

# Применение оценок полных затрат при проектировании сложных систем

В.Б. Гусев,  
в.н.с., к.ф.-м.н., доц., gusvbr@ipu.ru  
Н.А. Исаева  
с.н.с., к.т.н., nat\_i@ipu.ru  
ИПУ РАН, г. Москва

Рассматриваются процедуры расчёта оценок полных затрат при проектировании и функционировании сложных систем. При получении оценок влияния учитывается совокупность прямых затрат, оценки которых могут быть заданы как экспертным путем, так и на основе анализа объективной информации. Полные затраты оцениваются с помощью транзитивного замыкания прямых удельных затрат, которое выполняется рефлексивными процедурами, использующими частично линейные операции над оценками.

The procedures of the calculation of the estimations of the total expenditures with design and functioning of complex systems are examined. With obtaining the estimations of influence the totality of the direct expenditures, whose estimations can be assigned both by expert evaluation and based on analysis of objective information, is considered. Total expenditures are evaluated with the aid of the transitive closing of straight specific expenditures, which is carried out by the reflexive procedures, which use partially linear operations above the estimations.

## Введение

Принятие решений в сфере проектирования и управления сложными системами на основе анализа их жизненного цикла требует учета большого числа действующих факторов. Это могут относиться к сложным техническим, финансовым, социально-экономическим и другим системам [1, 2]. Поскольку исчерпывающий количественный анализ всего действующего набора этих факторов весьма затруднителен, имеет смысл исследовать их системное влияние а основе применения методов сценарного анализа и моделей причинно-следственных влияний [2, 3]. В результате сложения эффекта от всех цепочек связей, исходящих от каждого фактора-причины и заканчивающихся факторами-следствиями, формируется системный эффект, определяемый полной совокупностью возникающих косвенных связей. Исходная система взаимных влияний, характеризуемая оценками прямых затрат, в результате рефлексивного суммирования всех косвенных воздействий формирует систему полных затрат как их транзитивное замыкание.

Цель работы заключается в разработке и применении процедур расчёта оценок полных затрат на основе экспертных данных, так и на основе анализа объективной информации. Предметом рассмотрения является метод экспертного анализа, использующий рефлексивные процедуры с частично линейными операциями для получения транзитивного замыкания оценок затрат.

Используемые оценки удельных затрат при взаимном влиянии факторов являются более консервативными, чем оценки стоимости самих факторов, которые с течением времени могут иметь большой разброс. Значения оценок транзитивного замыкания удельных затрат на себя позволяют судить о степени устойчивости этих оценок.

Начальный анализ взаимовлияния факторов заключается в исследовании затрат при парных взаимодействиях [3]. Из всех пар на множестве рассматриваемых факторов выделяются пары, для которых можно представить механизм прямого взаимодействия типа «причина – следствие». Это так называемые «примитивные» взаимодействия. Косвенные влияния на этом этапе отсеиваются. Топология связей определяется на основании представлений эксперта об исследуемых процессах. Структура связей и значения удельных затрат уточняются в процессе верификации модели.

Задачей анализа транзитивного замыкания взаимодействий для рассматриваемой совокупности факторов является получение выводов об эффективности механизмов управления процессами проектирования и функционирования сложной системы с точки зрения минимизации полных затрат, как целевого показателя. Результаты рефлексий оценок затрат могут быть использованы в качестве подсказок при рациональном выборе управляющих факторов и принятии проектных решений.

## 1. Расчёт удельных затрат

Полные затраты учитывают прямые и косвенные издержки. При анализе полных затрат на проектирование и/или функционирование сложной системы используются удельные затраты отдельных операций.

Пусть известна система прямых затрат  $Z_{ij}$  при выпуске компонент вектора продукции  $V_j$ . Обозначим  $z_{ji}$  прямые удельные затраты на операцию над парой видов продукции (факторов)  $i, j$ , определяемые как

$$z_{ji} = Z_{ij} / v_j.$$

Обозначим через  $A$  матрицу удельных затрат. Тогда вектор суммарных затрат  $X$  для вектора выпуска  $V$  определяется как векторное произведение

$$X = AV.$$

При принятии решений учитывается ограничение на допустимую величину удельных затрат при проектировании и/или функционировании сложной системы. Выполнение двух последовательных в технологической цепочке операций  $ij$  и  $jk$  требует удельных затрат, соответствующих как максимум, произведению соответствующих удельных затрат  $Z_{ij} \cdot Z_{jk}$  для каждой из них

$$Z_{ik} = Z_{ij} \otimes Z_{jk} = \min(Z_{\max}, Z_{ij} \cdot Z_{jk}),$$

где  $Z_{\max}$  – предельный объем затрат при выполнении операций, превышение которого означает невыполнимость данной (и любой другой) операции. Этот вид операции учитывает, что продукция 1-й операции  $V_k$  является затратами 2-й  $Z_{jk}$  и при записи произведения удельных затрат они сокращаются.

При совместном выполнении двух операций требуется сумма удельных затрат на каждую из них

$$z_{ik} = z'_{ik} \oplus z''_{ik} = \min(z_{\max}, z'_{ik} + z''_{ik}).$$

Таким образом, в пределах допустимого интервала удельных затрат процедура рефлексий при оценивании полных затрат использует операции линейной алгебры. Вычислительная процедура начинается с расчёта прямых удельных затрат  $Z_{ji}$ . Затем рассчитываются полные удельные затраты  $\widehat{Z}_{ji}$  как транзитивное замыкание системы первичных удельных затрат. Для организации расчётов используется рефлексивный процесс [3].

Полные затраты  $\widehat{Z}_{ij}$  могут быть определены исходя из оценки конечного потребления, равного доле выпусков  $a_j \cdot V_j$

$$\widehat{Z}_{ij} = \widehat{z}_{ij} \cdot a_j \cdot V_j = \widehat{z}_{ij} \cdot a_j \cdot \sum_k Z_{kj}.$$

Верхняя оценка полных затрат соответствует  $a_j = 1$ , откуда

$$\widehat{Z}_{ij} \leq \widehat{z}_{ij} \cdot V_j = \widehat{z}_{ij} \cdot \sum_k Z_{kj}.$$

## 2. Процедура рефлексий для расчёта транзитивного замыкания оценок прямых затрат

Эффект взаимодействия оценивается числами, отображающими прямые затраты при воздействии факторов друг на друга. Оценки затрат представляют собой нормированные характеристики взаимодействия рассматриваемых факторов. При расчёте оценок затрат для косвенных взаимодействий, вообще говоря, следует использовать нелинейные операции, определяющие правила действий соответственно для модели проектных операций и функционирования сложной системы.

Прирост оценок, определяемый непосредственным действием действующих механизмов, будем характеризовать как результат прямых взаимодействий. Наблюдаемые результаты взаимодействий факторов (полные взаимодействия) определяются как прямыми, так и косвенными влияниями.

Любые влияния могут отличаться по степени (интенсивности) и характеру действия. Если факторы образуют цепочку влияний: 1-й влияет на 2-й, а второй влияет на 3-й, такое сочетание будем называть последовательным. Если несколько факторов непосредственно влияют на какой-то другой фактор, такое сочетание влияний будем называть параллельным. Последний определяется свойствами группового воздействия: независимым или совместным. При независимом воздействии групповой результат является суммирующей функцией результатов отдельных воздействий. При совместном воздействии его результат определяется одновременным действием компонент группы и может быть представлен как функция этих компонент, причем отсутствие любой из них приводит к отсутствию результата.

Операции над оценками (компонентами вектора оценок состояния  $\mathbf{X}$  и матрицы  $\mathbf{A}$ ) следующие: логическая сумма  $\oplus$  и логическое произведение  $\otimes$ .

Схема примитивных взаимодействий факторов представляется экспертной матрицей  $\mathbf{A}$ . Коэффициент  $a_{ij}$  этой матрицы означает оценку сверху первичного прироста фактора  $i$ , вызываемого приращением фактора  $j$  (аналог пропускной способности канала, направленного от фактора  $j$  к фактору  $i$ ). Эффект двух последовательных воздействий факторов  $i$ -го на  $j$ -й с оценкой  $a_{ji}$  и  $j$ -го на  $k$ -й с оценкой  $a_{kj}$  в цепочке 2-х взаимодействий,  $a_{ji} \otimes a_{kj}$  оценивается по той из двух исходных оценок, которая минимальна по абсолютной величине (аналог дизъюнкции, или логического произведения в булевой алгебре). Если на данный фактор  $k$  действуют факторы  $i$  и  $j$ , то их совместный эффект  $a_{ki} \oplus a_{kj}$  может определяться различными способами, в зависимости от того, являются эти факторы взаимодополняющими или взаимно компенсирующими [6].

Результат однократного воздействия факторов переводит приращение  $\Delta \mathbf{x}$  их начального вектора состояния  $\mathbf{x}$  в состояние  $\mathbf{y} \oplus \Delta \mathbf{y}$ , определяемое как действие логической векторной операции

$$\Delta \mathbf{y} = \mathbf{A} \otimes \Delta \mathbf{x}, \quad (1)$$

где знаком  $\oplus$  обозначена операция логической суммы векторов, а  $\otimes$  – векторная операция логического умножения матрицы на вектор.

Для расчёта результата транзитивного замыкания  $\Delta \mathbf{x}^t$  для исходного приращения  $\Delta \mathbf{x}^0$  используется процесс, каждая итерация которого включает преобразование (1) и операцию присвоения  $\Delta \mathbf{x} = \Delta \mathbf{y}$ . Результат  $\mathbf{B}$  транзитивного замыкания оператора  $\mathbf{A}$  может быть получен путем последовательного суммирования преобразований  $\mathbf{A}^k$ ,  $k = 1, 2, \dots$

$$\mathbf{B} = \mathbf{A} \oplus \mathbf{A}^2 \oplus \mathbf{A}^3 \oplus \dots$$

В результате расчёта транзитивного замыкания для исходной системы оценок взаимодействий с помощью дискретных преобразований можно получить дополнительную информацию об уровне рефлексии (количестве итераций), на котором получена каждая оценка.

## 3. Верификация схемы взаимодействий

Верификация модели (выбор или уточнение значений коэффициентов матрицы, проводимое с участием эксперта) проводится исходя из требования, чтобы эффект воздействия управляющих факторов на контролируемые фак-

торы в целом соответствовал зависимостям, основанным на статистических данных, а также ожиданиям эксперта. Например, чтобы управляющие воздействия давали положительный результат – приводили к повышению показателей контролируемых факторов (соответствующие коэффициенты затрат имели правдоподобное с точки зрения эксперта значение).

Процедуры верификации играют сопровождаются анализом влияния оценок примитивных связей на системные оценки. Цель такого анализа – получить качественное соответствие комплекса оценок системного взаимодействия факторов с ожидаемыми экспертом оценками влияний. Полного совпадения может не оказаться, что может свидетельствовать как о дефекте схемы, так и о недостаточной адекватности ожиданий эксперта, проявляющейся в объективной невозможности добиться требуемой конфигурации оценок системного взаимодействия.

Для реализации вычислений и анализа получаемых результатов разработан вычислительный комплекс с широким набором дополнительных функций.

Неопределенность, присущая экспертному подходу, может иметь различное происхождение. Первое – это отсутствие точных данных, которое частично компенсируется знаниями эксперта, также неточно отображающими действительность. Этот вид неопределенности учитывается на этапе верификации в диалоге с экспертом. Второе – это инструментальная погрешность при обработке экспертных данных, возникающая как результат неадекватности гипотез, лежащих в основе операций над экспертными данными. Оценить инструментальную погрешность можно по разбросу результатов, полученных процедурами, использующими разные гипотезы.

Полезную информацию о результатах оценивания дает также анализ итерационного процесса рефлексий: скорость сходимости, оцениваемая количеством шагов рефлексии, на котором стабилизировалось значение показателя влияния (чем меньше шагов, тем достовернее оценка); колебательный характер графика показателя в процессе итераций, говорящий о конфликтной ситуации при формировании оценки. Кроме того, шаги рефлексии можно интерпретировать как шаги по времени и таким образом прогнозировать процесс развития ситуации.

При выполнении алгоритмов с рассмотренными наборами операций над оценками взаимодействия исходный набор оценок может распространиться на взаимодействия всех пар факторов. Кроме того, может произойти замена части исходных показателей на значения, большие по абсолютной величине. Анализируя результат алгоритма, можно определить противоречивость исходных оценок. Исходная оценка является противоречивой (избыточной), если в результате рефлексий она замещается другой оценкой.

В результате расчёта транзитивного замыкания для исходной системы оценок взаимодействий с помощью дискретных преобразований можно получить дополнительную информацию об уровне рефлексии (количестве итераций), на котором получена каждая оценка. Чем больше уровень рефлексии для полученной оценки, тем длиннее временной диапазон, соответствующий данной оценке и меньше степень ее достоверности.

Варьируя исходные оценки, можно определить степень их участия в формировании полной картины влияний факторов.

Процедуры верификации играют существенную роль при назначении оценок влияния. Они сопровождаются анализом влияния оценок примитивных связей на системные оценки. Цель такого анализа – получить качественное соответствие комплекса оценок системного взаимодействия факторов с ожидаемыми экспертом оценками влияний. Полного совпадения может не оказаться, что может свидетельствовать как о дефекте схемы, так и о недостаточной адекватности ожиданий эксперта, проявляющейся в объективной невозможности добиться требуемой конфигурации оценок системного взаимодействия.

Верификация модели (выбор или уточнение значений коэффициентов матрицы, проводимое с участием эксперта) проводится исходя из требования, чтобы эффект воздействия факторов на контролируемые факторы в целом соответствовал зависимостям, основанным на статистических данных, а также ожиданиям эксперта. Например, чтобы управляющие воздействия давали положительный результат – приводили к повышению показателей контролируемых факторов (соответствующие коэффициенты влияния имели нужный значение или знак).

Для верификации модели могут использоваться следующие процедуры.

- Анализ чувствительности оценки конкретной системной связи к задаваемым вариациям оценок примитивных связей.
- Поиск связей, зависящих от конкретной примитивной связи для заданного числа рефлексий
- Поиск примитивных связей, влияющих на данную системную связь за заданное число рефлексий
- Трассировка активных связей, реализующих полученную в расчёте оценку влияния одного заданного фактора на другой.

Верификацию можно рассматривать как решение обратной задачи, когда по оценкам наблюдаемых зависимостей восстанавливаются оценки примитивных зависимостей, которые затем могут использоваться для расчёта изменения равновесных оценок состояния системы в ответ на управляющие воздействия.

## Заключение

Предложенный метод моделирования, использующий экспертно-рефлексивный подход, позволяет принимать рациональные управленческие решения с учетом системного эффекта от взаимодействия большого количества факторов, отследить который в ручном режиме не представляется возможным. Эти решения могут носить как оперативный, так и стратегический характер. В последнем случае для поиска решения можно использовать оптимизационную задачу с естественными ограничениями нормативного характера и с целевой функцией, коррелирующей со стратегической целью проекта и управления процессом его реализации.

## Литература

1. Исаева Н.А. Обеспечение надежного выполнения сложных наборов задач в управляющих параллельных вычислительных системах реального времени / Труды 23-й Международной конференции "Проблемы управления безопасностью сложных систем" (Москва, 2015). М.: РГГУ, 2015. С. 448-451.
2. Гусев В.Б., Исаева Н.А. Рефлексивные процедуры анализа экспертных данных // Информационные технологии и вычислительные системы. 2016. № 2. С. 31-35.
3. Саати Томас Л. Принятие решений при зависимостях и обратных связях: Аналитические сети. Пер. с англ./Науч. ред. А.В. Андрейчиков, О.Н. Андрейчикова. Изд. 2-е. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009 – 360 с.