

# ЭНТРОПИЙНЫЙ ПОДХОД К УПРОЩЕНИЮ СТРУКТУРЫ ЦЕПИ ПОСТАВОК ДЛЯ ВЫБОРА АНТИРИСКОВЫХ СТРАТЕГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ<sup>1</sup>

*А.С. Птускин, Е.В. Левнер*

В статье рассматривается проблема упрощения структуры цепи поставок для выбора антирисковых стратегических решений. Для измерения информативности подсистем сложных цепей поставок используется шенноновская энтропия. Предложена процедура, которая позволяет сократить размерность структуры модели цепи поставок без потери информативности данных о сбоях и отказах, их причинах и экономических последствиях.

*Ключевые слова:* управление цепями поставок, риски, энтропия, информативность.

## ВВЕДЕНИЕ

Динамика современного рынка обостряет конкуренцию между предприятиями, но одновременно побуждает их к интеграции, роль которой значительно возрастает, как возрастает и интерес исследователей к интеграционным процессам. Под интеграцией обычно понимается установление таких взаимоотношений между предприятиями, которые обеспечивают долгосрочное сближение их генеральных интересов и целей (см., например: (Клейнер, 2008)). В этой же работе отмечает-

© Птускин А.С., Левнер Е.В., 2012 г.

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке Российского гуманитарного научного фонда и правительства Калужской области (проект № 12-12-40006).

ся, что движение и реализация более половины мирового валового продукта по цепочке добавленной стоимости происходят в структуре интеграционных, а не рыночных связей и что значение интеграционных связей особенно велико в условиях России, где потенциал интеграционной политики предприятий остается недоиспользованным. К преимуществам интеграции относятся: более полное информационное обеспечение предприятий, снижение уровня неопределенности в снабжении и сбыте; ограничение конкуренции; облегчение диффузии технологических новшеств; снижение издержек. Одним из перспективных и уже зарекомендовавших себя направлений интеграционных процессов является создание цепей поставок, благодаря которым, как свидетельствует мировая практика, было получено конкурентоспособное преимущество во многих отраслях промышленности (Егорова и др., 2007; Плещинский и др., 2008; Natour, Gibson, 2011).

В современной экономической литературе существует несколько различных определений терминов «цепь поставок» (Supply Chain – SC) и «управление цепями поставок» (Supply Chain Management – SCM) (Федотов, Кротов, 2011). Мы будем понимать под цепью поставок систему связанных партнерскими отношениями, а также материальными, информационными и финансовыми потоками предприятий (производителей, поставщиков, логистических компаний, дистрибьюторов, и т.д.), которые осуществляют весь производственный цикл превращения сырья, материалов и комплектующих в готовую продукцию и поставляют продукцию конечным потребителям.

В статье (Гиюниперо и др., 2011) дан аналитический обзор тенденций исследований в области управления цепями поставок. Основной предметной категорией в исследованиях является стратегия SCM; в тематику этой категории входит и управление рисками. Как указано в работе (Бауэрсокс и др., 2010), минимизация нежелательных последствий непредвиденных событий, нарушающих нор-

---

мальную работу цепи поставок, представляет собой ключевую цель всей логистической деятельности.

Следуя подходу, предложенному в (Качалов, 2002; Kogan, Tapiero, 2007; Zsidisin et al., 2004), мы определяем риск как меру реальности нежелательного развития хозяйственной деятельности, т.е. негативного отклонения фактически полученного результата от запланированного, или недостижения запланированной цели. Риск существует всякий раз, когда есть вероятность того, что негативное событие может иметь место, и это приведет к экономическим потерям (Zsidisin et al., 2004). В работе (Levner, Proth, 2005) риск экономических потерь в цепи поставок оценивается с учетом двух мер: 1) вероятности отказа или другого негативного события и 2) интенсивности воздействия отказа (негативного события), выраженного через ожидаемую стоимость потерь. С точки зрения управления большая часть подходов к оценке риска заключается в определении вероятности нежелательного события и его воздействия на материальные, финансовые и информационные потоки в цепи поставок (Kogan, Tapiero, 2007). Основные источники рисков и результаты влияния риска на работу цепи поставок исследованы, например, в (Larson, Kulchitsky, 1998; MacKinnon, 2002; Mason-Jones, Towill, 2000; Singh, 1998). Следуя (Cruz, Pinedo, 2008), мы будем разделять риски цепи поставок на технологические, организационные и информационные.

При решении стратегических задач, которым присущ обобщенный взгляд, отсутствие деталей и четких линий (Клейнер, 2008), необходимо уйти от подробностей и рассматривать ядро, основу объектов и процессов. Анализ сбоев абсолютно всех элементов сложной цепи поставок попросту нецелесообразен и нереален; управление цепью поставок предполагает построение эффективного и удовлетворяющего клиента процесса, в котором эффективность всей цепи поставок важнее, чем эффективность любого ее отдельного элемента (Battini, Persona, 2007). Исход-

ной самостоятельной задачей при решении стратегической проблемы минимизации экономических потерь является выбор наиболее информативных компонентов цепи (с точки зрения количества информации о рисках и соответствующих им потерях) и, как следствие, упрощение конфигурации цепи поставок. Этой задаче и посвящена настоящая статья. Ее более детальное описание приводится в подразделе ниже.

Статья имеет следующую структуру. В первом подразделе дается описание проблемы с содержательной точки зрения. Во втором подразделе представлена шенноновская энтропия как мера оценки количества информации о сложных производственных системах и приведены примеры ее использования для измерения информативности таких систем. Далее предложена процедура выбора наиболее информативных компонентов цепи и упрощения модели цепи поставок. В следующем подразделе процедура упрощения структуры цепи поставок иллюстрируется на практическом примере из автомобильной промышленности. И наконец, в заключении представлены основные результаты и направления дальнейших исследований.

## ПРОБЛЕМА ВЫБОРА НАИБОЛЕЕ ИНФОРМАТИВНЫХ КОМПОНЕНТОВ ЦЕПИ

Мы рассматриваем проблему повышения качества работы всей цепи поставок за счет стратегических мероприятий, направленных на снижение рисков. К вариантам таких стратегических мероприятий относятся: технологические и управленческие инновации, проекты технического перевооружения и реконструкции, проекты совершенствования информационных систем, повышения квалификации персонала и т.д. Проблема заключается в минимизации экономических потерь в цепи, вызванных отказами и другими неже-

лательными событиями, путем оптимального формирования портфеля таких стратегических действий и распределения средств между ними с учетом их стоимости и результатов, а также ограничений требуемых ресурсов.

Проблема выбора наиболее информативных компонентов цепи (с точки зрения количества информации о рисках и соответствующих им потерях) и, как следствие, упрощение конфигурации цепи поставок, состоит в следующем. Для определения оптимального набора предотвращающих риск стратегий с учетом стоимости и экономического воздействия каждой стратегии (при заданном ограничении бюджета) мы имеем информацию о сбоях, отказах, недопоставках и других нежелательных событиях в цепи поставок, вызывающих потери, их причинах и экономических последствиях. Однако объемы такой информации в цепи могут быть чрезвычайно велики. Сбор, хранение и анализ всей информации о функционировании цепи становится сложной, а зачастую и практически не поддающейся решению задачей (Jeeva, 2011). Поэтому для ее решения необходимо ограничить количество информации. Экономическая и физическая невозможность (и нецелесообразность) получения и обработки всей возможной исходной информации в цепи поставок и, как следствие, стремление сократить в разумных пределах объем необходимой информации послужили мотивом и отправной точкой для настоящей работы.

В простейшем случае цепь состоит из поставщика и потребителя, в более сложных случаях она может иметь древовидную структуру или вид ориентированного графа (Плещинский и др., 2008), в котором узлы соответствуют компонентам (подсистемам) цепи, а дуги представляют логистические и технологические связи. Как правило, цепи поставок характеризуются многоуровневой иерархической структурой и состоят из ряда подсистем, или узлов, выделенных по определенному признаку, отвечающему конкретным целям и задачам. Выделение подсистем может производиться с различной глубиной и

различной степенью детализации. Для стратегической задачи минимизации рисков и повышения качества работы цепи, относящейся к одной из ключевых проблем в управлении цепью поставок, необходимо разработать процедуру, позволяющую экономно представить структуру цепи, и выделить те ее подсистемы, которые содержат наиболее полную информацию о факторах риска и соответствующих экономических потерях. Поэтому прежде всего мы предлагаем упростить структуру цепи и сократить ее размер. Для этой цели мы предлагаем выбирать наиболее информативные компоненты цепи, сохраняющие наиболее существенную информацию, что позволит минимизировать объем данных и упростить процедуры принятия решений. Таким образом, мы предлагаем уменьшить размерность модели цепи поставок, основываясь на измерении *информативности* ее подсистем. При этом основная проблема состоит в том, чтобы определить адекватную меру информативности, отражающую количество информации о рисках и соответствующих им потерях и выбрать самые значащие и информативные компоненты цепи.

## ЭНТРОПИЙНЫЙ ПОДХОД К ИЗМЕРЕНИЮ ИНФОРМАТИВНОСТИ

Сокращение чрезмерной сложности представления цепей поставок является целью многих исследований. Различные способы измерения информативности узлов в графах и сетях предложены в (Kasneći et al., 2009; Kireyev, 2009). Как указано в работе (Battini, Persona, 2007), один из наиболее перспективных аналитических подходов к измерению сложности цепей поставок и производственных систем основан на измерении *шенноновской энтропии* (Shannon, 1948). Приведем ее определение.

Для группы событий  $E = \{e_1, \dots, e_n\}$  с априорными вероятностями возникновения

событий  $P = \{p_1, \dots, p_n\}$ ,  $p_i \geq 0$ , таких, что  $p_1 + \dots + p_n = 1$ , функция энтропии  $H$  определяется следующим образом:

$$H = - \sum_i p_i \log p_i.$$

Известно, что шенноновская энтропия определяет уровень неопределенности в предсказании результатов в случайном эксперименте (Klir, Yuan, 1995). Основная идея состоит в том, что возникновение событий, у которых очень высокая или очень низкая вероятность возникновения, связано с меньшей неопределенностью, чем возникновение событий, у которых вероятность близка к 0,5. Чем меньше неопределенность, тем меньше требуется дополнительной информации для представления или предсказания таких событий. Уменьшение энтропии свидетельствует об уменьшении неопределенности или, другими словами, об увеличении знаний о системе; соответственно, рост энтропии свидетельствует об уменьшении знаний.

Многие авторы успешно связывают шенноновскую энтропию с измерением информативности сложных производственных систем. Например Карп и Ронен (Karp, Ronen, 1992) применяют шенноновскую энтропию, чтобы показать, что переход к более мелким партиям в производстве может привести к снижению информационных затрат при планировании. Фризел и Вудкок (Frizelle, Woodcock, 1994) делают вывод, что высокая сложность производственной системы, оцениваемая энтропией, препятствует эффективной реализации производственного процесса. Энтропия для оценки уровня сложности систем, в том числе и цепей поставок, и измерения степени неполноты знаний об их состоянии используется в работах (Дулесов, Агеева, 2011; Arteta, Giachetti, 2004; Blecker et al., 2005; Efsthathiou et al., 2002; Isik, 2010; Martinez-Olvera, 2008; Sivadasan et al., 2002; Sundar, Lakshminarayanan, 2008). Продолжая и развивая данное направление исследований, мы используем энтропию как меру количества информации для анализа и упрощения модели цепей поставок.

## ПРОЦЕДУРА ВЫБОРА НАИБОЛЕЕ ИНФОРМАТИВНЫХ КОМПОНЕНТОВ ЦЕПИ

Иерархия цепи поставок может быть представлена многослойной структурой. Используемые далее термины «узел», «уровень» и «слой» цепи поставок поясняются на рис. 1. Самый верхний слой содержит несколько основных узлов цепи, которые далее называются родительскими. Например, в схеме цепи поставок в автомобильной промышленности можно упрощенно считать, что верхний (первый) слой содержит следующие родительские узлы: ПОСТАВЩИКИ, АВТОПРОИЗВОДИТЕЛЬ, ДИЛЕРЫ, ПОКУПАТЕЛИ (рис. 2). Каждый родительский узел может быть детализован. Например, для узла ПОСТАВЩИКИ второй слой раскрывает структуру поставщиков и содержит узлы, соответствующие поставщикам первого уровня. В свою очередь поставщики первого уровня имеют своих собственных поставщиков второго уровня и т.д., поставщики  $k$ -го уровня имеют собственных поставщиков уровня  $(k + 1)$ . На рис. 1 поставщики каждого уровня  $k$  изображены как узлы графа, расположенные горизонтально каждый в своей строке. Каждый слой, например слой  $v$ , состоит из родительского узла и всех поставщиков от уровня 1 до уровня  $v$ . Иными словами, каждый слой  $v$  содержит все узлы слоя  $(v - 1)$  и дополнительно к ним – узлы уровня  $v$ . Последующие слои, более детально отражающие структуру системы, содержат большее число уровней и соответственно узлов и т.д. Последовательно, слой за слоем, как представлено на рис. 1, при этом каждый последующий слой описывает ту же самую цепь поставок, но с большей степенью детализации.

Будем называть структуру цепи поставок  $v$ -усеченной, если она представлена слоем  $v$ , т.е. содержит родительские узлы цепи и дочерние узлы от уровня 1 до уровня  $v$ . Подчеркнем еще раз, что каждый слой – это последовательное приближенное представление

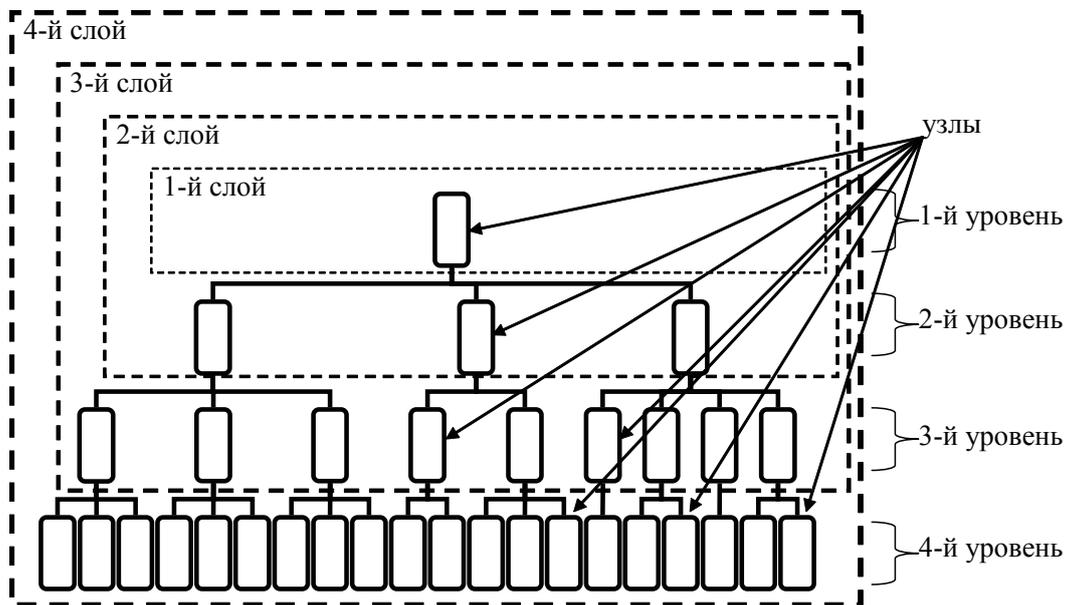


Рис. 1. Узлы, уровни и слои цепи поставок



Рис. 2. Упрощенная схема цепи поставок в автомобильной промышленности

одной и той же цепи поставок, и чем больше значение  $v$ , тем более подробно слой с номером  $v$  представляет структуру исходной цепи.

Для каждого узла в любом слое системы, начиная с верхнего слоя, следует определить его информативность в отношении факторов риска и соответствующих экономических потерь. Если при переходе от модели, содержащей слой  $v$ , к модели с большим значением, т.е.  $(v + 1)$ , мера информативности изменяется незначительно, такая дальнейшая детализация цепи поставок не имеет смысла. Таким образом, мы будем определять самые информативные компоненты цепи, содержащие достаточно полную информацию для формирования оптимального портфеля стратегических действий.

Видовое разнообразие рисков, факторов риска и способов их выражения достаточно велико. Как отмечалось выше, представляется

целесообразным разделять риски цепи поставок (и вызывающие их факторы) на технологические, организационные, информационные и связанные с поставщиками нижеследующего уровня.

Для каждого узла  $v$  цепи мы формируем информационную базу данных. Эти данные записаны в виде таблицы  $D$ , представляющей собой список событий в узле в течение определенного периода времени (например, месяца). Каждая строка таблицы содержит описание ситуации, а именно события, произошедшего в данном узле цепи поставки в течение выбранной единицы времени (например, в течение дня). Строки информируют, привело ли событие к экономической потере или нет. Для этой цели используется столбец  $F + 1$ . Остальные  $F$  столбцов таблицы соответствуют факторам риска, которые могут

являться причиной сбоя в данном узле, где  $f$  – индекс фактора риска,  $F$  – общее число факторов риска.

Мы используем символ  $r$  как индекс номера события и  $R$  – для обозначения общего числа событий в данном узле в течение рассматриваемого периода времени (например, месяца), т.е. общего числа строк в таблице  $D$ . В следующем разделе статьи, содержащем иллюстративный пример процедуры выбора наиболее информативных компонентов цепи и упрощения структуры модели цепи поставок, приведена такая таблица (см. табл. 1).

В ячейках таблицы записываются значения  $x_{rf}$ , равные нулю или единице. Величина

$(x_{rf})$  на пересечении столбца  $f$  и строки  $r$  равна единице, если фактор  $f$ , соответствующий столбцу  $f$ , проявился в событии, описанном строкой  $r$ , и нулю – в противном случае. Последний столбец таблицы (с номером  $F + 1$ ) используется для отображения результата события  $r$ , а именно:  $x_{r,F+1} = 1$ , если в узле произошел сбой, приведший к экономической потере, а  $x_{r,F+1} = 0$  означает, что, несмотря на проявление фактора риска, заметной экономической потери не произошло.

Пусть число событий, которые привели к сбоям и экономическим потерям всей системы, равно  $W$ . Эти события мы будем называть *критическими* (напомним, что это те самые

Таблица 1  
Список событий дочернего узла  $U_3$

Дочерний узел $U_3$	Факторы риска	Технологические				Организа- ционные		Информационные			Поставщики			$F + 1$	
		Авария оборудования	Нарушение технологии	Сбой в энергоснабжении	Авария складских мощностей	Ошибка при планировании заказа	Выбытие ключевых сотрудников	Потеря информации во внутренней сети	Отказ сервера	Сбой программы обработки информации	Отсутствие поставок из дочерних узлов	Низкое качество поставок из дочерних узлов	Недостаток поставок из дочерних узлов		
События	$r$	$f$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	$F + 1$
Брак	1		1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1
Задержка выполнения заказа	2		0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Выполнение заказа не в полном объеме	3		0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1
Отгрузка продукции, не соответствующей заказу	4		0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
Выполнение заказа не в полном объеме	5		0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Задержка выполнения заказа	6		0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1
Невыполнение заказа	7		0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Выполнение заказа не в полном объеме	8		1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

строки  $r$  в таблице  $D$ , у которых в столбце  $F + 1$  стоят значения  $x_{r,F+1} = 1$ .

После того мы построим таблицу  $D$  для всех узлов, входящих в какой-то произвольный слой, например  $v$ . Для всего слоя  $v$  также можно сформировать подобную таблицу, объединив списки рискованных событий, входящих в слой узлов. При этом следует исключить влияние строк для узлов с теми рискованными событиями, которые вызваны их дочерними узлами и уже один раз учтены в данном слое. Если в родительском узле произошло событие, сопровождающееся риском и вызванное сбоем в дочернем узле, то в объединенной таблице в соответствующей строке родительского узла в последнем столбце  $F + 1$  значение 1 меняется на 0, а само рискованное событие учитывается записью 1 в столбце  $F + 1$  соответствующей строки дочернего узла. Если в слой включено  $b_v$  узлов, то общее число строк в таблице  $S_v = b_v R$ .

Для каждого  $f$  ( $f = 1, \dots, F$ ) мы можем вычислить  $N_v(f)$  – общее число тех строк в списке событий  $v$ -усеченной структуры, для которых в столбце  $F + 1$  стоят  $x_{r,F+1} = 1$ . Относительная частота  $p_v(f|1)$  случаев, когда фактор  $f$  стал причиной экономических потерь, понимается нами как оценка вероятности соответствующего события и определяется для всего списка как

$$p_v(f|1) = N_v(f) / N_v,$$

где  $N_v$  – общее число строк со значением 1 в последнем столбце  $F + 1$ ;  $\sum_f p_v(f|1) = 1$ .

Одно из свойств функции энтропии состоит в том, что если система разделяется на несколько подсистем, то общая энтропия определяется как взвешенная сумма энтропий подсистем (Кагр, Ропен, 1992). Это обстоятельство будем отображать через отношение количества критических событий всей системы  $W$  к числу строк  $S_v$  в таблице для слоя  $v$ .

Мера информативности также должна учитывать размер экономических потерь. Обозначим  $L$  объем потерь, вызванных критическими событиями (это потери в цепи слоя 1). Общий объем всех потерь в цепи

может превышать эту величину, но сбой в каком-либо узле может не привести к сбою в следующем по цепи узле и к экономической потере. Это объясняется, например, наличием либо страховых запасов, либо двух параллельных узлов, когда сбой в одном из них компенсируется деятельностью другого. Иными словами, потери на выходе системы в целом меньше потерь внутри системы. Каждый уровень  $v$  цепи поставок вносит свой «вклад»  $L_v$  в общий объем потерь  $L$ ; они суммируются из потерь соответствующих слою уровней (от 1 до  $v$ ). Соответственно при анализе  $v$ -усеченной структуры цепи имеется информация о потерях, доля которых в сумме потерь, вызванных критическими событиями, составляет  $L_v/L$ . Доля потерь нижеследующих слоев  $(1 - L_v/L)$  с ростом  $v$  снижается. Чем больше становится номер слоя  $v$ , тем больше имеется информации о весе просмотренных уровней цепи в общем объеме критических потерь, а неопределенность в отношении «последней структуры» размера экономических потерь уменьшается.

Тогда энтропия  $v$ -усеченной структуры для рассматриваемой цепи поставок («энтропия слоя  $v$ ») определяется как

$$H(v) = -(1 - L_v/L) (W/S_v) \sum_f p_v(f|1) \times \log p_v(f|1). \quad (1)$$

При переходе к следующему слою, т.е. с возрастанием детализации структуры цепи энтропия снижается. Дальнейшая детализация цепи нецелесообразна, когда это снижение становится незначительным при переходе к последующему слою, т.е. когда

$$(H(v-1) - H(v)) / (H(1) - H(v)) \leq \varepsilon, \quad (2)$$

где  $\varepsilon$  – пороговое значение относительного изменения энтропии.

$v$ -усеченную структуру, энтропия которой удовлетворяет условию (1), будем называть  $\varepsilon$ -приближенной. Информация о наиболее значимых факторах риска и соответствующих экономических потерях достаточна для выбора оптимального набора предотвращающих риск стратегий с учетом стоимости и эконо-

мического воздействия каждой стратегии при заданном ограничении бюджета.

*Основной результат.* Так как число критических событий в системе известно (и не зависит от числа слоев), то энтропия  $H(v)$   $v$ -усеченной структуры монотонно уменьшается с ростом  $v$  и асимптотически приближается к нулю при достаточно больших значениях  $v$ .

Этот результат следует из того факта, что величина  $(1 - L_v/L)$  монотонно уменьшается при росте  $v$ ; величина  $(W/S_v)$  также монотонно уменьшается при росте  $v$ ; а значение  $\sum_f p_v(f|1) \log \log p_v(f|1)$  ограничено сверху величиной  $\log F$ . Так как параметры задачи, входящие в формулы (1), (2), известны, легко определить число слоев  $v^*$ , обеспечивающих требуемое приближение исходной цепи поставок с заранее заданным значением  $\varepsilon = \varepsilon_0$ .

## ИЛЛЮСТРАТИВНЫЙ ПРИМЕР

Поясним процедуру построения схемы отбора наиболее значащих и информативных компонентов цепи поставок для упрощения структуры модели цепи и сокращения ее размерности на примере из автомобильной промышленности. Данные соответствуют реальному фрагменту цепи поставок, но изменены из соображений конфиденциальности.

Упрощенную схему цепи поставок в автомобильной промышленности можно представить узлами, показанными на рис. 2 (в схему не включены предприятия, оказывающие логистические услуги). Автопроизводитель (ОЕМ – original equipment manufacturer) осуществляет производство или сборку автомобилей. Поставщики автокомплектующих поставляют сырье, материалы, элементы, компоненты, модули, системы и оказывают услуги автопроизводителю. Поставщиков можно разделить на несколько уровней и слоев. Поставщики первого уровня снабжают автопроизводителя готовыми к монтажу модулями или

компонентами. Поставщики второго уровня производят детали, которые используются поставщиком первого уровня. Поставщики третьего уровня поставляют сырье или оказывают необходимые услуги поставщикам первого и второго уровней. Узел поставщиков первого слоя содержит большое число узлов на следующих слоях. Модули и компоненты поставщиков первого уровня показаны на рис. 3.

Из всего многообразия модулей и компонентов рассмотрим поставку модуля электромеханического усилителя рулевого управления (EPS – electronic power steering).

Дочерние узлы родительского узла  $U_0$  цепи, осуществляющего поставки модуля EPS, представлены по слоям на рис. 4. На выходе узла  $U_0$  однотипная продукция – модуль электромеханического усилителя рулевого управления, производимая дочерними узлами  $U_1$  и  $U_2$ , для которых в свою очередь дочерний узел  $U_3$  поставляет компоненты,  $U_4$  – элементы, а дочерний узел  $U_5$  – стандартные детали и материалы. Узлы  $U_3, U_4, U_5$  получают от своих поставщиков блоки управления, электродвигатели, датчики момента, редукторы, выходные валы, входные валы, элементы крепления, элементы защиты, жгуты, метизы, подшипники, магнитопроводы, хомуты, материалы.

На рис. 5 показаны связи последствий рисков событий, приводящих к сбоям в следующих узлах. Например, задержка выполнения заказа на поставку в узле  $U_3$  (на рис. 5 – событие 2 для узла  $U_3$ ) приводит к выполнению заказа в неполном объеме в узле  $U_2$  (на рис. – событие 4 для узла  $U_2$ ), и, в свою очередь, к выполнению заказа в неполном объеме всего родительского узла  $U_0$  для следующего узла цепи OEM с потерей 20 тыс. долл.

Еще раз отметим, что рисковое событие  $r$  с результатом  $x_{r,F+1} = 1$  для какого-либо дочернего узла может не привести к сбою в следующем по цепи узле и к экономической потере. Как было указано выше, это может быть связано с наличием страховых запасов, дублирующих друг друга узлов, другими мерами организационно-экономического характера.

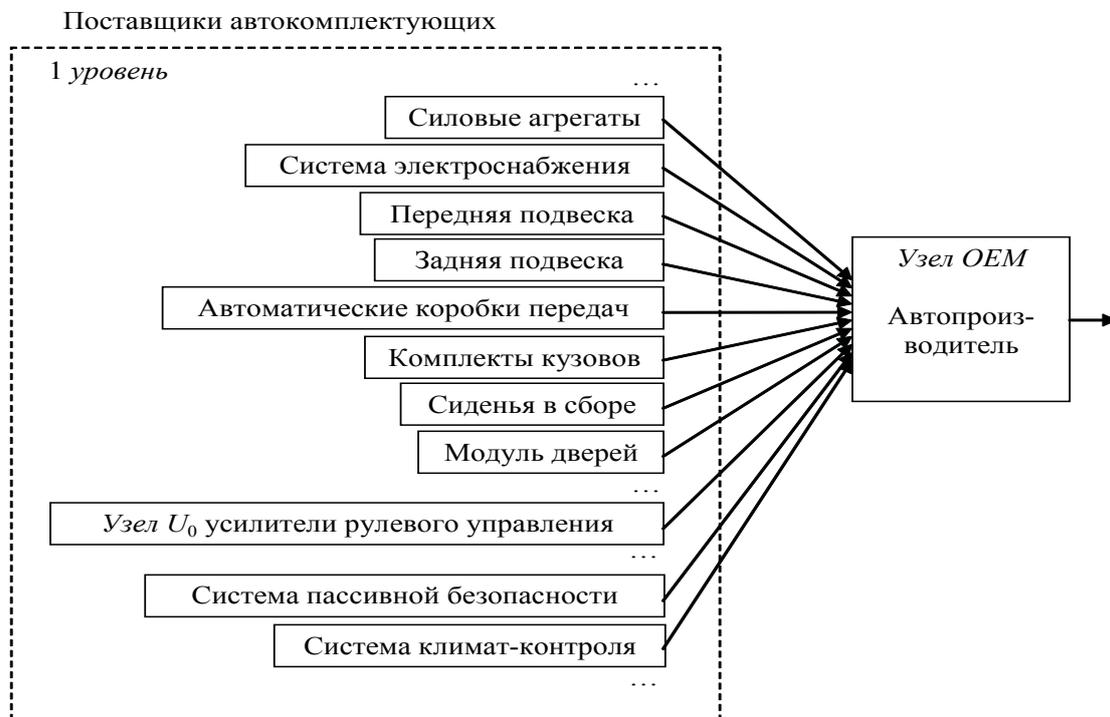


Рис. 3. Модули и компоненты поставщиков автопроизводителя первого уровня

Таблицы со списками рисков событий узлов и слоев чрезмерно объемны, поэтому пример такой таблицы представлен только для дочернего узла  $U_3$  (см. табл. 1). Кроме технологических, организационных и информационных факторов риска выделены факторы, связанные с поставками для данного узла, осуществляемые его дочерними узлами,  $F = 12$ . Для упрощения в табл. 1 не указаны строки, для которых все ячейки имеют значения ноль, то есть в течение данного периода времени не было проявлений факторов риска, и те строки, для которых для которых результат (последний компонент в ряду  $F + 1$ ) равен нулю.

Пусть общее число событий в каждом узле в течение рассматриваемого периода времени  $R = 100$ .

Для родительского узла  $U_0$  на уровне слоя 1 цепь поставок представляется «черным ящиком». Информация о том, какие факто-

ры риска проявились, не известна, известны лишь критические события и соответствующие потери (табл. 2). Число критических событий, приводящих к сбоям и экономическим потерям всей системы,  $W = 18$ . Величина потеря  $L = 710\,000$  долл.

Определим значения энтропии  $v$ -усеченной структуры для слоев цепи. Для слоя 1 для всех  $f, f = 1, \dots, F$  относительная частота  $p_1(f|1) = 1/12$ ;  $S_1 = 100$ ;  $(1 - L_v/L) = 1$ . Энтропия слоя  $v = 1$ :

$$H(1) = -(1 - L_1/L) (W/S_1) \sum_f p_1(f|1) \times \log p_1(f|1) = 0,64529.$$

Сформируем общую таблицу событий для слоя 2 (узлы  $U_1 + U_2$ );  $b_2 = 2$ ;  $S_2 = 200$ ;  $L_v = 260\,000$  долл. Энтропия слоя  $v = 2$ :

$$H(2) = -(1 - L_2/L) (W/S_2) \sum_f p_2(f|1) \times \log p_2(f|1) = 0,14674.$$

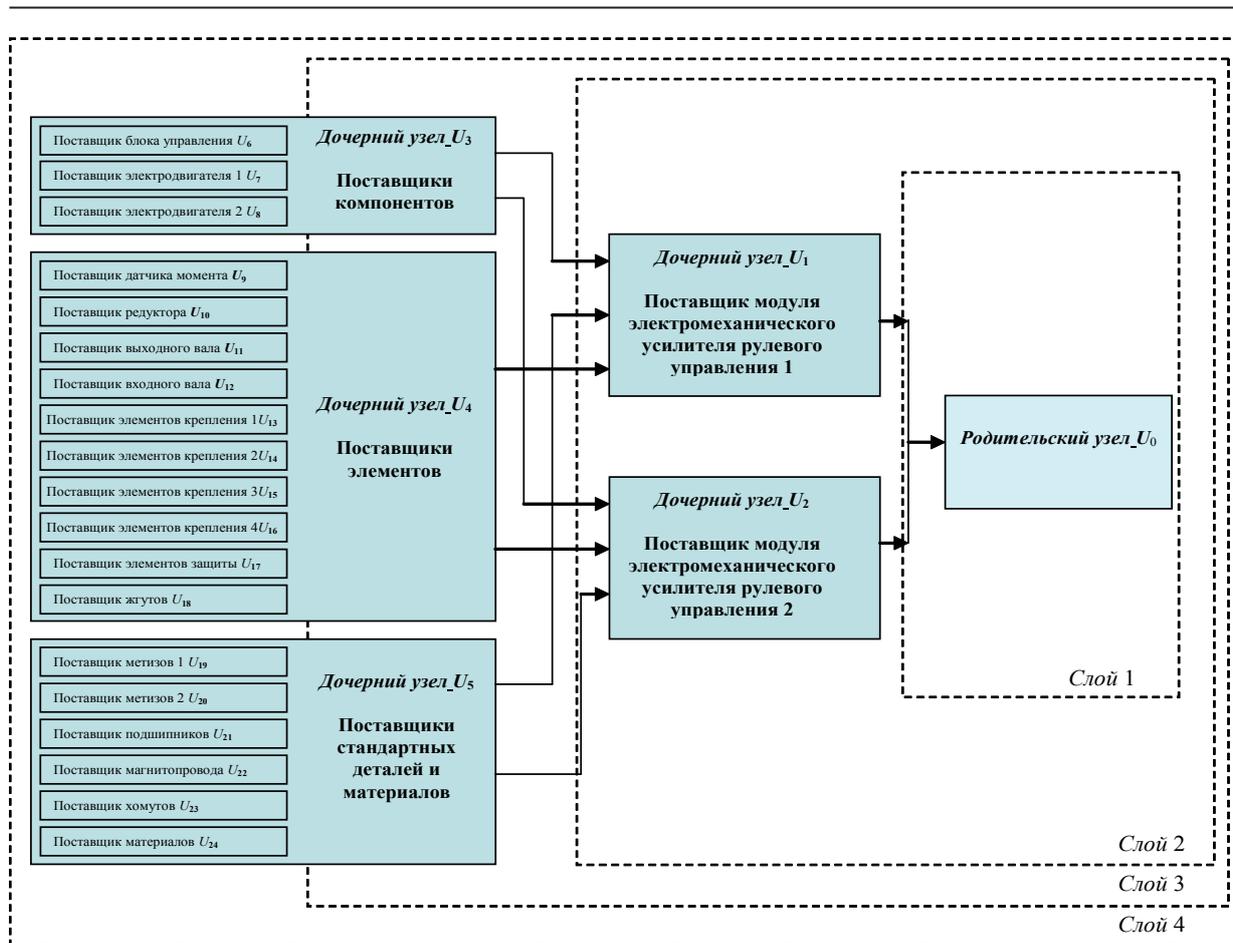


Рис. 4. Схема материальных потоков узла  $U_0$  по слоям: слой 1 ( $U_0$ ), слой 2 ( $U_0 + U_1 + U_2$ ), слой 3 ( $U_0 + U_1 + U_2 + U_3 + U_4 + U_5$ ), слой 4 ( $U_0 + U_1 + U_2 + U_3 + U_4 + U_5 + U_6 + \dots + U_{24}$ )

Общая таблица событий для слоя 3 (узлы  $U_1 + U_2 + U_3 + U_4 + U_5$ ) формируется путем добавления к узлам слоя 2 узлов  $U_3, U_4, U_5$ ;  $b_3 = 5$ ;  $S_3 = 500$ ;  $L_v = 390\,000$  долл. Для узлов 1 и 2 для событий, которые вызваны их дочерними узлами и уже учтены в данном слое, в ячейке, соответствующей столбцу  $F + 1$ , записывается значение 0.

Энтропия слоя  $v = 3$ :

$$H(3) = -(1 - L_3/L) (W/S_3) \sum_f p_3(f|1) \times \log p_3(f|1) = 0,00978.$$

Аналогично определяются  $H(4) = 0,00019$  и  $H(5) \approx 0,0$ .

Энтропия  $v$ -усеченных структур и относительное изменение энтропии  $v$ -усеченных структур представлены на рис. 6 и 7. Как видно, даже при малых значениях  $\epsilon$  детализация глубже, чем для слоя 3, нецелесообразна. Дальнейшая детализация приводит к увеличению затрат на анализ рисков и не дает сколько-либо значимого прироста информации, а узлы слоя 3 являются объектами для

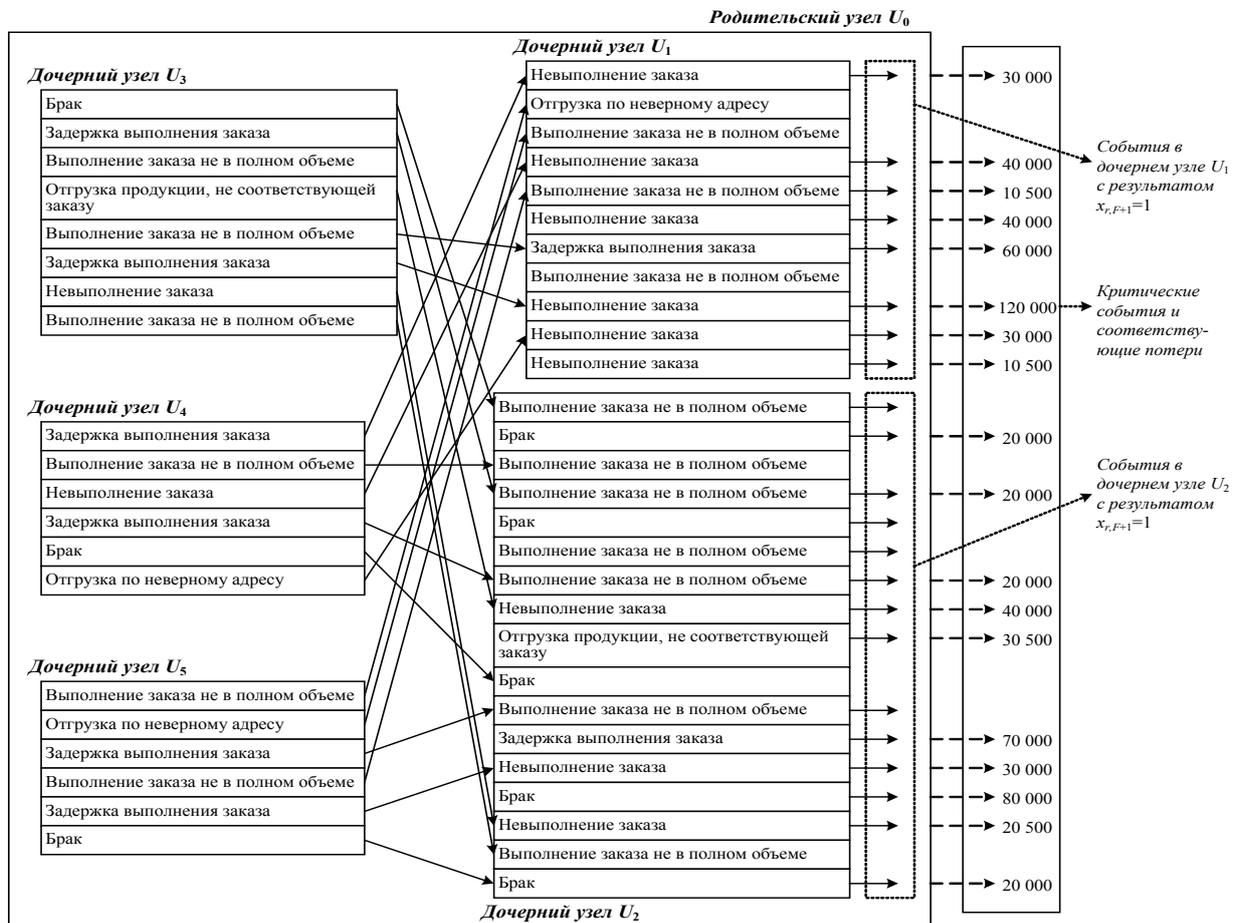


Рис. 5. Схема рискованных событий узла  $U_0$

реализации стратегических антирисковых мероприятий.

Следующий слой 4 содержит уже 24 узла, 5 слой – порядка 100 узлов, 6 слой – порядка 1000 узлов и т.д. Этот пример подтверждает, что объем информации о рискованных событиях с увеличением числа слоев резко возрастает, а его обработка становится чрезмерно громоздкой и затратной при числе слоев больше пяти и в то же время нецелесообразной, так как потери нижних уровней (ниже пятого или шестого) в объеме критических потерь пренебрежимо малы. На данном примере мы видим, что если пользоваться

лишь интуитивными соображениями, очень сложно или даже невозможно заранее определить, до какого слоя целесообразно детализировать структуру цепи. В то же время данный пример демонстрирует эффективность основанной на измерении энтропии процедуры упрощения структуры, позволяющей адекватно установить необходимый уровень детализации.

В результате по данным табл. 3 определена значимость факторов рисков, приводящих к сбоям в цепи. Значимость факторов риска может характеризоваться количественно соответствующей частотой их проявления

Таблица 2  
Список критических событий слоя 1  
(родительского узла  $U_0$ )

Критические события	$r$	$F + 1$	Потери, тыс. долл.
Невыполнение заказа	1	1	30,0
Брак	2	1	20,0
Выполнение заказа не в полном объеме	3	1	20,0
Невыполнение заказа	4	1	40,0
Выполнение заказа не в полном объеме	5	1	10,5
Выполнение заказа не в полном объеме	6	1	20,0
Невыполнение заказа	7	1	40,0
Отгрузка продукции, не соответствующей заказу	8	1	30,5
Невыполнение заказа	9	1	40,0
Задержка выполнения заказа	10	1	60,0
Задержка выполнения заказа	11	1	70,0
Невыполнение заказа	12	1	12,0
Невыполнение заказа	13	1	30,0
Брак	14	1	80,0
Невыполнение заказа	15	1	30,0
Невыполнение заказа	16	1	20,5
Невыполнение заказа	17	1	10,5
Брак	18	1	20,0

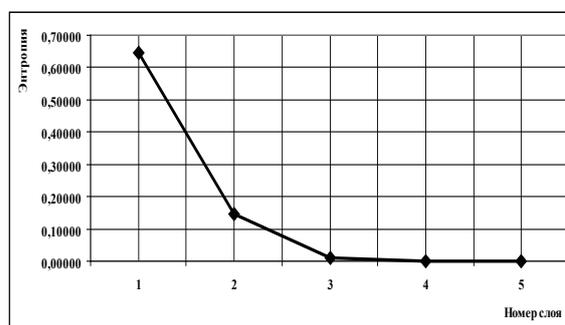


Рис. 6. Энтропия v-усеченных структур

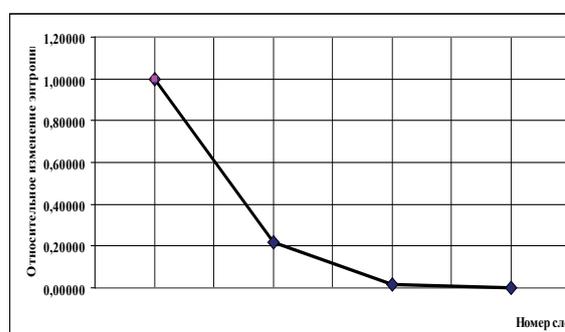


Рис. 7. Относительное изменение энтропии v-усеченных структур

Таблица 3  
Относительная частота  $p_i(f|1)$  случаев, когда фактор  $f$  стал причиной экономических потерь для слоя 3

Факторы риска	Технологические				Организационные		Информационные			Поставщики		
	Авария оборудования	Нарушение технологии	Сбой в энергоснабжении	Авария складских мощностей	Ошибка при планировании заказа	Выбытие ключевых сотрудников	Потеря информации во внутренней сети	Отказ сервера	Сбой программы обработки информации	Отсутствие поставок из дочерних узлов	Низкое качество поставок из дочерних узлов	Недостаток поставок из дочерних узлов
$f$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$N_3$	26											
$N_3(f)$	5	4	3	3	2	1,5	1,5	2	3	0,5	0,5	0
$P_3(f 1)$	0,19	0,15	0,12	0,12	0,08	0,06	0,06	0,08	0,12	0,02	0,02	0,00

$P_3(f|1)$ . В порядке убывания от наиболее к менее значимым эти факторы выстраиваются в последовательности: аварии оборудования – нарушения технологии – сбои в энергоснабжении – аварии складских мощностей – сбои программы обработки информации – ошибки при планировании выполнения заказа – отказы сервера – выбытие ключевых сотрудников – потеря информации во внутренней сети. Кроме того, определена величина потерь в цепи поставок, которые вызвали указанные факторы. Эта информация – основа для выбора антирисковых стратегических решений и распределения стратегического бюджета.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И НАПРАВЛЕНИЕ ДАЛЬНЕЙШИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В рационально организованном процессе принятия стратегических решений менеджеры стремятся избегать излишних подробностей и не используют информацию о внутренних процессах нижних уровней иерархии объекта управления. Необходимо, с одной стороны, обеспечить достаточный объем информации для правильных, т.е. не приводящих к ущербу, решений, а с другой – минимизировать затраты на получение и обработку этой информации.

Предложенная процедура дает эффективный подход к упрощению структуры модели цепи поставок, сокращению ее размерности без потери информативности данных о сбоях и отказах, их причинах и экономических последствиях.

В рассмотренном примере проанализирован только фрагмент цепи поставок, ее размер относительно невелик, но даже в этом случае необходимо обработать значительные объемы информации. В реальных условиях в автомобильной промышленности имеется приблизительно 200 основных поставщиков (первого уровня), которые поставляют при-

мерно 4500 деталей, компонентов и сборочных узлов автосборочному предприятию; второй уровень поставщиков (комплектующие и компоненты для поставщиков первого уровня) состоит из значительно большего числа поставщиков и компонентов и т.д. (Jeeva, 2011). Это подтверждает важное значение проблемы упрощения структуры цепи поставок.

После решения задачи упрощения структуры цепи поставок можно построить релевантную модель выбора оптимального набора предотвращающих риск стратегий с учетом информативности, определенной для каждой подсистемы, а также стоимости и экономического воздействия каждой стратегии предотвращения риска при заданном ограничении бюджета. Стратегии определяются выявленными частотой проявления факторов риска и соответствующими экономическими потерями. Критерием выбора стратегий является минимизация экономических потерь. При этом важно учитывать, что на практике задачи принятия стратегических решений описываются неоднозначными характеристиками, например, в нашем случае это оценки стоимости и экономического воздействия стратегий, объем инвестиционного бюджета. Поэтому необходимо обеспечить адекватное отражение неопределенности, неполноты и неточности параметров модели. Модель может быть представлена как задача математического программирования рюкзачного типа с неточными данными на  $v^*$ -усеченной структуре цепи. Однако эти вопросы выходят за рамки настоящей статьи и являются предметом дальнейшего исследования.

## Литература

- Бауэрсокс Д.Дж., Дейвид Дж., Клосс Д.Дж. Логистика: интегрированная цепь поставок. М.: Олимп-Бизнес, 2010.
- Гионитеро Л., Хукер Р., Джозеф-Метьюз С., Юун Т., Брадвиг С. Десять лет исследований в сфере

- управления цепями поставок: прошлое, настоящее и выводы для будущего // Российский журнал менеджмента. 2011. Т. 9. № 2. С. 59–92.
- Дулесов А.С., Агеева П.А.* Мера информации в задаче оценки бесперебойной работы технической системы // *Фундаментальные исследования*. 2011. № 12 (Ч. 1). С. 102–107.
- Егорова Н.Е., Ерзнкян Б.А., Хачатрян С.З., Акинфеева Е.В.* Сетевой способ организации межфирменной экономической деятельности // *Экономическая наука современной России*. 2007. № 1 (36). С. 68–81.
- Качалов Р.М.* Управление хозяйственным риском. М.: Наука, 2002.
- Клейнер Г.Б.* Стратегия предприятия. М.: Дело, 2008.
- Плецинский А.С., Пачковский Э.М., Михайлина И.М.* Согласованная оптимизация логистической и производственно-хозяйственной деятельности многостадийных предприятий (динамические модели). М.: ЦЭМИ РАН, 2008.
- Федотов Ю.В., Кротов К.В.* Управление цепями поставок: проблемы определения термина и области исследований // *Российский журнал менеджмента*. 2011. Т. 9. № 2. С. 49–58.
- Arteta В.М., Giachetti R.E.* A measure of agility as the complexity of the enterprise system // *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2004. Vol. 20. P. 495–503.
- Battini D., Persona A.* Towards a use of network analysis: quantifying the complexity of Supply Chain Networks // *Intern. J. Electronic Customer Relationship Management*. 2007. Vol. 1. № 1. P. 75–90.
- Blecker T., Kersten W., Meyer Ch.* Development of an Approach for Analyzing Supply Chain Complexity // *Blecker Th., Friedrich G. (ed.) Mass Customization. Concepts – Tools – Realization. Proceedings of the International Mass Customization Meeting. Klagenfurt, Austria, 2005. P. 47–59.*
- Cruz M., Pinedo M.L.* Total quality management and operational risk in the service industries // *Tutorials in Operations Research. INFORMS*, 2008. Ch. 7. P. 154–168.
- Efstathiou J., Calinescu A., Blackburn G.* A Web-Based Expert System to Assess the Complexity of Manufacturing Organizations // *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*. 2002. Vol. 18. P. 305–311.
- Frizelle G., Woodcock E.* Measuring Complexity as an Aid to Developing Operational Strategy // *IJOPM*. 1994. Vol. 15. P. 26–39.
- Isik F.* An Entropy-Based Approach for Measuring Complexity in Supply Chains // *International Journal of Production Research*. 2010. Vol. 48. № 12. January. P. 3681–3696.
- Jeeva A.S.* Reducing Supply Risk Caused by the Stock-Whip Effect in Supply Chains // *Proceedings of the 2011 International Conference on Industrial Engineering and Operations Management. Kuala Lumpur (Malaysia), 2011. January 22–24. P. 739–744.*
- Karp A., Ronen B.* Improving Shop Floor Control: an Entropy Model Approach // *International Journal of Production Research*. 1992. Vol. 30. № 4. P. 923–938.
- Kasneci G., Elbassuoni S., Weikum G.* MING: Mining Informative Entity Relationship Subgraphs // *The 18th ACM Conference on Information and Knowledge Management, CIKM'09, November 2009. Hong Kong. ACM Press, 2009. P. 1653–1656.*
- Kireyev K.* Semantic-Based Estimation of Term Informativeness // *Human Language Technologies: Proceedings of the 2009 Annual Conference of the North American Chapter of the ACL. Boulder (Colorado), 2009. June. P. 530–538.*
- Klir G.J., Yuan B.* Fuzzy Sets and Fuzzy Logic: Theory and Applications. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1995.
- Kogan K., Tapiero C.S.* Supply Chain Games. Operations Management and Risk Valuation. Springer, 2007.
- Larson P., Kulchitsky J.* Single Sourcing and Supplier Certification: Performance and relationship implications // *Industrial Marketing Management*. 1998. № 27 (1). P. 73–81.
- Levner E., Proth J.-M.* Strategic Management of Ecosystems: A Supply Chain Perspective // *In E. Levner, I. Linkov, J.-M. Proth (eds). Strategic Management of Ecosystem. Springer, 2005. P. 95–107.*
- MacKinnon M.* The Security Team: These Online Services Backup B2B Security // *Purchasing B2B*, 2002.

- 
- Martinez-Olvera C.* Entropy as an Assessment Tool of Supply Chain Information Sharing // *European Journal of Operational Research*. 2008. № 185. P. 405–417.
- Mason-Jones R., Towill D.R.* Coping with Uncertainty: Reducing Bullwhip Behavior in Global Supply Chains // *Supply Chain Forum: An International Journal*. 2000. № 1 (1). P. 40–45.
- Natour A., Gibson P.* Managing The Multi-Agent Supply Network: Agents Relationships, Risk, and Collaboration // *Cambridge Business & Economics Conference*. 2011. June 27–28.
- Shannon C.E.* A Mathematical Theory of Communication // *The Bell System Technical Journal*. 1948. № 27 (3). P. 379–423.
- Singh K.* The Impact of Technological Complexity and Inter Firm Cooperation on Business Survival // *Academy of Management Journal*. 1998. № 40 (2). P. 339–369.
- Sivadasan S., Efstathiou J., Frizelle G., Shirazi R., Calinescu A.* An Information-Theoretic Methodology for Measuring the Operational Complexity of Supplier-Customer Systems // *International Journal of Operation and Production Management*. 2002. Vol. 22. № 1. P. 80–102.
- Sundar R.T., Lakshminarayanan S.* Entropy Based Optimization of Decentralized Supply Chain Networks // *Proceedings of the 17<sup>th</sup> World Congress. The International Federation of Automatic Control*. Seoul. Korea. July 6–11, 2008. P. 10588–10593.
- Zsidisin G.A., Ellram L.M. et al.* An Analysis of Supply Risk Assessment and Techniques // *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management*. 2004. № 34 (5). P. 397–413.

*Рукопись поступила в редакцию 11.04.2012 г.*

---

## МОДЕЛЬ ОПТИМИЗАЦИИ ЗАТРАТ НА ПОСТАВКУ ПРОДУКЦИИ ИЗ ГОЛОВНОГО ОФИСА В ФИЛИАЛ

*К.В. Архипов*

Статья посвящена моделированию процессов поставок продукции из головного офиса компании в филиал с применением теории оптимального управления. Рассматривается рынок алкогольной продукции, для которого логистические затраты вносят значительный вклад в стоимость товара на полке. В результате применения модели на базе прогноза спроса на продукцию был составлен оптимальный план поставок в филиал, а также график изменения вместимости склада.

*Ключевые слова:* логистика, цепи поставок, оптимизация логистических процессов.

## ВВЕДЕНИЕ

Во время кризиса особенно остро для большинства торговых компаний стоит вопрос сокращения издержек, что позволит избежать банкротства и приобрести конкурентные преимущества на рынке. Для торговой компании от 25 до 40% стоимости товара на полке для конечного потребителя приходится именно на логистические затраты (Басова, 2004). В этой связи большое внимание следует уделять грамотной организации работы всей логистической цепочки.

В последние 10 лет логистика в России получила активное развитие как новое прикладное направление научной деятельности. Число публикаций, посвященных вопросам логистики, значительно увеличилось. В них,

---

© Архипов К.В., 2012 г.