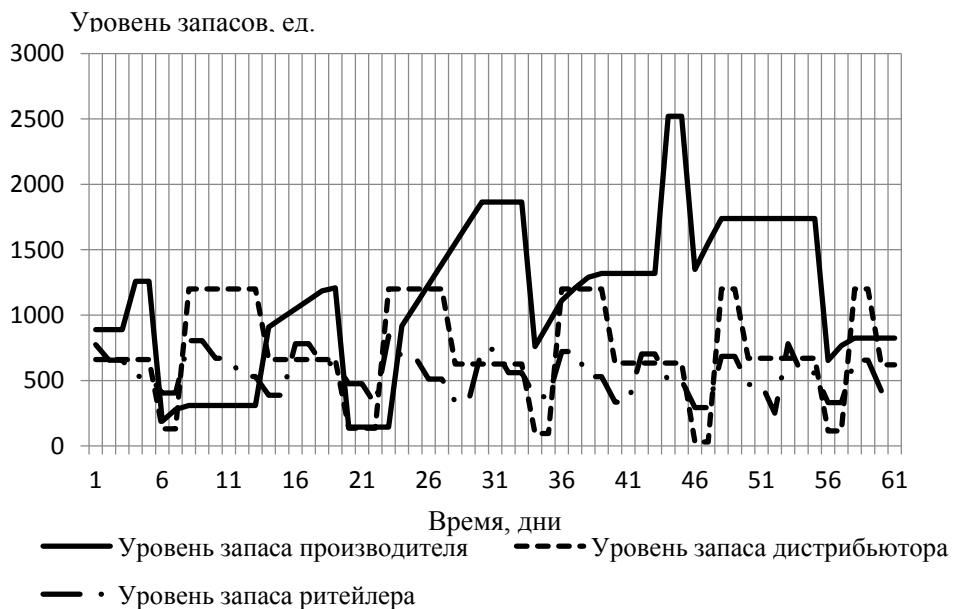


Рис. 9. Результаты применения скользящего среднего при формировании плана производства

Очевидным продолжением рассмотренного случая изменения спроса является линейный спад спроса. Применяемый подход позволяет справиться с данной ситуацией: производитель останавливает работу при достижении страхового запаса, дистрибьютор и ритейлер не формируют заказы без наличия спроса на продукт (рис. 10).

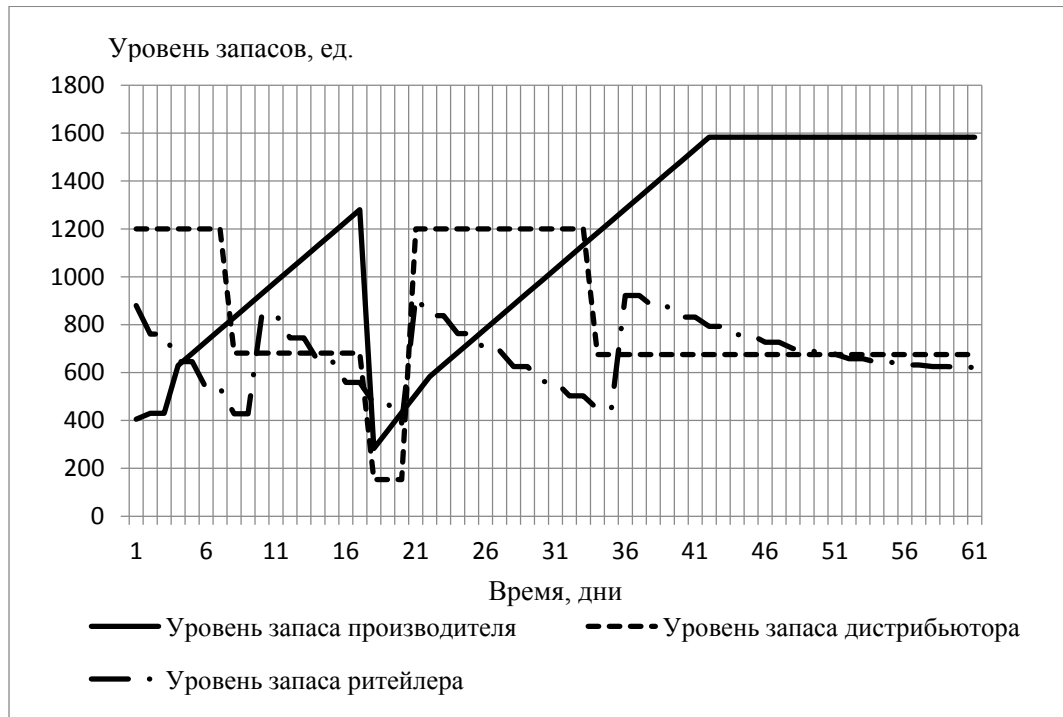


Рис. 10. Влияние линейного понижения спроса на деятельность компонентов ЦП

Повысить устойчивость ЦП к возмущениям, а также для снижения негативных последствий «эффекта хлыста» можно также посредством совместного выбора основных параметров участников (или совместного планирования). Оптимизация параметров имитационной модели позволяет найти наилучший их вариант при максимизации общей прибыли или минимизации суммарных затрат. Последний вариант имеет следующий вид (издержки в каждом звене вычисляются как сумма затрат на хранение товаров, оформление и доставку заказа, и издержек, вызванных дефицитом):

$$T = T_R + T_D + T_M + T_S \rightarrow \min,$$

$$\begin{cases} T_R = O_R + D_R + L_R + In_R, \\ T_D = O_D + D_D + L_D + In_D, \\ T_M = O_M + D_M + L_M + In_M + M, \end{cases}$$

где  $T$  – общие издержки в цепи поставок, обновляются ежедневно;  $T_i$  – общие издержки компонента цепи, обновляются ежедневно;  $i = R, D, M, S$  – ритейлер, дистрибьютор, производитель и поставщик соответственно;  $O_i = P_i \cdot a_i$  – затраты на оформление заказа, определяются как произведение стоимости единицы ( $P$ ) и количества в заказе ( $a$ ), обновляются при отправке заказа;  $D_i$  – затраты на доставку заказа, обновляются при выполнении заказа;  $L_i$  – издержки наличия дефицита. Для дистрибьютора и производителя измеряется в стоимости за день задержки, а для розничного продавца как произведение стоимости дефицита за единицу и объема неудовлетворенного спроса, обновляются по мере возникновения дефицита;  $In_i = I_i \cdot P_i$  – издержки хранения, определяющиеся как произведение объема хранимой продукции и стоимости хранения единицы ( $P_i$ ), обновляются ежедневно;  $M$  – издержки изготовления, обновляются по ходу изготовления.





Проведен оптимизационный эксперимент для модели нашей ЦП с учетом последней модификации. Для каждого компонента цепи настраиваются соответствующие ограничения [Мин.; Макс.] по значениям минимального и максимального объема запасов. Требованием, определяющим допустимость решения является равенство нулю объема неудовлетворенного спроса и задержек выполнения заказов.

Результат оптимизационного эксперимента отображен на рисунке 11. Минимальное значение издержек было получено на 432 шаге прогона модели.

Введение стратегии с оптимальными величинами параметров позволило значительно снизить издержки в ЦП, а именно общие издержки в цепи снизились на 25% (таблица 1). Благодаря снижению размеров заказов приблизительно на 50% для каждого звена можно также наблюдать уменьшение объемов хранимой продукции, к чему стремится любой агент ЦП. Приблизительность уровней запасов дистрибьютора и розничного продавца к спросу конечного потребителя позволила практически свести к нулю «эффект хлыста» в ЦП (рис. 12).

Таким образом, согласованное управление ЦП позволяет добиться оптимального функционирования как в экономическом плане, так и в плане устойчивости к возмущениям.

Результаты моделирования ЦП подтверждают необходимость интегрированного подхода к управлению в ЦП. Несовместность работы компонентов приводит к негативным последствиям в виде потерь и неоптимальности функционирования. Введенная модель быстрого реагирования позволила оптимизировать деятельность ЦП, повысить её устойчивость и минимизировать издержки. Что является неоспоримым доказательством преимуществ согласованного управления элементами ЦП.

	Текущее	Лучшее
Итерация:	500 <small>недопуст.</small>	432
Функционал:	309,502.25	191,074.25
<b>Параметры</b>		
Rate	50	50
MaxD	1,300	700
ReorderD	200	400
MaxR	2,000	600
ReorderR	800	300
SafetyStock	700	300
Копировать лучшее решение в буфер <input type="button" value="copy"/>		

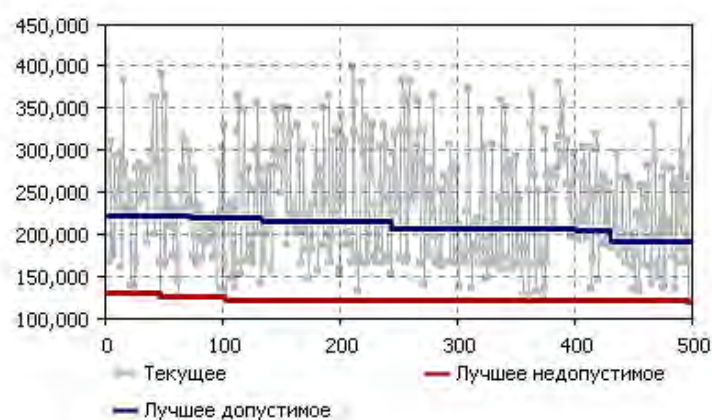


Рис. 11. Результаты оптимизационного эксперимента

Таблица 1 – Количественные оценки моделирования

Издержки	До оптимизации	После оптимизации	% изменения
Издержки ритейлера	98425	68485	30.4
Издержки дистрибьютора	91385	74059	18.9
Издержки производителя	64272	48530	24.4
Общие издержки	254082	191074	24.7

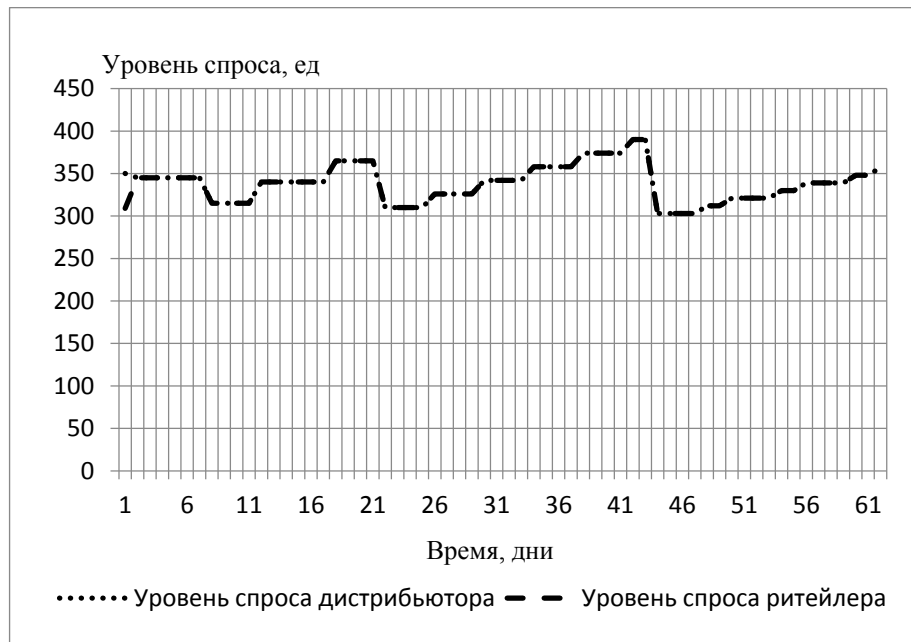


Рис. 12. Уровни спроса в ЦП

## 5. Заключение

Любая ЦП функционирует в условиях неопределенности и должна быть готова к изменениям, происходящим в окружающей среде. Разработка имитационных моделей ЦП, аналогичных рассмотренным, позволит прогнозировать последствия возможных ситуаций и быть готовым к принятию менеджером обоснованных решений, как например, в рассмотренной ситуации с нехваткой производственных мощностей для удовлетворения спроса. Для повышения устойчивости ЦП к колебаниям спроса были рассмотрены три механизма оперативного изменения плана производства и повышения информированности вышестоящего звена в ЦП. Также над модифицированной, таким образом, моделью был выполнен оптимизационный эксперимент, как аналог, совместного планирования участников ЦП, позволивший снизить издержки в ЦП на 25 %, уровни запасов на 50 %. В результате этих мероприятий удалось свести «эффект хлыста» к нулю.

Благодаря комбинированному применению агентного и дискретно-событийного принципов имитационного моделирования такие модели могут быть модифицированы, дополнены и адаптированы для конкретной задачи исследования. Выводы, полученные в данной работе, могут служить отправной точкой для компаний по объединению сил в управлении ЦП, так как они заставляют убедиться в слабых сторонах применения индивидуальных политик управления на компонентах и необходимости взаимодействия между её компонентами, в виде обмена актуальной информацией на концах цепи и синхронизации межорганизационных взаимодействий.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Lee H.L., Padmanabhan V. and Whang S. Information distortion in a supply chain: The bullwhip effect/ H.L. Lee, V. Padmanabhan and S. Whang // Management Science. – 1997. – №4. – P.546-548.*
2. *Иванов Д.А. Управление цепями поставок / Д.А. Иванов. – СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2009. – 660с.*
3. *Форрестер, Дж. Основы кибернетики предприятия (индустриальная динамика) / Дж.Форрестер. - М.: Изд-во «Прогресс», 1971. –340 с.*
4. «AnyLogic» - программа имитационного моделирования. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.anylogic.ru> (Дата обращения: 19.03.2007).



## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Андронов Сергей Александрович –**

кандидат технических наук, доцент

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения»  
190000, Россия, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А

E-mail: andronv\_00@mail.ru

**Ярцева Алиса Алексеевна –**

магистр, студент кафедры системного анализа и логистики

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения»  
190000, Россия, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А

E-mail: alisa.yartseva.97@mail.ru

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Andronov Sergey Aleksandrovich –**

PhD in Technical Sciences

Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

SUAI, 67, Bolshaya Morskaya str., Saint-Petersburg, 190000, Russia

E-mail: andronv\_00@mail.ru

**Yartseva Alisa Alekseevna –**

master, student of the department of system analysis and logistics

Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

SUAI, 67, Bolshaya Morskaya str., Saint-Petersburg, 190000, Russia

E-mail: alisa.yartseva.97@mail.ru