Моделирование и оптимизация бизнес-процессов и процессных систем в условиях неопределенности

А.Г. Мадера

доктор технических наук, профессор департамента математики факультета экономики
Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»
Адрес: 101000, г. Москва, ул. Мясницкая, д. 20
E-mail: amadera@hse.ru

Аннотация

Данная работа посвящена математическому моделированию и оптимизации бизнес-процессов и процессных систем в условиях неопределенности. В настоящее время моделирование бизнес-процессов носит в основном дескриптивный описательный характер, что не позволяет осуществлять количественное моделирование и оптимизацию при проектировании процессов и процессных систем. Кроме того, существующие методы принятия решений в бизнес-процессах исходят из допущения о детерминированности определяющих бизнес-процессы факторов. Несмотря на неопределенность условий развития реальных процессов, обусловленных неопределенностью будущих цен на ресурсы, конъюнктуры рынка, экономики, финансов, и пр., факторы неопределенного будущего либо не принимаются во внимание, либо полагаются теми же, что наблюдаются и в настоящее время.

В статье разработана оптимизационная интервально стохастическая математическая модель, позволяющая в количественном виде моделировать бизнес-процессы и процессные системы, в которых они протекают, в условиях неопределенности будущих состояний экономики, финансов, конъюнктуры рынка, цен на ресурсы, а также актуализации шансов и рисков, имеющих место при осуществлении производственных, обеспечивающих и сервисных процессов. Критерием оптимальности модели является максимизация минимального отклонения прогнозируемых шансов и рисков, что позволяет принимать наилучшее решение при наступлении в будущем наиболее неблагоприятных для бизнес-процесса условий. Принятый в математической модели критерий оптимальности учитывает не только неопределенность будущих состояний экономики, финансов и рыночной конъюнктуры, но и психологию принятия решений и вынесения субъективных суждений и оценок. Приведены концепция и метод оценивания индуктивных (логических, субъективных) вероятностей наступления неопределенных прогнозируемых факторов бизнес-процесса.

Разработанные в статье модели и методы позволяют осуществлять математическое моделирование и оптимизацию бизнес-процессов при разнообразных видах деятельности без ограничений на сложность структурной модели бизнес-процесса, а также качественный и количественный состав звеньев в процессных системах. На их основе могут быть разработаны программные комплексы количественного проектирования бизнес-процессов и процессных систем в условиях неопределенности.

Ключевые слова: бизнес-процесс, процессная система, условия неопределенности, математическая модель, оптимизация, интервально стохастическая модель, вероятность, критерий оптимизации, шансы, риски.

Цитирование: Мадера А.Г. Моделирование и оптимизация бизнес-процессов и процессных систем в условиях неопределенности // Бизнес-информатика. 2017. № 4 (42). С. 74–82.
DOI: 10.17323/1998-0663.2017.4.74.82.

Введение

Количественное проектирование бизнес-процессов и процессных систем, в которых они совершаются, требует наличия количественных методов моделирования и оптимизации. Между тем моделирование процессов и процессных систем, к какой бы сфере деятельности они ни относились (производству, сервису, обслуживанию, обеспечению, снабжению, логистике, цепям поставок), на сегодняшний день носит в основном качественный дескриптивный описательный характер и осуществляется в виде вербального, текстового, табличного, графического и других описаний и нотаций потоков работ, ресурсов и информации. При этом в существующей литературе по бизнес-процессам под их моделированием понимается так называемая регламентация, документирование и сопровождающий документооборот, а под оптимизацией – реинжиниринг, заключающийся в выполнении ряда мероприятий по согласованию и частичному улучшению процессов [1, 2]. Однако выполнение каких бы то ни было организационных предписаний и мероприятий оптимизацией, на самом деле, не является, поскольку основывается не на математическом анализе достижения экстремального значения некоторого количественного критерия оптимальности, а на качественном, при котором обеспечить выбор оптимального решения в принципе невозможно.

Несмотря на актуальность разработки математических методов моделирования и оптимизации бизнес-процессов и процессных систем, их проектирование продолжает оставаться, по преимуществу, качественным. Вышесказанное подтверждается как явно недостаточным количеством работ по математическим методам моделирования и оптимизации процессов (на что указывается, например, в работе [3]), так и отмечаемым в работах [4, 5] фактическим отсутствием сведений о конкретных примерах, относящихся к реальным компаниям, которые на практике осуществляют количественное проектирование, моделирование и оптимизацию своих бизнес-процессов. Отметим, что работы [3, 6–14], хотя и содержат математические модели бизнес-процессов, применимы лишь *ad hoc* – к частным конкретным случаям. При этом практически во всех работах бизнес-процессы рассматриваются исключительно в детерминированных условиях, когда все факторы, их определяющие, полностью и однозначно известны.

Между тем, реальные бизнес-процессы и процессные системы на практике функционируют в условиях неопределенности всех определяющих их факторов: будущих состояний экономики, финансов, конъюнктуры рынка, будущих цен на ресурсы и энергоносители, объемов инвестиций, спроса на новый продукт, шансов, рисков, а также будущей финансовой устойчивости организационных единиц, входящих в процессную систему. Неопределенность как настоящего, так и будущего, является неотъемлемым атрибутом реальной действительности, поэтому для адекватного описания реальности необходимо, чтобы условия неопределенности включались в создаваемые методы моделирования и оптимизации бизнес-процессов.

В настоящей статье развивается оптимизационная математическая модель бизнес-процессов и процессных систем в условиях неопределенности, с использованием интервально стохастических факторов, подчиняющихся равномерному закону распределения вероятностей. Разработанные в статье модели и методы моделирования и оптимизации могут быть положены в основу количественного проектирования процессов и процессных систем и разработки соответствующего программного комплекса, для применения на практике в сферах производства, обеспечения, снабжения, сервиса, оказания услуг, логистики, цепях поставок, и др.

1. Структурные и математические модели процессных звеньев

Структурная модель процесса и процессной системы представляет собой совокупность взаимодействующих между собой организационных единиц, моделируемых процессными звеньями, и связей между ними. В каждом процессном звене осуществляются различные виды деятельности, подчиненные достижению единой общей цели, направленной на производство конечного выходного продукта, имеющего ценность для потребителя. На входы процессных звеньев поступают потоки ресурсов (факторов производства), которые преобразуются в продукты (конечный или промежуточный) на выходе звеньев.

Следуя работе [2], выделяют следующие виды бизнес-процессов и соответствующих им звеньев (*рисунок 1*):

✦ производственные, или основные, процессы и звенья (*рисунок 1а*) – процессы, добавляющие как ценность, так и стоимость к конечному или промежуточному продукту, в количестве, равном затратам на производство продукта. В производственном звене происходит преобразование поступающих на его вход материальных факторов производства, энергоносителей и живого труда, в продукт на выходе (промежуточный продукт, полуфабрикат, незавершенное производство, окончательный продукт всего процесса);

✦ обеспечивающие процессы и звенья (*рисунок 1b*) – процессы, в которых продукт не производится, качественно и количественно не изменяется, ценность не добавляется, в отличие от добавленной стоимости, обусловленной затратами энергоносителей и живого труда по обеспечению производства. В обеспечивающем звене объемы факторов производства и продуктов на входе и выходе звена равны между собой. К обеспечивающим видам работ относятся погрузка, разгрузка, доставка факторов производства и продуктов производства, хранение, оформление документации и др.;

✦ сервисные процессы и звенья, или услуги (*рисунок 1c*) – процессы, добавляющие как стоимость, так и ценность для потребителя, за которую последний готов платить. В сервисном звене, как и в производственном, добавление стоимости к продукту обусловливается затратами факторов производства, энергоносителей и живого труда при выполнении сервисных работ, но в то же время, как и в обеспечивающем звене, объемы продукта на входе и выходе сервисного звена равны между собой. К сервисным работам могут быть отнесены все работы над конечным продуктом, выполняемые по заказам потребителя, за которые он готов платить: заказная упаковка, сортировка, маркировка, придание товарного вида, доставка непосредственно потребителю, и др.

Входные потоки в каждом звене включают в себя как экзогенные потоки ресурсов, закупаемых во внешней среде (множество $\boldsymbol{X}$), так и эндогенные потоки продуктов, произведенных в том же процессе в предыдущих звеньях (множество $\boldsymbol{Y}$), и поступающих для производства в звенья того же процесса. Нумерация экзогенных и эндогенных потоков в множествах $\boldsymbol{X}$ и $\boldsymbol{Y}$ является независимой и сквозной по всей структуре процессной системы.

Рассмотрим структурную модель процессной системы конкретного бизнес-процесса (*рисунок 2*). Потоки экзогенных и эндогенных ресурсов обозначаются кружками, с указанными внутри них объемами ресурсов (x – экзогенных, y – эндогенных); поступающие ресурсы и/или продукты – стрелками; производственные звенья – прямоугольниками (*рисунок 1a*), обеспечивающие – ромбами (*рисунок 1b*), сервисные – треугольниками (*рисунок 1c*). Структурная модель на *рисунке 2* содержит два обеспечивающих звена (1 и 6), четыре производственных звена (2, 3, 4, 5 и 7) и одно сервисное звено 8. Экзогенные ресурсы в объемах x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 закупаются вне процесса, эндогенные продукты в объемах y_1, y_2, y_3, y_4, производятся в процессных звеньях 2, 3, 4 и 5. Конечный продукт всего бизнес-процесса в объеме y_5 с выхода производственного звена 7 поступает на вход сервисного звена 8, над которым совершаются сервисные работы, причем $y_6 = y_5$.

Работы по созданию конечного выходного продукта объемом y_5 осуществляются следующим образом. Ресурс в объеме x_1 и часть ресурса x_2 в объеме $x_2'(x_2 = x_2' + x_2'')$ поступают в складское звено 1, а из него – на входы производственных звенев 3 и 4. Часть x_2'' ресурса x_2, а также ресурс объемом x_3 подаются непосредственно в производственное звено 2, где преобразуются в продукт объемом y_1, одна часть которого в объеме $y_1'(y_1 = y_1' + y_1'')$ подается в производственное звено 4, а другая, в объеме y_1'' – в производственное звено 5. С выхода производственных звеньев 3 и 4 продукты в объемах y_1 и y_3, совместно с ресурсом объемом x_5, поступают

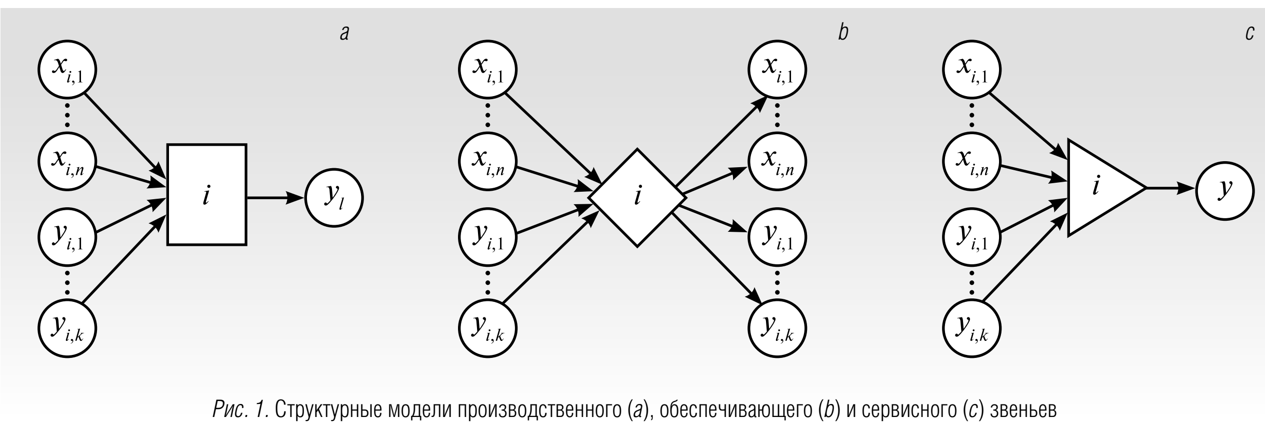

Рис. 1. Структурные модели производственного (*a*), обеспечивающего (*b*) и сервисного (*c*) звеньев

на преобразование в производственное звено 7. Продукт объемом y_4 с выхода производственного звена 5 и ресурс объемом x_4, поступают на склад, а после него — на вход производственного звена 7, где совместно с продуктами y_2, y_3 и ресурсом x_5, перерабатываются в конечный выходной продукт бизнес-процесса объемом y_5. Последний подвергается в сервисном звене 8 сервисным операциям, приобретая свойства, удовлетворяющие запросы заказчика и оплаченные им.

Математическая модель производственного звена i (*рисунок 1a*), на вход которого подаются упорядоченные множества экзогенных $\boldsymbol{X}_i$ и эндогенных $\boldsymbol{Y}_i$ потоков ресурсов $\left\{x_{i,1}, x_{i,2}, \ldots, x_{i,n}\right\} \in \boldsymbol{X}_i \subset \boldsymbol{X}$ и $\left\{y_{i,1}, y_{i,2}, \ldots, y_{i,k}\right\} \in \boldsymbol{Y}_i \subset \boldsymbol{Y}$, представляет собой многофакторную производственную функцию [15, 16], в натуральном выражении имеющую вид

$$y_l = f_i\left(x_{i,1}, x_{i,2}, \ldots, x_{i,n}; y_{i,1}, y_{i,2}, \ldots, y_{i,k}\right),$$

где $y_l \in \boldsymbol{Y}$ — объем продукта, произведенного в звене i.

В отличие от производственных звеньев, в которых факторы производства на входе преобразуются в качественно новый продукт на выходе, в обеспечивающих звеньях (*рисунок 1b*) совершаются работы по обеспечению производственного процесса, а в сервисных (*рисунок 1c*) — по сервисной обработке уже произведенного конечного продукта. При этом как в обеспечивающих, так и в сервисных звеньях при совершении различных видов деятельности факторы производства не затрачиваются, в отличие от энергоносителей, живого труда и средств труда, которые затрачиваются на выполнение соответствующих работ над готовым продуктом, но без изменения его количества. В то время как обеспечивающие процессы не добавляют ценности к производимым продуктам, сервисные — напротив, добавляют ценность к готовому продукту, как путем придания ему требуемых заказчиком свойств, так и оказания оплаченных клиентами услуг. Таким образом, математические модели обеспечивающих звеньев представляют собой тождественные производственные функции преобразования факторов производства самих в себя

$$f_i\left(x_{i,1}, x_{i,2}, \ldots, x_{i,n}; y_{i,1}, y_{i,2}, \ldots, y_{i,k}\right) = x_{ij},\ j = 1, 2, \ldots, n,$$

$$f_i\left(x_{i,1}, x_{i,2}, \ldots, x_{i,n}; y_{i,1}, y_{i,2}, \ldots, y_{i,k}\right) = y_{ij},\ j = 1, 2, \ldots, k,$$

а сервисных звеньев производственные функции, преобразующие факторы производства и готовый продукт объемом y в продукт того же объема $f\left(x_{i,1}, x_{i,2}, \ldots, x_{i,n}; y\right) = y$ [15, 16].

2. Математическая модель бизнес-процесса и процессной системы в условиях неопределенности

Математические модели, адекватно описывающие реальные бизнес-процессы, должны учитывать неопределенность будущих состояний экономики, финансов, конъюнктуры рынка, цен на факторы производства и энергоносители, объемов инвестиций, шансы, риски, и прочие факторы неопределенности (см. раздел 1) и, кроме того, — психологию принятия решений и вынесения субъектом суждений и оценок [17–21]. Неопределенность моделируется интервально стохастическими факторами, равномерно распределенными внутри интервалов со значениями границ, оцениваемыми индуктивной (логической, субъективной) вероятностью [16, 20–25]. Для формулирования оптимизационной модели необходимо определить количественный критерий оптимизации и ограничения области допустимых решений $\boldsymbol{D}$ [26].

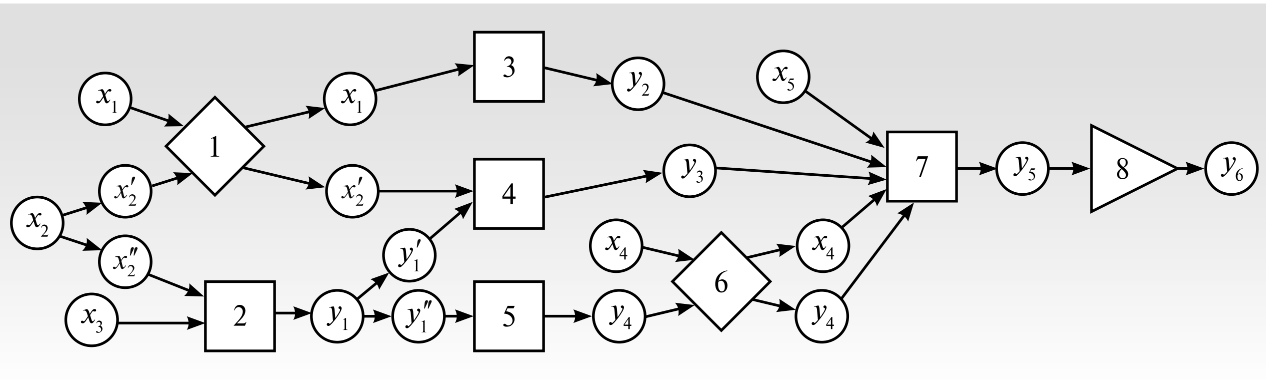

Рис. 2. Структурная модель бизнес–процесса и процессной системы
(1, 6 – обеспечивающие звенья, 2, 3, 4, 5, 7 – производственные звенья, 8 – сервисное звено)

Критерий оптимизации математической модели. Неопределенные события, актуализирующиеся в будущем, сводятся, по существу, к двум категориям: событиям, наступление которых благоприятно для бизнес-процесса (шансы) – высокие прибыли, достижение цели, получение запланированных результатов, и событиям, которые будут неблагоприятными для бизнес-процесса (риски) – убытки, недостаточная прибыль, провалы, банкротства и др. Как показано в работах [16, 24], для принятия наилучших решений критерий оптимизации бизнес-процесса должен максимизировать шансы и минимизировать риски. Этим условиям удовлетворяет комплексный критерий «шансы – риски» $Ch\&R$ [16, 24], определяемый как

$$Ch\&R = \beta_{Ch}Ch - \beta_R \left| R \right|,$$

где Ch и R — полные прогнозируемые шансы и риски, релевантные рассматриваемому процессу;

$\beta_{Ch}, \beta_R \in [0,1]$ – коэффициенты относительной важности шансов и рисков.

Величины полных шансов $Ch \in \boldsymbol{M}$ и рисков $R \in \boldsymbol{M}$ (множество $\boldsymbol{M}$ содержит L шансов и K рисков) определяются [16, 24] как суммы произведений количественных мер шансов (доходы, прибыль, выручка) $M_{Ch,k}, (k=1,2,\ldots,L)$ и рисков (потери, убытки, ущербы) $M_{R,k}, (k=1,2,\ldots,K)$ на меры их возможной актуализации, или вероятности $P_{Ch,k}$ и $P_{R,k}$, то есть

$$Ch = \sum_{k=1}^{L} M_{Ch,k} P_{Ch,k}, \quad R = \sum_{k=1}^{K} M_{R,k} P_{R,k}.$$

При этом количественные меры каждого k-го шанса и риска являются интервально стохастическими и изменяющимися в интервалах $M_{Ch,k} \in \left[\underline{M}_{Ch,k}, \overline{M}_{Ch,k} \right]$, $M_{Ch,k} \in \left[\underline{M}_{R,k}, \overline{M}_{R,k} \right]$, где $\underline{M}_{Ch,k}, \overline{M}_{Ch,k}$ и $\underline{M}_{R,k}, \overline{M}_{R,k}$ – нижние и верхние значения границ интервалов количественных мер шансов и рисков, вычисляемые с использованием правил интервальной арифметики [27].

Для получения наилучшего, релевантного бизнес-процессу решения, обеспечивающего максимизацию шансов при одновременной минимизации рисков, критерий оптимальности «шансы – риски» $Ch\&R$ необходимо максимизировать. Это равносильно определению такого решения в условиях неопределенности, при котором гарантируется достижение максимальной разности между нижней границей шансов $\underline{Ch}$ и верхней границей рисков $\overline{R}$ [16, 24] для любого $\omega \in \Omega$ (ω – элементарные события, Ω – пространство элементарных событий). Получим следующий критерий оптимизации бизнес-процессов:

$$\max\left\{Ch\&R\right\} = \max\left\{\beta_{Ch}\underline{Ch} - \beta_R \left|\overline{R}\right|\right\}, \text{ где} \qquad (1)$$

$$\underline{Ch} = \sum_{k=1}^{L} \underline{M}_{Ch,k} P_{Ch,k}, \; \overline{R} = \sum_{k=1}^{K} \overline{M}_{R,k} P_{R,k}.$$

Ограничения оптимизационной математической модели. Ограничения математической модели являются бюджетными и определяют условия на величину полных затрат по осуществлению процессной деятельности, величина которых не должна превышать вложенные в бизнес-процесс финансовые средства.

Обозначим объемы закупаемых экзогенных факторов производства как $\{x\} = \{x_1, x_2, \ldots, x_m\} \in \boldsymbol{D}$, $x_i \geq 0$, а их цены как $c_{Ch,i}$ и $c_{R,i}$, (i = 1, 2, ...m). Учитывая, что цены на факторы производства являются неопределенными и интервально стохастическими, изменяющимися в интервалах $c_{Ch,i}(\omega) \in \left[\underline{c}_{Ch,i}, \overline{c}_{Ch,i}\right]$ и $c_{R,i}(\omega) \in \left[\underline{c}_{R,i}, \overline{c}_{R,i}\right]$, $\overline{c}_{Ch,i} \leq \underline{c}_{R,i}$, с нижними и верхними границами $\underline{c}_{Ch,i}, \overline{c}_{Ch,i}$ и $\underline{c}_{R,i}, \overline{c}_{R,i}$, получим выражения для полных затрат по закупке факторов производства для каждого $\omega \in \Omega$:

$$C_{Ch}(\omega) = \sum_{i=1}^{m} c_{Ch,i}(\omega) x_i, \; C_R(\omega) = \sum_{i=1}^{m} c_{R,i}(\omega) x_i.$$

В силу интервально стохастической неопределенности как затрат, так и объемов финансирования бизнес-процесса, бюджетные ограничения должны пониматься в вероятностном смысле, а именно – как вероятности выполнения бюджетных ограничений-неравенств, которые не должны быть ниже некоторых пороговых значений p_{Ch} и p_R, задаваемых владельцем бизнес-процесса [28] и бизнес-аналитиками. Таким образом, ограничения модели для шансов и рисков будут записаны в виде:

$$P\left\{C_{Ch}(\omega) \leq I_{Ch}(\omega)\right\} \geq p_{Ch}, \;\; P\left\{C_R(\omega) \leq I_R(\omega)\right\} \geq p_R \qquad (2)$$

где $I_{Ch}(\omega) \in \left[\underline{I}_{Ch}, \overline{I}_{Ch}\right]$ и $I_R(\omega) \in \left[\underline{I}_R, \overline{I}_R\right]$, $\overline{I}_{Ch} \leq \underline{I}_R$ – интервально стохастические объемы финансирования бизнес-процесса;

$P\{\cdot\}$ – индуктивные (субъективные, логические) вероятности.

Интервально стохастическая оптимизационная математическая модель. Интервально стохастическая оптимизационная математическая модель бизнес-процессов при неопределенности определяющих факторов, формулируется следующим образом: найти объемы факторов производства $\{x\}$ = $\{x_1, x_2, \ldots x_m,\} \in \boldsymbol{D}$, $x_i \geq 0$, i = 1, 2, ... m, доставляющие максимальное значение критерию «шансы – риски» (1) и удовлетворяющие вероятностным ограничениям для шансов и рисков (2), то есть:

$$\max_x \{Ch\&R\} = \max_x \left\{\beta_{Ch}\underline{Ch} - \beta_R \left|\overline{R}\right|\right\},$$

$$P\{C_{Ch}(\omega) \le I_{Ch}(\omega)\} \ge p_{Ch}, \quad P\{C_R(\omega) \le I_R(\omega)\} \ge p_R.$$

Для определения оптимального решения данной оптимизационной модели в условиях интервально стохастической неопределенности необходимо преобразовать вероятностные ограничения (2) в соответствующие им детерминированные эквиваленты [29].

Эквивалентная детерминированная оптимизационная математическая модель. Заметим, что интервально стохастические цены факторов производства $c_{Ch,i}(\omega)$, $c_{R,i}(\omega)$ и объемы финансирования $I_{Ch}(\omega)$, $I_R(\omega)$, $\omega \in \Omega$ являются интервальными и подчиняются равномерным законам распределения вероятностей, а их суммы, равные полным затратам, $c_{Ch}(\omega)$ и $c_R(\omega)$, согласно центральной предельной теореме Ляпунова [30], – нормальному распределению с математическими ожиданиями

$$m(C_{Ch}) = \sum_{i=1}^{m} m(c_{Ch,i})x_i, \quad m(C_R) = \sum_{i=1}^{m} m(c_{R,i})x_i$$

и дисперсиями

$$\sigma^2(C_{Ch}) = \sum_{i=1}^{m} \sigma^2(c_{Ch,i})x_i^2, \quad \sigma^2(C_R) = \sum_{i=1}^{m} \sigma^2(c_{R,i})x_i^2, \text{ где}$$

$$m(c_{Ch,i}) = (\underline{c}_{Ch,i} + \overline{c}_{Ch,i})/2, \quad m(c_{R,i}) = (\underline{c}_{R,i} + \overline{c}_{R,i})/2,$$

$$\sigma^2(c_{Ch,i}) = (\underline{c}_{Ch,i} - \overline{c}_{Ch,i})^2/12, \quad \sigma^2(c_{R,i}) = (\underline{c}_{R,i} - \overline{c}_{R,i})^2/12.$$

Приводя, согласно теореме [29], вероятностные неравенства в ограничениях (2) к детерминированному виду, получим окончательную эквивалентную детерминированную оптимизационную математическую модель:

$$\max_{\{x\}} \{Ch\&R\} = \max_{\{x\}} \left\{\beta_{Ch}\underline{Ch} - \beta_R \left|\overline{R}\right|\right\},$$

$$m(C_{Ch}) + k_{Ch}\sqrt{\sigma^2(C_{Ch}) + \sigma^2(I_{Ch})} \le m(I_{Ch}),$$

$$m(C_R) + k_R\sqrt{\sigma^2(C_R) + \sigma^2(I_R)} \le m(I_R),$$

$$x_i \ge 0, \quad i = 1, 2, \ldots, m,$$

где k_{Ch}, k_R – квантили стандартных нормальных распределений;

$m(I_{Ch})$, $m(I_R)$ и $\sigma^2(I_{Ch})$, $\sigma^2(I_R)$ – математические ожидания и дисперсии интервально стохастических объемов финансирования, равные

$$m(I_{Ch}) = (\underline{I}_{Ch} + \overline{I}_{Ch})/2, \quad m(I_R) = (\underline{I}_R + \overline{I}_R)/2,$$

$$\sigma^2(I_{Ch}) = (\underline{I}_{Ch} - \overline{I}_{Ch})^2/12, \quad \sigma^2(I_R) = (\underline{I}_R - \overline{I}_R)^2/12.$$

Полученная детерминированная оптимизационная математическая модель относится к классу задач нелинейного программирования общего вида. Ее оптимальное решение может быть получено с помощью существующих пакетов компьютерных программ, например, NEOS, AMPL, MATLAB, MathOptimizier, GALAHAD, MS Excel. По найденному оптимальному решению $\{x^*\} = \{x_1^*, x_2^*, \ldots, x_m^*\}$ определяются оптимальные значения всех факторов бизнес-процесса и процессной системы: объем и стоимость конечного продукта, объемы и стоимости промежуточных продуктов на выходах всех звеньев, доходы и прибыль при различных прогнозируемых условиях в будущем и т.д.

3. Метод оценивания индуктивных вероятностей прогнозируемых событий

Вероятности наступления будущих событий (состояний экономики, финансов, рисков, шансов и др.) необходимо оценивать согласно концепции индуктивной вероятности, поскольку прогнозируемые события являются уникальными и единичными, к которым понятия классической или статистической вероятностей неприменимы. Это обусловлено тем, что единичные уникальные события не являются случайными объектами, рассматриваемыми в классической теории вероятностей, поскольку они не удовлетворяют условиям массовости, однородности, неограниченной воспроизводимости в идентичных условиях, и устойчивости частот [20–24].

Концепция и метод оценивания индуктивных вероятностей $P(A)$ наступления событий $\{A\} = \{A_1, A_2, \ldots A_n\}$ разработаны в работе [21] и позволяют существенно увеличить адекватность прогнозирования. Метод основан как на статистических данных по прогнозированию релевантных событий за прошлые периоды, так и на новой имеющейся информации о наблюдаемых в настоящий момент времени тенденциях. Данные за прошлые периоды характеризуют погрешности, присущие субъекту при прогнозировании событий и оценивании их вероятностей, а данные, получаемые из информации о развитии событий и наблюдаемых в настоящем тенденциях, позволяют провести их коррекцию. По этим двум видам данных формируются две матрицы: матрица погрешностей прогнозирования субъекта $\mathcal{L}$ и матрица уточненных прогнозов $\mathcal{M}$, сделанных на основании современной информации. Как показано в работе [21], искомый вектор вероятностей наступления прогнозируемых событий $P(A)$ является собственным вектором полной матрицы погрешностей прогнозирования $\mathcal{K} = \mathcal{M} \cdot \mathcal{L}$ отвечающим ее единичному собственному значению, а именно, $P(A) = \mathcal{K} \cdot P(A)$.

Заключение

Предложенная в работе оптимизационная интервально стохастическая математическая модель позволяет моделировать оптимальные бизнес-процессы и оптимальные структуры и параметры процессных систем в условиях неопределенности будущих состояний экономики, финансов, конъюнктуры рынка, спроса на новый продукт, цен на факторы производства, цены продажи конечного продукта, объемов инвестиций, наступления в будущем шансов и рисков, и др. Структурная модель процессной системы может включать производственные, обеспечивающие и сервисные звенья, отражающие весь диапазон видов деятельности, совершаемых в различных бизнес-процессах при переработке входов в продукты на выходах. Разработанные в статье математические модели и методы позволяют осуществлять математическое моделирование и оптимизацию разнообразных бизнес-процессов и процессных систем без ограничений на сложность, качественный и количественный состав процессных звеньев и сложность структуры процессной системы. Они могут быть положены в основу разработки программных комплексов количественного проектирования бизнес-процессов и сложных процессных систем в условиях неопределенности. ■

Литература

1. Robson M., Ullah P. A practical guide to business process re-engineering. Hempshire: Gower, 1996.
2. Harrington H.J., Esseling K., van Nimwegen H. Business process improvement workbook: Documentation, analysis, design, and management of business process improvement. N.Y.: McGraw-Hill, 1997.
3. Vergidis K., Tiwari A., Majeed B. Business process analysis and optimization: Beyond reengineering // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. Part C (Applications and Reviews). 2008. Vol. 38. No. 1. P. 69–82.
4. Stock J.R., Lambert D.M. Strategic logistics management. Boston: McGraw-Hill, 2001.
5. Shapiro J.F. Modeling the supply chain. Duxbury, CA: Thomson Learning, 2001.
6. van der Aalst W.M.P. The application of Petri nets to workflow management // Journal of Circuits, Systems and Computers. 1998. Vol. 8. No. 1. P. 21–66.
7. Hofacker I., Vetschera R. Algorithmical approaches to business process design // Computers & Operations Research. 2001. No. 28. P. 1253–1275.
8. Koubarakis M., Plexousakis D. A formal framework for business process modelling and design // Information Systems. 2002. Vol. 27. No. 5. P. 299–319.
9. Valiris G., Glykas M. Business analysis metrics for business process redesign // Business Process Management Journal. 2004. Vol. 10. No. 4. P. 445–480.
10. Seuring S. A review of modeling approaches for sustainable supply chain management // Decision Support Systems. 2013. Vol. 54. No. 4. P. 1513–1520.
11. Wibig M. Dynamic programming and genetic algorithm for business processes optimization // International Journal of Intelligent Systems and Applications. 2013. Vol. 5. No. 1. P. 44–51.
12. Sawicki P., Sawicka H. Logistics process improvement using simulation and stochastic multiple criteria decision aiding // Procedia – Social and Behavioral Sciences. 2014. No. 111. P. 213–223.
13 Sustainable supply chain optimisation: An industrial case study / Q. Zhang [et al.] // Computers & Industrial Engineering. 2014. No. 74. P. 68–83.
14. Ahmadikatouli A., Motameni H. Enrichment of object oriented Petri net and object Z aiming at business process optimization // International Journal of Advanced Computer Science and Applications. 2015. Vol. 6. No. 7. P. 13–19.
15. Клейнер Г.Б. Производственные функции: Теория, методы, применение. М.: Финансы и статистика, 1986.
16. Мадера А.Г. Математическое моделирование и оптимизация бизнес-процессов на основе комплексного критерия «шансы – риски» // Российский журнал менеджмента. 2015. Т. 13, № 4. С. 51–68.
17. Козелецкий Ю. Психологическая теория решений / Пер. с польск. М.: Прогресс, 1979.
18. Plous S. The psychology of judgment and decision making. N.Y.: McGraw-Hill, Wesleyan University, 1993.
19. Werth L. Psychologie für die wirtschaft. Grundlagen und anwendungen. Berlin: Spectrum Akademischer Verlag, 2004.
20. Мадера А.Г. Интервально стохастическая неопределенность оценок в многокритериальных задачах принятия решений // Искусственный интеллект и принятие решений. 2014. № 3. С. 105–115.
21. Мадера А.Г. Метод определения вероятностей прогнозируемых событий при принятии решений // Искусственный интеллект и принятие решений. 2016. № 2. С. 38–45.
22. Carnap R. Logical foundations of probability. Chicago: The University of Chicago Press. 1971.
23. de Finetty B. Bayesinism: Its unifying role for both the foundations and applications of statistics // International Statistical Review. 1974. No. 42. P. 117–130.

24. Мадера А.Г. Риски и шансы: неопределенность, прогнозирование и оценка. М.: Красанд, 2014.
25. Madera A.G. Estimating the probability of forecasted events // International Journal of Accounting and Economics Studies. 2016. Vol. 4. No. 1. P. 76–80.
26. Мадера А.Г. Моделирование и принятие решений в менеджменте. М.: ЛКИ, 2009.
27. Alefeld G., Herzberger J. Introduction to interval computations. N.Y.: Academic Press, 1983.
28. ISO/IEC 15288:2002. System engineering – System life cycle processes. 2002.
29. Liu B. Theory and practice of uncertain programming. Heidelberg: Physica-Verlag, 2002.
30. Feller W. An introduction to probability theory and its applications. N.Y.: John Wiley, 1970.

Modeling and optimization of business processes and process systems under conditions of uncertainty

Alexander G. Madera
Professor, Department of Mathematics of the Faculty of Economics
National Research University Higher School of Economics
Address: 20, Myasnitskaya Street, Moscow, 101000, Russian Federation
E-mail: amadera@hse.ru

Abstract

This paper is devoted to mathematical modeling and optimization of business processes and process systems under conditions of uncertainty. At present, modeling of business processes is mainly descriptive, which does not allow quantitative modeling and optimization in the design of processes and process systems. In addition, the existing methods of decision-making in business processes are based on the assumption that the decisive factors are deterministic. Despite uncertainty of the real processes caused by the uncertainty of future costs of resources, the market environment, economy, finances, etc., the factors of an uncertain future are either not taken into account, or are believed to be the same as those observed currently.

In this paper, a stochastic interval mathematical optimization model is developed. This model allows us to simulate in a quantitative way the business processes and process systems in which they take place, taking into account the uncertainties of the future state of the economy, finances, market environment, costs of resources, as well as future realization of chances and risks related to the productive, supporting, and service processes. The criterion for optimality of the model is the maximization of the smallest deviation of the projected chances and risks, which makes it possible to make the best decision in the case that the most unfavorable conditions for the business process occur in the future. The criterion of optimality adopted in the mathematical model takes into account not only the uncertainty of the future state of the economy, finance, and market environment, but also the psychology of decision-making and the subjective nature of judgments and estimates. We present a concept and method for estimating the inductive (logical, subjective) probabilities of the occurrence of uncertain projected business process factors.

The models and methods developed in the paper make it possible to carry out mathematical modeling and optimization of business processes in a variety of activities without restrictions on the complexity of the structural model of the business process, the qualitative and quantitative composition of the connections in the process systems. On their basis, a software package for the quantitative design of business processes and process systems under conditions of uncertainty can be developed.

Key words: business process, process system, conditions of uncertainty, mathematical model, optimization, interval stochastic model, probability, optimization criterion, chances, risks.

Citation: Madera A.G. (2017) Modeling and optimization of business processes and process systems under conditions of uncertainty. *Business Informatics,* no. 4 (42), pp. 74–82. DOI: 10.17323/1998-0663.2017.4.74.82.

References

1 Robson M., Ullah P. (1996) *A practical guide to business process re-engineering.* Hempshire: Gower.

2. Harrington H.J., Esseling K., van Nimwegen H. (1997) *Business process improvement workbook: Documentation, analysis, design, and management of business process improvement.* N.Y.: McGraw-Hill.

3. Vergidis K., Tiwari A., Majeed B. (2008) Business process analysis and optimization: Beyond reengineering. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. Part C (Applications and Reviews)*, vol. 38, no. 1, pp. 69–82.
4. Stock J.R., Lambert D.M. (2001) *Strategic logistics management*. Boston: McGraw-Hill.
5. Shapiro J.F. (2001) *Modeling the supply chain. Duxbury*, CA: Thomson Learning.
6. van der Aalst W.M.P. (1998) The application of Petri nets to workflow management. *Journal of Circuits, Systems and Computers*, vol. 8, no. 1, pp. 21–66.
7. Hofacker I., Vetschera R. (2001) Algorithmical approaches to business process design. *Computers & Operations Research*, no. 28, pp. 1253–1275.
8. Koubarakis M., Plexousakis D. (2002) A formal framework for business process modelling and design. *Information Systems*, vol. 27, no. 5, pp. 299–319.
9. Valiris G., Glykas M. (2004) Business analysis metrics for business process redesign. *Business Process Management Journal*, vol. 10, no. 4, pp. 445–480.
10. Seuring S. (2013) A review of modeling approaches for sustainable supply chain management. *Decision Support Systems*, vol. 54, no. 4, pp. 1513–1520.
11. Wibig M. (2013) Dynamic programming and genetic algorithm for business processes optimization. *International Journal of Intelligent Systems and Applications*, vol. 5, no. 1, pp. 44–51.
12. Sawicki P., Sawicka H. (2014) Logistics process improvement using simulation and stochastic multiple criteria decision aiding. *Procedia – Social and Behavioral Sciences*, no. 111, pp. 213–223.
13. Zhang Q., Shah N., Wassick J., Helling R., van Egerschot P. (2014) Sustainable supply chain optimisation: An industrial case study. *Computers & Industrial Engineering*, no. 74, pp. 68–83.
14. Ahmadikatouli A., Motameni H. (2015) Enrichment of object oriented Petri net and object Z aiming at business process optimization. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, vol. 6, no. 7, pp. 13–19.
15. Kleiner G.B. (1986) *Proizvodstvennye funktsii: Teoriya, metody, primenenie* [Production functions: Theory, methods, application]. Moscow: Finance and Statistics (in Russian).
16. Madera A.G. (2015) Matematicheskoe modelirovanie i optimizatsiya biznes-protsessov na osnove kompleksnogo kriteriya “shansy – riski” [Mathematical modeling and optimization of business processes based on an integrated criterion of chances and risks]. *Russian Management Journal*, vol. 13, no. 4, pp. 51–68 (in Russian).
17. Kozielecki J. (1979) *Psikhologicheskaya teoriya resheniy* [Psychological decision theory]. Moscow: Progress (in Russian).
18. Plous S. (1993) *The psychology of judgment and decision making*. N.Y.: McGraw-Hill, Wesleyan University.
19. Werth L. (2004) *Psychologie für die wirtschaft. Grundlagen und anwendungen*. Berlin: Spectrum Akademischer Verlag.
20. Madera A.G. (2014) Interval’no stokhasticheskaya neopredelennost’ otsenok v mnogokriterial’nykh zadachakh prinyatiya resheniy [Interval stochastic uncertainty of estimates in multiple criteria decision making problems]. *Artificial Intelligence and Decision Making*, no. 3, pp. 105–115 (in Russian).
21. Madera A.G. (2016) Metod opredeleniya veroyatnostey prognoziruemykh sobytiy pri prinyatii resheniy [Method for determination of probabilities of the projected events when making decisions]. *Artificial Intelligence and Decision Making*, no. 2. pp. 38–45 (in Russian).
22. Carnap R. (1971) *Logical foundations of probability*. Chicago: The University of Chicago Press.
23. de Finetty B. (1974) Bayesinism: Its unifying role for both the foundations and applications of statistics. *International Statistical Review*, no. 42, pp. 117–130.
24. Madera A.G. (2014) *Riski i shansy: neopredelennost’, prognozirovanie i otsenka* [Risks and chances: Uncertainty, forecasting and estimation]. Moscow: Krasand (in Russian).
25. Madera A.G. (2016) Estimating the probability of forecasted events. *International Journal of Accounting and Economics Studies*, vol. 4, no. 1, pp. 76–80.
26. Madera A.G. (2009) *Modelirovanie i prinyatie resheniy v menedzhmente* [Modeling and decision making in management]. Moscow: LKI (in Russian).
27. Alefeld G., Herzberger J. (1983) *Introduction to interval computations*. N.Y.: Academic Press.
28. ISO/IEC 15288:2002. *System engineering – System life cycle processes*.
29. Liu B. (2002) *Theory and practice of uncertain programming*. Heidelberg: Physica-Verlag.
30. Feller W. (1970) *An introduction to probability theory and its applications*. N.Y.: John Wiley.