
МАТЕМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ
ЭКОНОМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

О ВЫБОРЕ НАПРАВЛЕНИЙ МОДЕРНИЗАЦИИ ПРЕДПРИЯТИЙ
НА ОСНОВЕ ИНФОРМАЦИОННО-ЭНТРОПИЙНОЙ МОДЕЛИ
ХОЗЯЙСТВЕННОГО РИСКА*

© 2014 г. Е.В. Левнер, А.С. Птускин¹

(Москва)

Рассматривается проблема формирования портфеля мероприятий, направленных на модернизацию предприятия с целью минимизации хозяйственных рисков. Показано, как, используя энтропийный подход, извлечь достаточный объем полезной информации из протоколов риска, генерируемых в различных подразделениях предприятия. Приведена экономико-математическая модель выбора проектов модернизации в виде задачи целочисленного программирования “рюкзачного” типа.

Ключевые слова: модернизация, риск, энтропия, граф предприятия, выбор проектов модернизации.

Классификация JEL: D81.

ВВЕДЕНИЕ

Управление рисками на предприятиях представляет собой одну из наиболее важных функций предприятия и в этом качестве является одним из предметов изучения в теории системного управления предприятиями. Эта теория должна предоставлять средства для описания производственных процессов, подверженных рискам, выделять наиболее важные факторы управления рисками и объяснять с их помощью последствия управления. В данной работе мы придерживаемся системного видения проблем управления предприятиями, разработанного и представленного в работах Г.Б. Клейнера (Клейнер, 2003; Клейнер, 2008). В рамках такого системного описания предприятие воспринимается как многокомпонентная и многоуровневая иерархическая (многосвязная) система, включающая имущественный комплекс, технологический комплекс, социальную подсистему (трудовой коллектив, администрацию, менеджмент, отдельных работников и т.д.), информационное обеспечение и культурную среду. Более подробно состав и функции системной структуры предприятия представлены в указанных выше работах.

Под *модернизацией предприятия* будем понимать его преобразование, ориентированное на обновление, т.е. придание предприятию более современных свойств или качеств. Для определенности мы будем рассматривать только вопросы *технологической модернизации* как части комплексной *системной модернизации*.

Одной из основных побудительных причин модернизации предприятия являются проблемы в его деятельности. Информацию об этих проблемах позволяет получить “*регистрация данных обо всех происшедших негативных событиях в хозяйственной деятельности предприятия, приведших к потерям, о фактических потерях и убытках, затратах на компенсацию потерь, созданных резервах и т.п., а также статистическая обработка и анализ зафиксированных данных*” (Качалов, 2002). Совокупность всех этих данных представляет собой информационную

* Работа выполнена при финансовой поддержке Российского гуманитарного научного фонда и Правительства Калужской области (проект 12-12-40006а(р)).

¹ Авторы благодарят Г.Б. Клейнера, Р.М. Качалова и участников секции “Отраслевые рынки, корпоративное управление и экономика фирмы” Второго российского экономического конгресса (18–22 февраля 2013 г., Суздаль) за конструктивное обсуждение основных идей данной статьи; а также анонимного рецензента, чьи критика и предложения позволили существенно улучшить представленный в статье материал.

базу данных о рискованных событиях, которая в указанной работе определяется как *протоколы риска*.

Понятие *риска* в широком смысле общеизвестно и давно используется в естественных и социально-экономических науках. Однако наблюдается значительное разнообразие в определениях этого понятия (см., например, (Hertz, Thomas, 1983; Качалов, 2002; Найт 2003; Виленский, Лившиц, Смоляк, 2008)). В настоящей работе мы, как и многие другие авторы, придерживаемся мнения, что *риск* – мера нежелательного развития процесса или явления в условиях неопределенности. При этом количественное определение риска должно учитывать возможность (вероятность) наступления неблагоприятных событий, а также оценку их последствий. В этом смысле, *риск* – мера нежелательного, негативного отклонения фактически полученного результата от желаемого. В таком контексте естественно говорить о таких производных понятиях, как “измерение уровня риска” или “анализ аддитивности риска”. Наряду с такой трактовкой нередко *риском* также называют и само предполагаемое событие, способное принести кому-либо ущерб, убыток или какой-либо другой неблагоприятный эффект. В этом контексте можно говорить, например, о “факторах риска”, “разнообразии рисков” или “управлении рисками”. В данной статье мы будем использовать термин *риск* в обоих значениях, акцентируя внимание на *хозяйственном риске*.

Категория “*хозяйственный риск*” неразрывно связана с принятием хозяйственных решений в деятельности предприятия. Реализация принятых решений подвержена действию объективно существующей и принципиально неустранимой неопределенности. Проявление неопределенности может вызвать нежелательное развитие событий, в результате чего выбранная или ожидаемая цель, ради которой принимались хозяйственные решения, не будет достигнута или будет достигнута неполностью. *Хозяйственный риск* – понятие, отражающее меру нежелательного развития хозяйственной деятельности предприятия при принятии решений, т.е. возможность негативного отклонения фактически полученного результата от желаемого, а также оценку экономических последствий этого отклонения (Качалов, 2002).

Следуя (Качалов, 2002, 2012), мы разделяем факторы риска на предвидимые и непредвидимые и направляем внимание на идентификацию *предвидимых факторов*, параметры проявления которых можно оценить с помощью протоколов риска. Чем больше мы наблюдаем проявлений факторов риска, тем больше экономических потерь несет предприятие, и, следовательно, тем актуальнее его модернизация. Мы рассматриваем проблему с позиции самого предприятия, а не его стейкхолдеров (заинтересованных в нем сторон), отвлекаясь от того, каким именно образом возникают и формализуются требования к его желаемым результатам.

Производственные предприятия, как правило, имеют многоуровневую иерархическую структуру и состоят из ряда подсистем или компонентов. Выделение подсистем может производиться с различной степенью детализации. Модернизация предприятия может быть реализована путем проведения различных мероприятий. Проблема заключается в формировании портфеля таких мероприятий с учетом их стоимости и результатов, а также ограничений требуемых для нее ресурсов. Решения о модернизации относятся к сфере стратегических задач, которым присущ общенный взгляд, отсутствие излишних деталей (Клейнер, 2008). Для принятия таких решений необходимо уйти от подробностей и рассматривать ядро, основу объектов и процессов. Анализ рисков всех или большинства компонентов предприятия попросту нецелесообразен и нереален. Поэтому на первом шаге формирования портфеля проектов модернизации необходимо выбрать такие компоненты структуры предприятия, которые наиболее важны с точки зрения количества информации о рисках и соответствующих им потерях, и только на следующем шаге можно переходить к выбору портфеля проектов модернизации.

Информационно-энтропийный подход к управлению рисками на предприятиях представляет собой количественный метод оценки, анализа и обработки информации, основанный на измерении *информационной энтропии*. Энтропия – мера беспорядка/упорядоченности системы, состоящей из многих элементов. В частности, энтропия в информатике – степень неполноты, неопределенности знаний. Уменьшение энтропии системы свидетельствует об уменьшении неопределенности, или, другими словами, – увеличении знаний о системе. Для оценки уровня сложности производственных систем и измерения степени неполноты знаний об их состоянии

энтропию исследуют во многих работах, и приложения результатов таких исследований весьма разнообразны. Приведем несколько примеров наиболее характерных работ на интересующую нас тему.

В (Вентцель, 1999; Леус, 2003) приводятся определения *информационных энтропий* различного рода и математический анализ их основных свойств. В (Прангишвили, 2003) весьма подробно и основательно рассматриваются модели энтропии сложных систем и их различные приложения для управления производственными, социальными и бизнес-процессами. В работе (Виссен, Попков, Попков, Попков, 2006) приводятся определения “энтропии” и “производства энтропии” (т.е. ее первой производной), которые методично используются для построения экономико-математической модели движения населения на рынке труда. В работе (Громов, Ставенко, 2011) авторы приводят определения таких понятий, как *знания, качество, риск и энтропия* и предлагают подход к мониторингу бизнес-процессов на основе характеристик энтропии информационного пространства. В работе (Дулесов, Хрусталева, 2012) рассматриваются возможности применения энтропии для оценки и сравнения прогнозных и фактических показателей предприятия. В (Птускин, Левнер, 2012а, 2012б) используется энтропийный подход для упрощения модели цепей поставок и выбора антирисковых стратегий.

В (Karp, Ronen, 1992) применяется Шенноновская энтропия, чтобы показать, что переход к более мелким партиям в производстве может привести к снижению информационных затрат при планировании. В (Frizelle, Woodcock, 1994) делается вывод, что высокая сложность производственной системы, оцениваемая высокой энтропией, препятствует эффективной реализации производственного процесса. Ряд авторов (Bar-Yam, 2004; Martinez-Olvera, 2008; Isik, 2010; Allesina, Azzi et al., 2010; Herbon et al., 2012) используют различные меры, основанные на энтропии, для оценки и анализа сложности цепей поставок. В настоящей работе мы продолжаем и развиваем энтропийный подход в иной проблемной области, а именно: мы впервые используем количественную оценку информационной энтропии применительно к анализу и моделированию *производственных рисков на предприятии*.

В (Клейнер, 2003) был представлен опыт разработки основных положений системной теории предприятия, отвечающей принципам целостности, комплексности и системности описания (это так называемая *системно-интеграционная теория предприятия*). В продолжение и развитие указанной работы в данной статье мы делаем следующий шаг в попытке описания, количественного моделирования и анализа хозяйственных рисков в свете системной теории предприятия, а именно: мы выдвигаем на передний план *динамический аспект* в модели анализа риска на предприятии и для этой цели включаем понятие *события* в нашу модель объективной реальности. Поток событий, происходящих реально в течение заданного временного горизонта (рассматриваемого периода времени) в разных частях производственной системы и приводящих к нежелательным последствиям, систематически регистрируется вместе с факторами, вызывающими такие события. В ходе данного исследования мы показываем роль регистрации рискованных событий и предлагаем один из возможных вариантов оценки и анализа хозяйственных рисков на основе информационно-энтропийного подхода к оценке информативности компонентов предприятия.

Совсем необязательно (и вряд ли возможно), чтобы теория объясняла все аспекты деятельности предприятия, но речь должна идти именно о функционировании всего *предприятия как целого*, а не какой-либо одной его подсистемы. Элементы многоуровневой иерархической структуры производственных предприятий могут быть представлены с различной степенью детализации. Мы не претендуем на создание конкретной модели для решения всех задач управления риском на конкретном предприятии. В данной работе нас интересуют только *риски в технологической сфере предприятия* (читатель может найти необходимые определения и детали в (Клейнер, Тамбовцев, Качалов, 1997; Качалов, 2002)). Мы не описываем детально технологические процессы на предприятиях, так как по существу это представляет собой самостоятельную тему, связанную с изучением различных вариантов внутренней структуры предприятия.

Цель настоящей работы – количественно оценить риски путем вычисления соответствующих вероятностей, а затем – с их помощью – оценить объем нашего знания о причинах рисков на предприятии и местах их возникновения. Используя энтропийный подход, мы постараемся

извлечь достаточный объем полезной информации из протоколов риска, генерируемых в различных подразделениях предприятия. В результате мы получим упрощенную теоретико-графовую модель предприятия, которая содержит практически ту же самую информацию (энтропию), что и полная модель, но имеет значительно меньшую размерность. Очевидное преимущество такого подхода в том, что проблема оптимального выбора проектов модернизации может решаться на упрощенном графе предприятия, т.е. имеет существенно меньшую размерность. Анализ этой задачи приведен в заключительной части настоящей статьи.

Исходя из сформулированной цели, мы разобьем нашу работу на три части: сначала мы определим, что это такое – *риски на предприятии* и как их измерять с помощью протоколов риска; затем, используя энтропийный подход, мы получим упрощенную теоретико-графовую модель предприятия, которая содержит практически ту же самую информацию (энтропию), что и полная модель, но имеет значительно меньшую размерность; и, наконец, сформулируем экономико-математическую модель для отыскания оптимального выбора проектов модернизации на упрощенном графе.

ИЕРАРХИЯ ПРЕДПРИЯТИЯ. ГРАФ ПРЕДПРИЯТИЯ

Иерархическая организация предприятия – структура, в которой само предприятие в целом и его основные подсистемы (элементы) подразделяются на подмножества разных уровней, причем каждый нижестоящий уровень контролируется вышестоящим и подчиняется ему.

Рассмотрим ориентированный граф без циклов (“древовидный граф”), представляющий производственную структуру предприятия, который строится следующим образом. Узлы самого верхнего уровня иерархии будем называть *узлами уровня 1*. Обычно имеется только один узел на уровне 1, называемый *корневым*; он отображает предприятие в целом, до того как мы разбиваем его на отдельные подсистемы. Каждое предприятие состоит из множества подсистем (это могут быть, например, основное и вспомогательное производство, службы, функциональные отделы), они отображаются на графе узлами следующего уровня, исходящими из корневого узла. Далее каждая такая подсистема разбивается на цеха и отделы; цеха – на рабочие участки, отделения и т.д.; отделы на группы, бюро, сектора, лаборатории и т.д. Последний уровень графа детализирует структуру предприятия вплоть до отдельных рабочих мест (рис. 1).

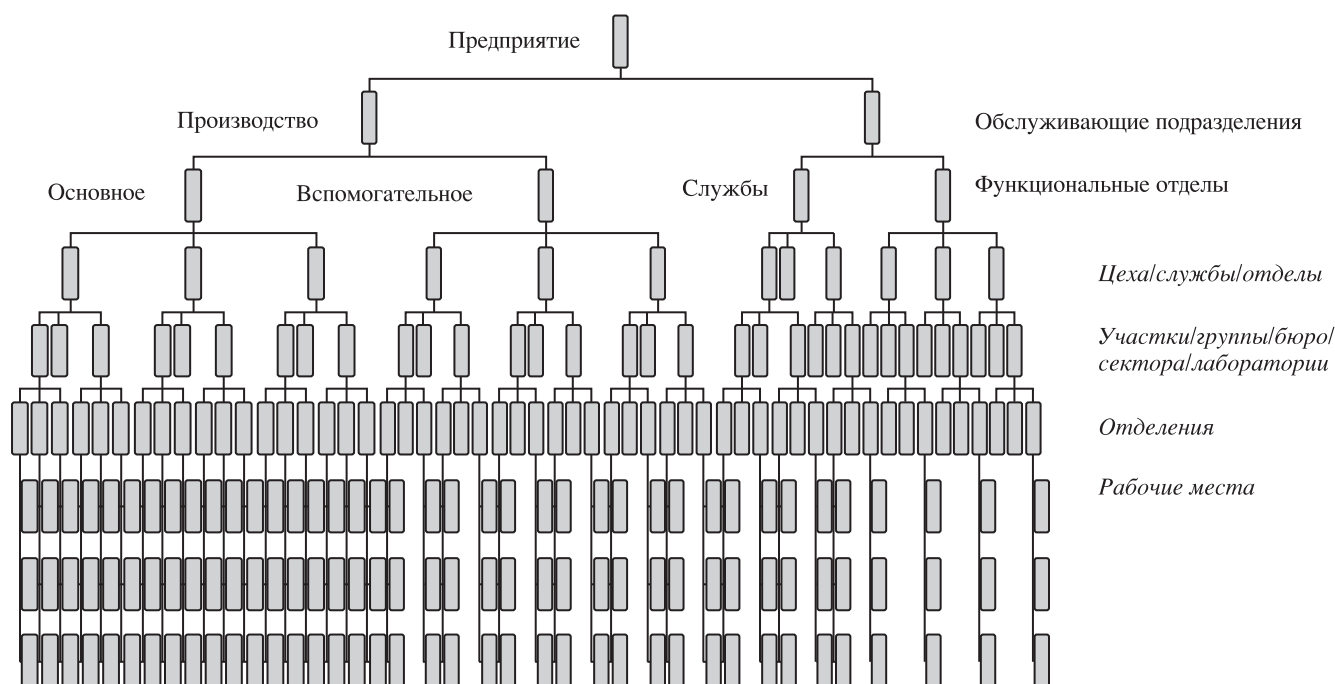


Рис. 1. Граф условного предприятия

Итак, каждый узел на уровне i ($i = 1, 2, \dots$) разбивается на несколько дочерних узлов, принадлежащих следующему уровню ($i+1$), и так (по индукции) строится *граф предприятия*. Дуги в этом графе ведут от каждого узла к его дочерним узлам следующего уровня и графически отображают тот факт, что имеется производственная связь между “узлом-родителем” и “дочерним” узлом. Легко видеть, что граф предприятия уровень за уровнем (рис. 1) отображает его подсистемы. Итак, *уровень* представляет собой множество узлов, находящихся на одинаковом расстоянии от корневого узла.

Наряду с понятием уровня мы вводим понятие *среза* в графе. Мы назовем *срезом* с номером i совокупность всех узлов графа от уровня 1 до уровня i , где параметр i принимает значения $1, 2, \dots$. Каждый срез с номером i содержит все узлы среза с номером $(i-1)$ и, дополнительно к ним, узлы уровня i . В содержательных терминах каждый последующий срез описывает то же самое предприятие, но с большей степенью детализации (рис. 2).

Предлагаемая модель графов предприятия будет использована ниже для количественной оценки рисков. Для каждого узла в любом срезе системы мы сможем определить его информативность в отношении факторов риска и соответствующих экономических потерь, требующих модернизации предприятия.

Очевидно, что на практике размер графа крупного предприятия может быть очень велик – насчитывать сотни и даже тысячи узлов. Учет рисков и выбор мероприятий по их устранению в каждом отдельном узле практически нереален, да и вряд ли такая детализация необходима для практических расчетов. Основная идея предлагаемого нами информационного подхода состоит в следующем: если при переходе от модели графов, содержащей некоторый срез, например срез с номером s , к модели с большим значением среза, т.е. $s + 1$, количество информации о рисках на предприятии изменяется незначительно (смысл понятия “*количество информации о рисках*” будет нами определен ниже), то дальнейшая детализация предприятия не имеет смысла и доста-

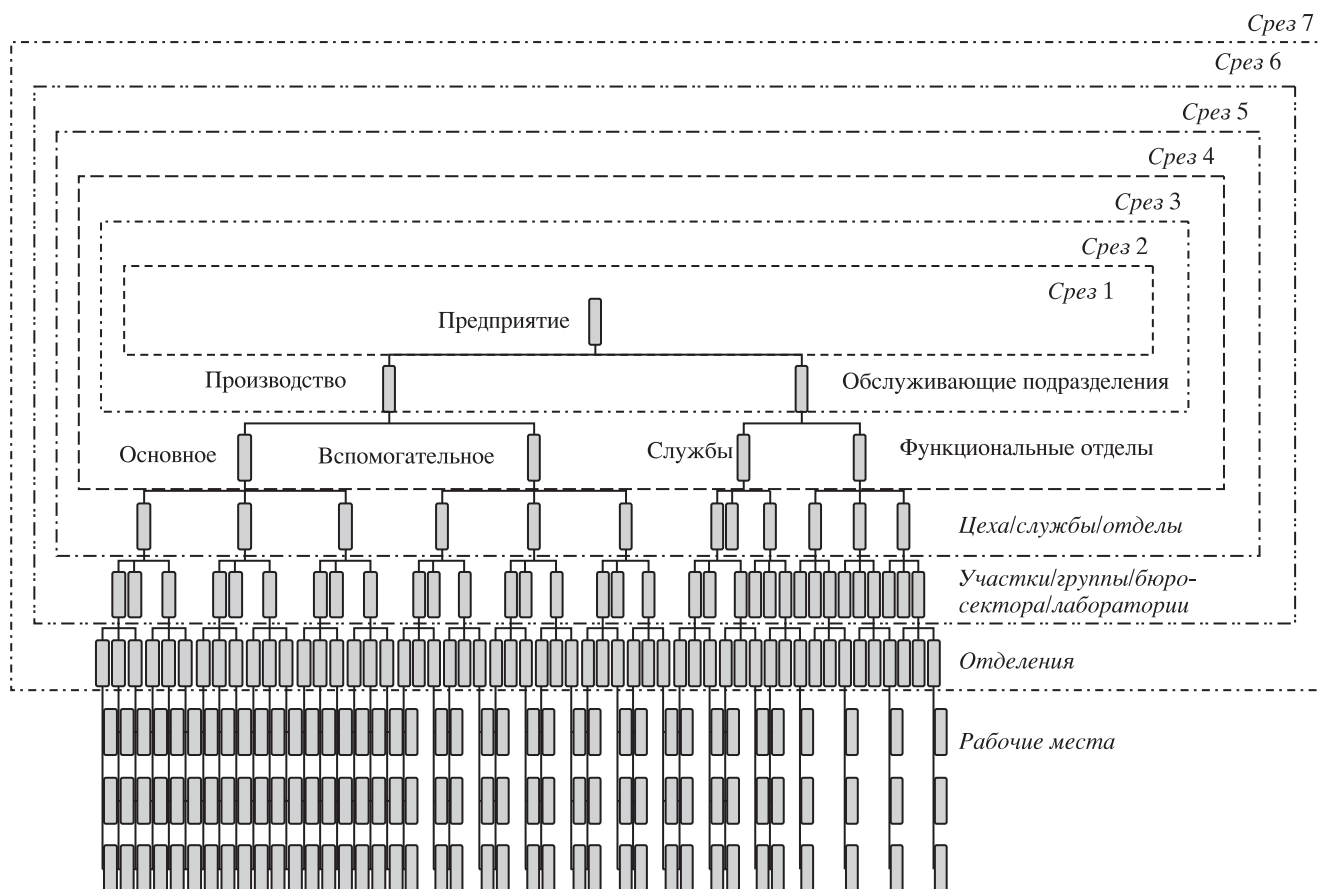


Рис. 2. Граф условного предприятия с выделением 7 срезов

точно остановиться на модели, содержащей срез s . Другими словами, достаточно ограничиться рассмотрением рисков в подразделениях предприятия до уровня s и тем самым упростить дальнейшую процедуру выбора мероприятий, связанных с модернизацией предприятия.

Вернемся для иллюстрации этих положений к условному предприятию, символически изображенному на рис. 1 и 2. Легко увидеть, что размер графа на срезе с номером $s = 4$ (т.е. при детализации предприятия до уровня цехов) примерно в 3 раза меньше размера графа, описывающего то же предприятие до уровня участков (т.е. при $s = 5$), в 8–9 раз меньше размера соответствующего графа при $s = 6$ и в десятки раз меньше соответствующего графа на уровне рабочих мест (т.е. при $s = 7$).

СОБЫТИЙНЫЙ ПОДХОД К ОПИСАНИЮ РИСКОВ. ФАКТОРЫ РИСКА

Как отмечалось во введении, мы определяем *риск* как меру реальности нежелательного развития хозяйственной деятельности предприятия, т.е. негативного отклонения фактически полученного результата от желаемого. Риск существует всякий раз, когда в условиях неопределенности относительно будущего есть достаточно высокая вероятность того, что на предприятии могут иметь место негативные обстоятельства или события и они приведут к экономическим потерям (Качалов, 2002; Птускин, 2003, 2005; Levner, Zuckerman, Meirovich, 1998; Kogan, Tapiero, 2007).

Неопределенность – неотъемлемый параметр экономической деятельности предприятия, отражающий факт того, что в момент принятия решений знания о последствиях решений лица, принимающего решение (ЛПР), в отдаленном (и, возможно, в не очень отдаленном) будущем будут неполными и неточными.

С точки зрения управления большинство подходов к оценке риска заключается в определении двух количественных характеристик: а) *вероятности* сбоя или другого нежелательного события в системе; б) его воздействия на материальные, финансовые и информационные потоки в системе выраженного через ожидаемую *стоимость потерь*. Источники рисков и результаты влияния риска на работу предприятия исследованы, например в (Клейнер, Тамбовцев, Качалов, 1997; Качалов, 2002). Видовое разнообразие рисков и способов их выражения достаточно велико. Мы будем, как сказано выше, исследовать только факторы риска в техносфере предприятия. В соответствии с (Качалов, 2002), эти факторы – только часть внутренних факторов риска, относящихся к производственной сфере деятельности предприятия (аварии оборудования, нарушения технологической дисциплины, перебои энергоснабжения и поставок топлива, аварии складских мощностей, сбой в системе обработки информации и т.п.).

Как отмечают многие исследователи, функционирование предприятия как организации, систематически осуществляющей производство по определенной технологии, неизбежно имеет в значительной степени статичный и даже рутинный характер. Но вместе с тем внутренняя жизнь предприятия и его отношения с окружающей средой (партнерами, конкурентами, поставщиками, потребителями и т.д.) достаточно динамичны, со временем они претерпевают постоянные изменения – как внутри предприятия, так и во внешней среде. Для придания анализу хозяйственных рисков на предприятии динамического характера мы предлагаем использовать категорию, которая хорошо известна и активно используется в *системно-интеграционной теории предприятий*; этой категорией является *событие*.

Речь идет о так называемых *системных событиях*, т.е. “*фактах, имеющих существенное значение для восприятия предприятия всеми субъектами, связанными с его деятельностью*” (Клейнер, 2003). Существенность в данном случае означает, что последствия данного события, по общему мнению, являются значимыми для предприятия: они приводят либо могут привести к существенным экономическим потерям. Такие события мы будем называть *рисковыми*, или *критическими*. Другими словами, каждое такое событие отражает проявление некоторого конкретного фактора риска на предприятии. Заметим, что в отличие от системных событий, изучаемых в теории стратегического менеджмента (где они считаются в известном смысле неотвратимыми), критические события могут (и должны) быть предотвращены благодаря соответствующим антирисковым мероприятиям, о которых пойдет речь ниже.

Приведем несколько полезных определений из системной теории предприятия, которые мы будем использовать в дальнейшем. Исходным материалом для анализа и оценки рисков являются *события*, т.е. наблюдаемые дискретные изменения состояния предприятия или его компонент. В дополнение к событиям вводятся *акты*, т.е. мероприятия, в нашем случае это антирисковые действия и мероприятия.

Фактором риска мы назовем причину, движущую силу процесса или явления, вызывающего риск на предприятии, определяющую его характер и основные особенности.

В данной работе нас интересуют ситуации риска с относительной неопределенностью, когда объективно существует возможность регистрировать в течение выбранного периода времени основные рисковые события на предприятии совместно с факторами риска. Подобная статистика, накопленная в протоколах риска, позволяет оценить вклад каждого фактора и общую наблюдаемую информационную энтропию на предприятии. Ниже мы покажем, что критические события вместе с вызывающими их факторами дают возможность сообщить ЛПР и другим заинтересованным лицам причины рисков на предприятии и расставить приоритеты в политике, направленной на их устранение.

Для каждого компонента структуры предприятия (узла графа предприятия) формируется информационная база данных о рисковых событиях в этом узле, называемая *протоколом риска*. Для каждого узла графа эти данные могут быть записаны в виде таблицы $T(v)$, представляющей собой список рисковых событий в рассматриваемом узле v в течение определенного периода времени. Эту таблицу будем называть *таблицей рисков*. Каждая строка таблицы содержит описание события, произошедшего в данном узле в какой-то момент времени. Столбцы таблицы соответствуют факторам риска, которые могут являться причиной потерь в данном узле. Величина $x(r, f)$ на пересечении строки r и столбца f равна 1, если фактор f явился причиной события, описанного строкой r , и 0 в противном случае. В случае, когда $x(r, f) = 1$, мы будем говорить, что фактор f является *драйвером риска* (или просто *драйвером*) события r . Полагаем, что у каждого события (в каждой строке) имеется ровно один драйвер. Мы используем символ f как индекс фактора риска, F – общее число факторов риска, r – номер события и $R(v)$ – общее число событий, зарегистрированных в узле v в течение рассматриваемого периода времени. Последний столбец таблицы отражает уровень экономических потерь.

Рассмотрим условный пример, взяв для иллюстрации риски, связанные с производством. На рис. 3 показан фрагмент графа предприятия с выделением трех уровней.

Мы используем следующие факторы риска: f_1 – аварии технологического оборудования; f_2 – нарушения технологической дисциплины; f_3 – перебои энергоснабжения; f_4 – перебои поставок топлива; f_5 – аварии складского оборудования; f_6 – сбои в системе обработки информации; f_7 – аварии транспортного оборудования.

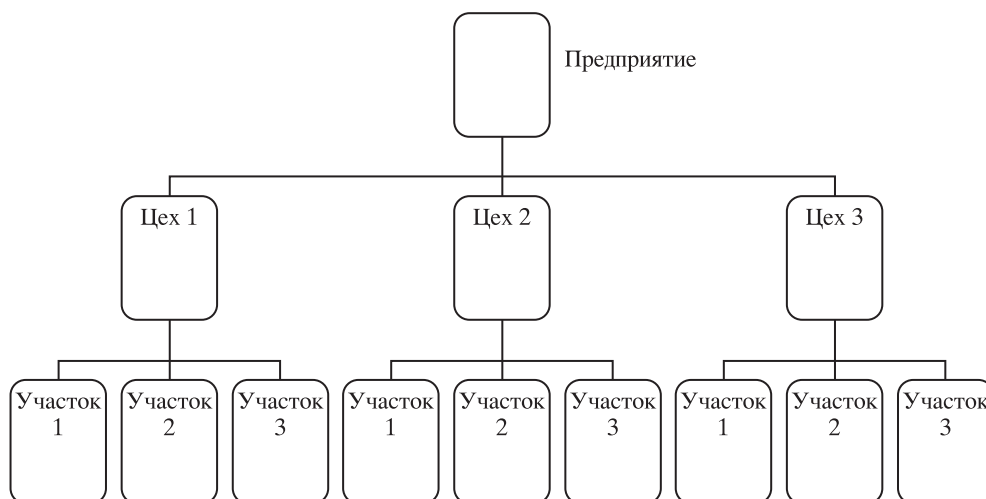


Рис. 3. Граф предприятия с выделением 3 уровней

Таблица 1. Фрагмент протокола риска на уровне предприятия

Факторы События	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6	f_7	Размер экономи- ческих потерь (руб.)
	Аварии техноло- гического оборудо- вания	Наруше- ния тех- нологи- ческой дисциплины	Перебои энерго- снабжение- ния	Перебои поставок топлива	Аварии складского оборудо- вания	Сбои в системе обработки инфор- мации	Аварии транс- портного оборудо- вания	
1	1							30 000
2			1					5000
3		1						7000
4					1			10 000
5				1				2000
6						1		4000
7			1					1000
8		1						5000
9	1							10 000
10						1		2000
11			1					4000
12	1							7000
13					1			6000
14						1		5000
15							1	8000
16				1				2000
17	1							12 000
18						1		1000
19					1			6000
20		1						8000
...	...	...	...	...	...	...	...	...

Допустим, что в течение заданного периода времени в протоколе риска на уровне предприятия зарегистрированы критические события, представленные в соответствующей таблице рисков (табл. 1). Эти события точно известны, как и вызванные ими экономические потери. Поясним смысл табл. 1 на примере строки 4. Содержательный смысл события для этой строки таков: «На предприятии в момент времени $t = 4$ зарегистрирован производственный сбой из-за аварии складского оборудования, который привел к экономической потере в размере 10 000 руб.». Заметим, что табл. 1 – только фрагмент протокола риска, содержащий первые 20 моментов времени полной таблицы рисков.

Просуммировав число единиц в каждом столбце в (полной) таблице критических событий, мы получим частоту проявления каждого фактора риска на предприятии в течение рассматриваемого периода времени. В нашем примере эти данные представлены в первой строке табл. 2. Мы полагаем, что вся информация о рисках в каждом родительском узле содержится также и в его дочерних узлах, но эта информация более подробная. Например, если известно, что в срезе i в узле v фактор f проявил себя как драйвер риска K раз, то в следующем срезе $i + 1$ в таблицах риска в дочерних узлах этого узла фактор f проявится как драйвер в сумме также K раз, т.е. если,

Таблица 2. Сводная информация из протокола рисков на уровне предприятия, цехов и участков

Факторы Уровень	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6	f_7	Доля экономических потерь, вызванных критическими событиями в узле, в общем объеме потерь ($c(v)$)
	Число проявлений фактора							
Предприятие	30	20	15	15	10	6	4	1
В цехе 1	20	12	12	10	1	1	1	0,57
на участке 1	10	4	2	3	1	0	0	0,2
на участке 2	5	4	6	6	0	0	1	0,22
на участке 3	5	4	4	1	0	1	0	0,15
В цехе 2	5	8	2	2	5	1	2	0,25
на участке 1	3	8	1	2	1	0	1	0,16
на участке 2	1	0	0	0	2	1	0	0,04
на участке 3	1	0	1	0	2	0	1	0,05
В цехе 3	5	0	1	3	4	4	1	0,18
на участке 1	3	0	1	0	1	2	0	0,07
на участке 2	1	0	0	0	2	1	0	0,04
на участке 3	1	0	0	3	1	1	1	0,07

например, имеется 3 дочерних узла и в них фактор f проявился как драйвер соответственно k_1 (в таблице – число проявлений фактора), k_2 и k_3 раз, то $k_1 + k_2 + k_3 = K$ (табл. 2). Коэффициенты $c(v)$, приведенные в последнем столбце табл. 2, отражают относительный размер экономических потерь, т.е. долю экономических потерь, вызванных критическими событиями в данном узле, в общем объеме потерь. В нашем примере полагаем, что из общего объема потерь их доля, равная 0,57, вызвана критическими событиями в цехе 1, доля 0,25 – в цехе 2 и доля 0,18 – в цехе 3 (при этом $0,57 + 0,25 + 0,18 = 1$). Соответственно определены доли экономических потерь на уровне цехов ($0,2 + 0,22 + 0,15 + 0,16 + 0,04 + 0,05 + 0,07 + 0,04 + 0,07 = 1$).

Исходные данные, приведенные в табл. 2, будут ниже использованы для анализа и вычисления рисков. Следует отметить, что мы будем рассматривать таблицы $T(v)$ для всех узлов, входящих в срез. Как было показано ранее, полный набор таких таблиц количественно отражает параметры критических (рисковых) ситуаций на предприятии в течение рассматриваемого периода времени.

ВЕРОЯТНОСТИ ФАКТОРОВ РИСКА. ЭНТРОПИЯ ПРЕДПРИЯТИЯ

Очевидно, что в результате получения новых сведений неопределенность системы может быть снижена. Чем больше объем полученных сведений, тем они более содержательные, тем больше информация о состоянии системы, и тем менее неопределенным будет ее состояние. Естественно поэтому количество информации измерять уменьшением энтропии той системы, для уточнения состояния которой предназначены сведения. Мы будем рассматривать граф предприятия срез за срезом, начиная с первого, $i = 1, 2$, и т.д. Мы покажем, что по мере увеличения номера среза информация о рисках в висячих узлах (т.е. узлах самого нижнего уровня среза) будет уточняться, и как результат увеличения нашего знания – энтропия системы будет монотонно падать.

Будем называть структуру предприятия s -усеченной, если она представлена срезом с номером s . Зададим произвольное значение s . В каждом узле v среза для каждого фактора f ($f = 1, \dots, F$) мы можем вычислить величину $N(v, f)$ – общее число тех строк в таблице рисков $T(v)$, для которых $x(r, f) = 1$. Смысл $N(v, f)$ – общее число событий, в которых фактор f проявляет себя как драйвер риска. Относительная частота $p(v, f)$ случаев, когда фактор f стал причиной экономических потерь, понимается нами как оценка вероятности соответствующего события: “при осуществлении модернизации предприятие несет потери в узле v за счет фактора риска f ”. Эта вероятность служит мерой риска и определяется для заданных v и f как

$$p(v, f) = N(v, f)/N(v), \quad (1)$$

где $N(v)$ – общее число строк в рассматриваемой таблице рисков $T(v)$. Тогда

$$\sum_{f=1, \dots, F} p(v, f) = 1. \quad (2)$$

Заметим, что число критических ситуаций в узлах среза не известно заранее, пока ЛПР не получит протоколы риска для этого среза. Однако мы полагаем, что общее число критических ситуаций на предприятии конечно и ограничено сверху достаточно большой величиной W , не зависящей от номера среза. Это допущение о существовании конечного W понадобится ниже при анализе энтропии предприятия.

Еще одно упрощающее допущение состоит в том, что рассматриваемые критические события независимы, а риски аддитивны, т.е. экономические потери в системе складываются из потерь в компонентах системы.

Сокращение чрезмерной сложности представления производственных и других сложных систем является целью многих исследований. Один из наиболее перспективных аналитических подходов к измерению сложности и информативности производственных систем основан на измерении *Шенноновской энтропии* (Вентцель, 1999). 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:

$$H = - \sum_{i=1, \dots, n} p_i \log p_i. \quad (3)$$

Основная идея состоит в том, что чем меньше неопределенности, тем меньше требуется дополнительной информации для представления или предсказания событий. Уменьшение энтропии свидетельствует об уменьшении неопределенности, или, другими словами, об увеличении знаний о системе. Соответственно, рост энтропии свидетельствует об уменьшении объема знаний.

Как мы упоминали во введении, в ряде отечественных и зарубежных работ авторы успешно связывают Шенноновскую энтропию с измерением информативности сложных производственных систем и степени неполноты знаний об их состоянии. Продолжая и развивая данное направление исследований, мы используем энтропию как меру количества информации для анализа и упрощения графовой модели предприятия.

Естественно определить энтропию узла v с помощью формулы (3), в которой в качестве событий, о которых идет речь в этой формуле, будем рассматривать соответствующие рискованные события в таблице $T(v)$, а в качестве априорных вероятностей событий p_i возьмем вероятности $p(v, f)$, определенные соотношением (1). Тогда

$$H(v) = - \sum_{f=1, \dots, F} p(v, f) \log p(v, f). \quad (4)$$

Одно из свойств функции энтропии состоит в том, что если система разделяется на несколько подсистем, то общая энтропия определяется как взвешенная сумма энтропий подсистем. На основании этого свойства мы определим энтропию предприятия (точнее, энтропию графа предприятия на срезе s) как взвешенную сумму энтропий висячих узлов в этом срезе.

Для каждого узла v мы вводим два типа весов: *структурный* $b(v)$ и *экономический* $c(v)$. С точки зрения структуры дерева мы определим *структурный вес* $b(v)$ узла v как отношение $b(w)/d(w)$, где w – родительский узел для v , $b(w)$ – вес родительского узла w узла v , а $d(w)$ – общее число дочерних узлов узла-родителя w .

С экономической точки зрения второй вес узла как измеритель экономических показателей должен отражать размер экономических потерь. Поскольку при анализе s -усеченной структуры в протоколах риска имеется информация об экономических потерях $L(v)$, вызванных критическими событиями в узле v , узел v получает соответствующий второй вес следующим образом:

$c(v) = L(v) / \sum_v L(v)$, где сумма $\sum_v L(v)$ берется по множеству всех висячих узлов среза s .

Известное свойство энтропии состоит в том, что ее максимально возможное значение достигается в случае, когда веса всех узлов и, соответственно, все вероятности событий равны между собой.

Мы можем оценить наши неполные знания об источниках риска на предприятии в срезе s с помощью энтропии s -усеченной структуры следующим образом:

$$H(\Pi, s) = \sum_v b(v)c(v)H(v) = - \sum_v b(v)c(v) \sum_f p(v, f) \log p(v, f). \quad (5)$$

где сумма $\sum_v b(v)c(v)H(v)$ берется по множеству всех висячих узлов среза s . Заметим, что это соотношение формально отражает приведенное выше допущение об аддитивности рисков.

Теперь мы можем заметить важную закономерность в поведении энтропии на s -усеченных структурах, которая состоит в том, что по мере увеличения номера среза (т.е. детализации структуры) энтропия убывает.

Утверждение. Энтропия $H(\Pi, s)$ в s -усеченной структуре монотонно уменьшается с ростом s и асимптотически приближается к 0 при достаточно больших значениях s .

Доказательство. Отметим прежде всего, что веса узлов $b(v) = b(w)/d(w)$, входящие в формулу (5), определяются рекурсивно – сверху вниз по дереву предприятия, начиная с корневого узла, вес которого полагается равным 1. При таком определении вес $b(v)$ определяется однозначно, достаточно последовательно просмотреть все узлы на единственном пути в дереве предприятия, ведущем из корневого узла (обозначенного как узел 1) в узел v :

$$b(v) = b(w)/d(w) = b(w_1)/(d(w_1)d(w)) = b(w_2)/(d(w_2)d(w_1)d(w)) = \dots = 1/(d(1)\dots d(w_2)d(w_1)d(w)),$$

где $1, \dots, w_2, w_1, w, v$ – узлы на пути из узла 1 в узел v .

Очевидно, что такое определение структурных весов обеспечивает максимально возможное значение энтропии, так как все дочерние узлы (для каждого родительского узла) получают равные веса.

Так как общее число критических событий в каждом срезе ограничено константой W (и не зависит от числа узлов в срезе), то $\sum_v H(v)$ не превосходит $W/\sum_v \sum_f N(v, f) = 1$, однако знаменатель в коэффициенте $b(v)$ в (5) зависит от числа висячих узлов в срезе (и растет с ростом s). В результате энтропия $H(\Pi, s)$ в s -усеченной структуре монотонно уменьшается с ростом s . Кроме того, $H(\Pi, s)$ асимптотически приближается к нулю при достаточно больших значениях s . Этот результат следует из того факта, что величина $b(v)$ монотонно уменьшается при росте s , значения $c(v)$ и $p(v, f)$ не превосходят 1, а величина $\sum_f p(v, f) \log p(v, f)$ ограничена сверху величиной $\log F$, что завершает доказательство.

Следствие. При последовательном построении модели предприятия срез за срезом дальнейшая детализация нецелесообразна, когда снижение энтропии становится незначительным при переходе к последующему срезу, т.е. когда

$$(H(s-1) - H(s))/(H(1) - H(s)) \leq \varepsilon, \quad (6)$$

где ε – пороговое значение относительного изменения энтропии. Так как параметры задачи, входящие в формулы (2)–(6), известны, легко определить число срезов s^* , обеспечивающих требуемое приближение структуры с заранее заданным значением порога ε .

Для иллюстрации подсчитаем по формуле (5) энтропию срезов на примере данных, приведенных в табл. 2. Веса узлов, отражающие размер экономических потерь (относительные размеры экономических потерь узлов), указаны в последнем столбце табл. 2. Считаем, что все узлы на уровнях 4–7 графа предприятия (для упрощения не изображенные на рис. 3) имеют по три дочерних узла, и веса экономических потерь всех узлов на каждом уровне 4–7 одинаковые. Результаты расчета энтропии s -усеченных структур $H(\Pi, s)$ представлены на рис. 4, где явно

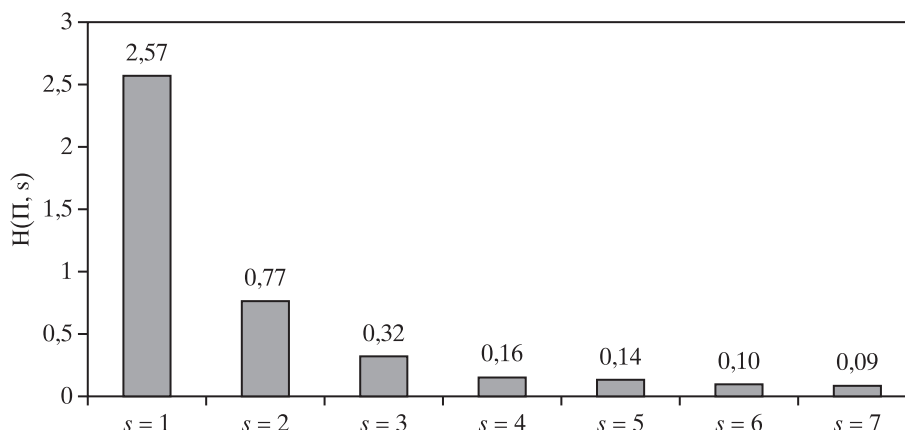


Рис. 4. Динамика энтропии s -усеченных структур

наблюдается уменьшение энтропии с ростом номера среза. Зададим пороговое значение $\epsilon = 0,1$. В этом случае число срезов s^* , обеспечивающих по формуле (6) требуемое приближение по энтропии, будет равно 3.

В заключение этого параграфа представляет интерес обсудить вопрос, как получается, что при разбиении каждого родительского узла (подразделения предприятия) v на дочерние узлы (т.е. на подсистемы, вместе входящие в рассматриваемое подразделение) энтропия уменьшается, т.е. сумма энтропий в дочерних узлах меньше энтропии родительского узла v . Не противоречит ли этот факт фундаментальному принципу теории информации, согласно которому энтропия любой системы меньше или, в крайнем случае, равна сумме энтропий всех входящих в нее частей?

Ответ на этот “парадокс” прост: при разбиении любого подразделения на части, т.е. при движении от одного среза к следующему, мы дополнительно получаем (и используем) более детальную информацию о том, в каких именно частях подразделения произошли сбои и в каких количествах, а также – какова относительная важность каждой подсистемы в рассматриваемом подразделении. Никакого парадокса нет: увеличение знания может только уменьшить энтропию.

ВЫБОР НАПРАВЛЕНИЙ МОДЕРНИЗАЦИИ ПРЕДПРИЯТИЯ

В предыдущем параграфе предложена схема выбора экономной структуры графа предприятия, основанная на энтропийном подходе. Рассмотрим теперь задачу определения *оптимального портфеля* предотвращающих риск программ модернизации на этом графе с учетом стоимости и экономического воздействия каждой программы при заданном бюджете. Цель оптимизации – минимизировать риски, точнее, минимизировать экономические потери, связанные с рисковыми событиями. После выбора усеченного графа предприятия с ограниченным числом срезов s^* задача выбора портфеля антирисковых мероприятий может быть представлена как задача бинарного выбора “рюкзачного типа” на s^* -усеченной структуре, размерность которой существенно ниже размерности полного графа, описывающего предприятие вплоть до рабочих мест.

Кратко укажем основные направления антирисковых мероприятий, направленных на модернизацию предприятия. Модернизация предприятия может проводиться средствами различных мероприятий, к которым относятся: усовершенствование производимой продукции, разработка и внедрение новых технологических процессов, автоматизация производства, проекты технического перевооружения, изготовление новой технологической оснастки, проекты совершенствования информационных систем, программы повышения квалификации персонала и т.д. Более подробное рассмотрение конкретных мероприятий и проектов модернизации выходит за рамки данной статьи. Основные направления модернизации производственных систем и совершенствования инфраструктуры инновационной деятельности анализируются, например, в работах (Кононова 2006; Багриновский, 2007).

Перейдем к формальной постановке задачи выбора мероприятий модернизации. Для этой цели воспользуемся и модифицируем модель выбора антирисковых стратегических решений, предложенную в (Птускин, Левнер, 2012а). Для каждого узла графа предприятия известны факторы риска, ставшие причинами имевших место экономических потерь на предприятии, а также размеры соответствующих экономических потерь. Для каждого фактора риска и любого компонента (узла) предприятия может быть определен набор мероприятий и программ модернизации. Любой компонент предприятия может быть включен (или не включен) в такие программы модернизации. Общее число таких программ можно считать известным заранее. Естественно считать, что после реализации программ модернизации какой-то (случайный) уровень риска остается в системе. Экономические потери за счет таких остаточных рисков – случайные величины, для которых мы можем оценить средние значения (математическое ожидание) и дисперсию. Отметим, что на этапе упрощения модели графов предприятия экономические потери являются точно известными, детерминированными величинами, а на этапе выбора проектов модернизации – стохастическими. Этот факт объясняется тем, что в первом случае мы оцениваем экономические потери в результате уже совершившихся событий, и потому они достаточно хорошо известны из протоколов риска. Во втором же случае мы прогнозируем будущие потери, вызванные остаточными рисками, и тогда неизбежная неопределенность наших знаний о будущем диктует стохастический характер соответствующих потерь. Проводимые на предприятии мероприятия могут предотвращать риски лишь частично. Это отражается в модели стохастическим характером остаточных рисков.

Для каждой программы модернизации определена верхняя граница ее бюджета, а также определен общий бюджет всех программ модернизации. Известна стоимость реализации программы для каждого узла (в случае его включения в программу). Необходимо сформировать портфель программ модернизации, т.е. определить, какие узлы войдут в эти программы, распределить средства между программами с учетом их стоимости и результатов, а также ограничений требуемых средств. Критерием выбора портфеля программ является минимизация математического ожидания предполагаемых экономических потерь, порождаемых остаточными рисками в разных подразделениях предприятия.

Введем следующие обозначения: m – номер узла; $m = 1, \dots, M$; M – число узлов в s^* -усеченной структуре предприятия; f – индекс фактора риска; $f = 1, \dots, F$; F – общее число факторов риска, которые могут являться причинами сбоев в узлах, приведших к экономическим потерям; j_f – индекс программы модернизации для предотвращения фактора риска f ; $j_f = 1, \dots, J_f$; J_f – число программ модернизации для нейтрализации фактора f . В дальнейшем мы будем опускать индекс f в символах j_f для упрощения обозначений; при этом подразумевается, что каждому индексу j соответствует некоторый свой фактор f ; $b_{m,j}$ – стоимость реализации программы модернизации j в узле m ; $c_{m,j}$ – математическое ожидание (среднее значение) предполагаемых экономических потерь, порождаемых остаточным риском при реализации программы модернизации j в узле m ; $C(x)$ – математическое ожидание полных экономических потерь, порождаемых всеми остаточными рисками, как функция от выбранных узлов в программах $x = (x_{m,j})$,

$$C(x) = \sum_m \sum_j c_{m,j} x_{m,j},$$

где $x_{m,j}$ – бинарный параметр (искомая переменная), отражающий включение узла m в программу модернизации j : $x_{m,j} = 1$, если включен, $x_{m,j} = 0$, если не включен; B_j – верхняя граница бюджета программы j ; B – общий стратегический бюджет всех программ модернизации.

Критерий оптимизации портфеля программ может быть определен следующим образом:

$$C(x) = \sum_m \sum_j c_{m,j} x_{m,j} \rightarrow \min; \quad (7)$$

ограничения по общему стратегическому бюджету:

$$\sum_m \sum_j b_{m,j} x_{m,j} \leq B; \quad (8)$$

ограничения по бюджету программы j :

$$\sum_m b_{m,j} x_{m,j} \leq B_j, \quad j = 1, \dots, J; \quad (9)$$

ограничения на включение узла в заданное число программ модернизации по каждому узлу:

$$\sum_j x_{m,j} \leq H, \quad m = 1, \dots, M; \quad (10)$$

условие бинарности переменных:

$$x_{m,j} = 0 \vee 1, \quad m = 1, \dots, M; \quad j = 1, \dots, J. \quad (11)$$

Оптимальный портфель мероприятий модернизации определяется в результате решения задачи математического программирования, которая формулируется следующим образом: определить все $x_{m,j}$, $m = 1, \dots, M$; $j = 1, \dots, J$, обеспечивающие минимум (7) при ограничениях (8)–(11).

Подведем итоги. Заметим, что на практике размерность математической задачи оптимального выбора стратегий модернизации для предотвращения хозяйственного риска может быть очень велика, поскольку граф реального предприятия может состоять из сотен и даже тысяч узлов. Поэтому, подчеркнем еще раз: мы предлагаем решать эту проблему в три этапа. Прежде всего мы формируем протоколы риска, которые позволяют не только регистрировать рисковые события, но и определять относительную важность факторов риска на основе частоты их проявления на предприятии в целом и в его подразделениях. Затем, на втором этапе, используя понятие энтропии, мы упрощаем структуру предприятия и сокращаем его размерность. После замены исходного графа предприятия на усеченный граф с ограниченным числом срезов задача выбора портфеля антирисковых мероприятий модернизации может быть представлена как задача типа (7)–(11) на усеченном графе, размерность которого существенно ниже размерности полного графа. И, наконец, на третьем этапе мы приступаем к анализу и принятию решений, связанных с выбором стратегий модернизации на основе математической модели оптимального бинарного выбора.

Существует много различных вычислительных методов и компьютерных программ для решения целочисленных задач математического программирования “рюкзачного” типа (см., например, (Заславский, 1999; Martello, Toth, 1990; Kellerer, Pferschy, Pisinger, 2003)). Анализ их эффективности и практических возможностей для принятия решений в задачах выбора проектов модернизации выходит за рамки данной работы и является предметом следующего этапа нашего исследования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящая статья посвящена одной из центральных проблем операционного (производственного) менеджмента – выбору направлений модернизации предприятий в условиях неопределенности и риска. Динамический и стохастический аспект этой проблемы определяет важнейшую роль инноваций и знаний. Для устойчивого развития в условиях рыночной экономики современная фирма должна сочетать производственную деятельность с творческой работой, связанной с обработкой информации и динамичным извлечением знаний. В этом направлении Г.Б. Клейнер сформулировал *системно-интеграционную теорию фирмы*, в которой учет динамических аспектов поведения предприятий (фирм) интерпретируется через категорию системных событий (Клейнер, 2003). В этом же ключе мы рассматриваем предлагаемый информационно-энтропийный подход к анализу риска на предприятии как возможный инструмент извлечения знания о рискованных событиях, содержащегося в протоколах риска (не всегда используемых на предприятии надлежащим образом и в полном объеме). Оценка знания (и неполноты знания) о риске с помощью противоположного понятия – энтропии – позволяет нам не только количественно и точно охарактеризовать объем знания, но и дает возможность, действуя последовательно, шаг за шагом, уменьшать энтропию и увеличивать объем полезного знания.

В данной статье мы предложили строгий количественный подход, который позволяет извлечь из протоколов риска существенную информацию о факторах риска, на ее основе упро-

стить структуру графа предприятия без заметной потери ее информативности и затем принимать решения – выбрать оптимальную стратегию модернизации. В продолжение данного исследования представляет интерес дальнейшее развитие эффективных вычислительных методов решения этой задачи. Энтропийный подход универсален и применим для анализа других составляющих комплексной системной модернизации, например для финансовой или коммерческой сфер деятельности предприятий. Однако этот вопрос выходит за рамки данной работы и может быть предметом будущих исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Багриновский К.А.** (2007). Основные направления совершенствования инфраструктуры инновационной деятельности // *Экономика и математические методы*. Т. 43. № 4.
- Виссен Л. ван, Попков А.Ю., Попков Е.Ю., Попков Ю.С.** (2006). Модель рынка труда с энтропийным оператором (конкуренция когорт) // *Экономика и математические методы*. Т. 40. № 2.
- Вентцель Е.С.** (1999). Теория вероятностей: Учебник для вузов. М.: Высшая школа.
- Виленский П.Л., Лившиц В.Н., Смоляк С.А.** (2008). Оценка эффективности инвестиционных проектов: теория и практика. М.: Дело.
- Громов А.И., Ставенко Ю.А.** (2011). Энтропийный подход к моделированию бизнес-процессов // *Информационные технологии в проектировании и производстве*. № 3.
- Дулесов А.С., Хрусталева В.И.** (2012). Определение энтропии как меры информации при сопоставлении прогнозных и фактических показателей предприятия // *Современные проблемы науки и образования*. № 1.
- Заславский А.А.** (1999). Комбинированный метод решения задач о рюкзаке // *Экономика и математические методы*. Т. 35. Выпуск 1.
- Качалов Р.М.** (2002). Управление хозяйственным риском. М.: Наука.
- Качалов Р.М.** (2012). Управление экономическим риском. М.: ООО “Нестор-История”.
- Клейнер Г.Б.** (2003). От теории предприятия к теории стратегического менеджмента // *Российский журнал менеджмента*. № 1.
- Клейнер Г.Б.** (2008). Стратегия предприятия. М.: Дело.
- Клейнер Г.Б., Тамбовцев В.Л., Качалов Р.М.** (1997). Предприятие в нестабильной экономической среде: риски, стратегии, безопасность. М.: Экономика.
- Кононова В.Ю.** (2006). Модернизация производственных систем на российских промышленных предприятиях: современное состояние и перспективы // *Российский журнал менеджмента*. Т. 4. № 4.
- Леус В.А.** (2003). О геометрическом обобщении энтропии // *Проблемы передачи информации*. Т. 39. Вып. 2.
- Найт Ф.Х.** (2003). Риск, неопределенность и прибыль. М.: Дело.
- Прангишвили И.В.** (2003). Энтропийные и другие системные закономерности: Вопросы управления сложными системами. М.: Наука.
- Птускин А.С.** (2003). Ранжирование инвестиционных проектов по уровню риска с использованием лингвистического подхода // *Экономическая наука современной России*. № 3.
- Птускин А.С.** (2005). Задача бюджетирования капитала с размытыми параметрами // *Экономика и математические методы*. Т. 41. № 2.
- Птускин А.С., Левнер Е.В.** (2012а). Модель выбора антирисковых стратегических решений для уменьшения экономических потерь в цепях поставок. В сб.: “Системный анализ в экономике – 2012”. Секция 2. Материалы научно-практической конференции. Москва, 27–28 ноября 2012 г. М: ЦЭМИ РАН.
- Птускин А.С., Левнер Е.В.** (2012б). Энтропийный подход к упрощению структуры цепи поставок для выбора антирисковых стратегических решений // *Экономическая наука современной России*. № 4 (59).
- Allesina S., Azzi A., Battini D., Regattieri A.** (2010). Performance Measurement in Supply Chain: New Network Analysis and Entropic Indexes // *International Journal of Production Research*. Vol. 48. No. 7/8.
- Bar-Yam Y.** (2004). Multiscale complexity/Entropy // *Advances in Complex Systems*. Vol. 7. No. 1.
- Frizelle G., Woodcock E.** (1994): Measuring Complexity as an aid to Developing Operational Strategy // *IJOPM*. Vol. 15.

- Herbon A., Levner E., Hovav S., Lin S.P.** (2012). Selection of Most Informative Components in Risk Mitigation Analysis of Supply Networks: An Information-Gain Approach // *International Journal of Innovation, Management and Technology*. Vol. 3. No. 3.
- Hertz D., Thomas H.** (1983). Risk Analysis and its Applications. N.Y.: John Wiley and Sons.
- Isik F.** (2010). An Entropy-Based Approach for Measuring Complexity in Supply Chains // *International Journal of Production Research*. Vol. 48. No. 12.
- Karp A., Ronen B.** (1992). Improving Shop Floor Control: an Entropy Model Approach // *International Journal of Production Research*. Vol. 30. No. 4.
- Kellerer H., Pferschy U., Pisinger D.** (2003). Knapsack Problems. Berlin: Springer Verlag.
- Kogan K., Tapiero C.S.** (2007). Supply Chain Games. Operations Management and Risk Valuation. N.Y.: Springer.
- Levner E.V., Zuckerman D., Meirovich G.** (1998). Total Quality Management of a Production-Maintenance System: A Network Approach // *International Journal of Production Economics*. Vol. 56–57.
- Martello S., Toth. P.** (1990). Knapsack Problems. N.Y.: John Wiley and Sons.
- Martinez-Olvera C.** (2008). Entropy as an Assessment Tool of Supply Chain Information Sharing // *European Journal of Operational Research*. Vol. 185.

Поступила в редакцию
01.03.2013 г.

On a Selection of Directions of Enterprise Modernization Based on an Information Entropy Model of Economic Risk

Ye.V. Levner, A.S. Ptuskin

The paper considers a problem of selecting a portfolio of planned activities for enterprise modernization enabling to minimize the economic risks. It is shown how, by using the entropy approach, to extract a sufficient amount of useful information from the risk protocols generated in the various enterprise departments. An economic-mathematical model of selecting the modernization activities is presented in the form of the integer programming knapsack-type problem.

Keywords: modernization, risk, entropy, graph of an enterprise, selection of modernization projects.

JEL Classification: D81.