Институт проблем управления
им. В.А. Трапезникова

Е.В. Колосова, Д.А. Новиков, А.В. Цветков

МЕТОДИКА ОСВОЕННОГО ОБЪЕМА В ОПЕРАТИВНОМ УПРАВЛЕНИИ ПРОЕКТАМИ

Москва - 2000

УДК 336
ББК 65.050.9(2)
К 61

Колосова Е.В., Новиков Д.А., Цветков А.В.
К 61 Методика освоенного объема в оперативном управлении проектами. М.: ООО «НИЦ «Апостроф», 2000. – 156 с.

ISBN 5-94155-007-3

Настоящая работа содержит описание методики освоенного объема – совокупности методов управления проектами, использующих показатели освоенного объема, и механизмов принятия оперативных управленческих решений. Значительное внимание уделяется изучению практически важных случаев использования методики освоенного объема в рамках существующих программных средств по управлению проектами.

Работа рассчитана как на специалистов-теоретиков по управлению сложными системами, так и на руководителей проектов.

Рецезент: д.т.н., проф. А.Д. Цвиркун

УДК 336
ББК 65.050.9(2)
К 61

ISBN 5-94155-007-3

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ

В настоящей работе принято иерархическое описание организационной структуры проекта, основным (базовым) элементом которой являются два участника проекта – управляющий орган (центр в терминологии теории активных систем (АС) [22, 78], руководитель проекта или проект-менеджер в терминологии управления проектами [36, 58, 93, 94]) и управляемый субъект (активный элемент (АЭ) или элемент в терминологии теории активных систем, исполнитель или агент в терминах управления проектами). При этом управляющий орган осуществляет функции планирования, контроля и оперативного управления, а деятельность управляемого субъекта заключается в осуществлении набора действий (выполнении работ), направленных на реализацию проекта. Деятельность управляемого субъекта описывается показателями реализации проекта – объем работ, ресурсы и затраты, зависящими от времени и однозначно характеризующими в каждый момент времени состояние проекта.

Различия между плановыми и текущими показателями реализации проекта[1] являются важнейшими характеристиками, на основании которых принимаются решения по оперативному управлению.

Традиционно основным показателем динамики затрат[2] считалась и считается зависящая от времени[3] разность $D_0(t) = c_0(t) - c(t)$

---

[1] *В настоящем обзоре теоретических и практических результатов исследования и внедрения методики освоенного объема мы, следуя используемому зарубежными авторами описанию проекта, будем считать, что реализация проекта однозначно задается показателями затрат (исключение – [106], в работах отечественных авторов прикладная методика освоенного объема практически не рассматривалась, исключение составляют работы, содержащие методологические основы теории стратегического и оперативного планирования и управления – [3, 5, 10, 11, 31, 65-68, 72, 84, 87-89, 91, 92, 100, 101, 146, 150]).*

[2] *Обзор методов управления проектами (в том числе – управления затратами на проект, то есть раздела, к которому традиционно относят методику освоенного объема) можно найти в [36, 93, 94, 109 и др.].*

[3] *Если не оговорено особо, то будем считать, что проект начинается в момент $t = 0$.*

между плановыми затратами[1] (Budgeted Cost of Work Scheduled - BCWS) $c_0(t)$ (объемом средств, которые планировалось потратить к моменту времени t) и фактическими затратами $c(t)$ (Actual Cost of Work Performed - ACWP) - фактическим объемом потраченных средств) [1, 26, 55, 102, 122]. Положительность величины $D_0(t)$ означает, во-первых, что фактические затраты отстают от плановых, что может быть вызвано внешними (с точки зрения рассматриваемого проекта) причинами, например, задержками в финансировании и т.д., то есть нехваткой средств; а, во-вторых, что имеет место задержка в выполнении работ, что в конечном счете может привести к задержке завершения проекта в целом.

Однако, величины $D_0(t)$ оказывается недостаточно для вынесения обоснованных суждений[2], например, о возможных сроках завершения проекта, так как реальное состояние проекта характеризуется не только фактическими затратами (ACWP), но и освоенными затратами (Budgeted Cost of Work Performed - BCWP) $c_e(t)$, называемые иногда в литературе освоенным объемом (Earned Value - EV), которые могут по тем или иным внутренним (с точки зрения рассматриваемого проекта) причинам оказаться отличными от фактических затрат. Величина $D(t) = c_0(t) - c_e(t)$ при этом будет характеризовать отставание от плана, а величина $D_e(t) = c(t) - c_e(t)$ – перерасход средств.

Впервые «трехмерная» характеристика работ: «что планировалось затратить – что затрачено – что сделано» начала применяться на производстве инженерами в конце 19-го века [156]. В конце 50-х годов появились сетевые модели (в том числе, в 1958 г. PERT – Program Evaluation Review Technique), основывающиеся на методе критического пути и позволяющие определять оптимальную с точки зрения времени завершения проекта последовательность выполнения составляющих его операций и основывающиеся на методе критического пути. В 1962 году появилась методика PERT/Cost, учитывающая не только временные, но и затратные характеристики, поэтому можно условно датировать появление

---

[1] *Здесь и далее по тексту под затратами понимаются суммарные (кумулятивные) затраты.*

[2] *Подробное сравнение методики освоенного объема с традиционными методами управления затратами приводится в [122, 157-161].*

методики освоенного объема именно 1962 годом. В системе стандартов Министерства Обороны США C/SCSC (Cost/Schedule Control Systems Criteria – затратно-временные системные критерии управления), внедренной в 1967 г., использование методики освоенного объема является обязательным требованием для проектов, выполняемых по заказу Министерства Обороны [112-114, 122]. В 1986 году число критериев было сокращено, тем не менее они используются в основном в государственных контрактах: громоздкость описания, сложность применения и т.д. (см. критику в [121]) приводят к тому, что 99% коммерческих проектов не используют C/SCSC. Более широкое распространение, в том числе и в коммерческих проектах, получила упрощенная методика освоенного объема, описываемая ниже.

Изложение материала настоящего «обзора»[1] имеет следующую структуру. Сначала рассматриваются агрегированные показатели выполнения проекта (основные показатели освоенного объема). Затем приводится «алгоритм», отражающий последовательность действий при использовании методики освоенного объема, обсуждаются известные методы агрегирования показателей реализации операций и, наконец, описываются методы прогнозирования результатов реализации проекта с использованием наблюдаемых показателей освоенного объема.

Показатели освоенного объема [108, 122-130, 137, 139, 140, 153]**.**

Рассмотрим элементарный проект, то есть проект, состоящий из одной операции[2]. Эскиз графика динамики затрат приведен на

---

[1] *На сегодняшний день опубликовано несколько сот научных работ (исключая отчеты по реализации конкретных проектов и описаний частных случаев (case-studies)), посвященных методике освоенного объема. Большую их часть (около двухсот) составляют статьи в международном журнале управления проектами (International Journal of Project Management) и материалах (PM Network) Международного Института Управления Проектами (IPM Institute). В последнее время наблюдается значительный рост числа публикаций по освоенному объему. Так, например, в международном журнале управления проектами до 1993 года вышло всего восемь статей по этой тематике [112].*

[2] *Естественно, такие проекты не встречаются на практике, однако подобное упрощенное модельное представление удобно использовать для агрегированного описания сложного проекта.*

рисунке 1 (S-образный вид кривой обусловлен различными темпами работ в начале, середине и окончании проекта [58, 69, 90, 93-95]).

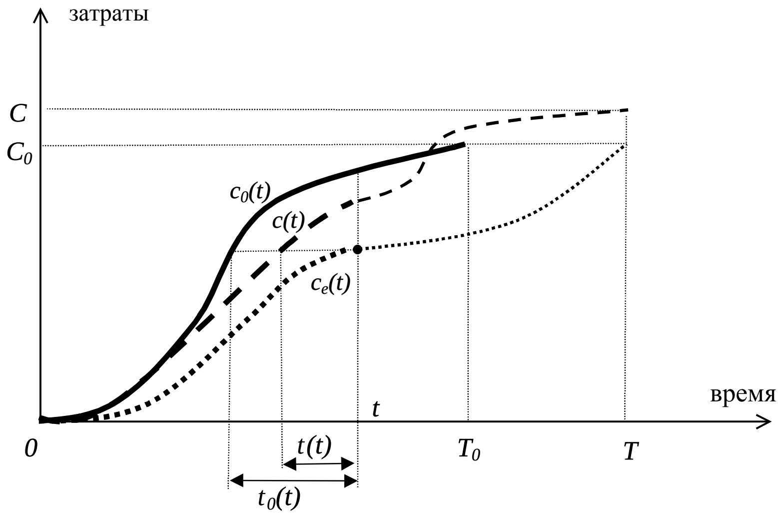


Рис. 1. Плановые, фактические и освоенные затраты на проект

Перечислим основные переменные, по которым описывается каждая операция и проект в целом («основные показатели освоенного объема[1]») (см. рис.1):

C_0 – планируемые суммарные затраты на проект (BAC – Budget At Completion или BC – Budget Cost);

T_0 – планируемый срок завершения проекта;

$c_0(t)$ – планируемая динамика затрат (BCWS – Budgeted Cost of Work Scheduled) – директивный график;

$c(t)$ – фактическая динамика затрат (ACWP – Actual Cost of Work Performed);

$c_e(t)$ – динамика освоенных затрат (BCWP – Budgeted Cost of Work Performed или EV – Earned Value);

T – фактический срок окончания проекта;

[1] *Альтернативная система показателей (не получившая в дальнейшем распространения) предлагалась в [120].*

C – фактические суммарные затраты на проект (EAC – Estimate At Completion).

<u>Производные показатели освоенного объема:</u>

$D_0(t) = c_0(t) - c(t)$ - разность между плановыми и фактическими затратами;

$D(t) = c_0(t) - c_e(t)$ - разность между плановыми и освоенными затратами;

$D_e(t) = c(t) - c_e(t) \geq 0$ – разность между фактическими и освоенными затратами (Cost Overrun – «перерасход» средств);

$a(t) = c_e(t) / c_0(t)$ – показатель освоенного объема (SPI – Schedule Performance Index);

$b(t) = c_e(t) / c(t)$ – показатель динамики (освоения) затрат (CPI – Cost Performance Index).

Итак, мы перечислили показатели, описывающие проект, состоящий из одной операции. Если проект состоит из нескольких операций, то возникает вопрос о том, как агрегировать показатели подпроектов, операций и т.д. Важную роль при этом играет структура декомпозиции работ (WBS – Work Breakdown Structure – дерево работ, в котором проект последовательно разбивается на более мелкие составляющие) и план контроля затрат (CAP – Cost Account Plan) – совокупность процедур определения стоимостей элементов структуры декомпозиции работ и правил их агрегирования) [122, 123].

Алгоритм, отражающий последовательность действий при применении методики освоенного объема (см. также раздел «Прикладная методика освоенного объема») заключается в следующем[1] (пункты 1-5 соответствуют фазе планирования (до начала реализации проекта), пункты 6-10 – фазе контроля и оперативного управления) [122]:

1. Определение объема работ (при использовании показателей освоенного объема определение того, что понимается под 100% работ, играет ключевую роль). На этом этапе необходима детализация структуры декомпозиции работ.

2. Создание иерархической структуры проекта (в том числе – выделение на нижнем уровне измеримых с точки зрения затрат,

---

[1] *Полностью общие требования системы стандартов C/SCSC приведены в [122].*

степени выполнения, сроков и т.д. ячеек – начальный этап разработки плана контроля затрат).

3. Планирование на уровне отдельных ячеек в рамках САР.

4. Распределение ответственности по контролю за реализацией САР.

5. Разработка директивного графика (процедуры агрегирования САР отдельных детальных ячеек нижнего уровня структуры декомпозиции работ в САР всего проекта).

6. Оценка фактического хода реализации проекта в сравнении с директивным графиком (измерение показателей $D(t)$ и $a(t)$).

7. Оценка эффективности затрат (измерение показателей $D_e(t)$ и $b(t)$).

8. Прогнозирование суммарных фактических затрат на проект на основании наблюдаемого хода его реализации.

9. Управление незавершенными работами.

10. Управление изменениями директивного графика выполнения проекта.

Видно, что с точки зрения оперативного управления ключевую роль играют этапы 8–10: на основании наблюдаемых значений основных показателей освоенного объема прогнозируются результаты реализации проекта и принимаются решения по оперативному управлению - корректировке директивного графика, внесение изменений в запланированные параметры еще невыполненных работ и т.д.

Основные проблемы при применении приведенного алгоритма заключаются в определении процедур агрегирования (методов измерения освоенного объема) и прогнозирования. Поэтому остановимся на этих вопросах более подробно.

Методы измерения освоенного объема.

На сегодняшний день наибольшее распространение получили следующие методы измерения освоенного объема [122]:

1. Метод взвешенных характерных точек (weighted milestones) заключается в перечислении для каждой операции (пакета работ и т.д.) характерных точек – нормативных значений показателей результатов деятельности, достижение которых означает завершение определенного этапа. При этом освоенный объем измеряется как взвешенное значение достигнутых нормативных показателей [132]. Данный метод хорошо адаптирован для измерения результа-

тов деятельности, но характерные точки трудно использовать для планирования и управления.

2. Метод фиксированной формулы для отдельной операции заключается в приписывании каждой операции фиксированного отношения *x% / y%* (например, *0/100, 25/75, 50/50* и т.д.), в соответствии с которым считается, что начало данной операции соответствует *x%*, а завершение – *y%* "освоения".

3. Метод процента выполнения (Percent Completed). Этот метод с одной стороны является одним из наиболее простых – для каждой операции используется оценка процента завершения, совокупность которых агрегируется по заранее установленной методике. С другой стороны, недостаток данного метода заключается, в том числе, в наличии так называемого «синдрома 90%» [117, 118] – исполнители сообщают, что операция (этап и т.д.) «почти» завершена, в то время как до фактического завершения может быть еще очень далеко (как в смысле времени, так и в смысле требуемых ресурсов). Поэтому рекомендуется априори устанавливать 80 – 90% границу для незавершенного проекта или операции [118].

4. Комбинация методов характерных точек и процента выполнения – характерные точки устанавливают нормативные значения, снижая возможность искажения информации.

Более сложные методы рассмотрены в [142], где предложено вычислять взвешенный показатель выполнения $x(t)$ следующим образом:

$$x(t) = p_1\, m(t) + p_2\, a(t) + p_3\, b(t),$$

где p_1, p_2, p_3 – положительные веса, сумма которых равна единице, $m(t)$ – показатель выполнения контрольных точек (Milestones Performance Index), вычисляемый как отношение «пройденных» контрольных точек к их суммарному числу. В [122] предлагается также использовать показатель $x(t)$ для определения размеров поощрений исполнителей.

5. Метод эквивалентных единиц (Equivalent Completed Units) заключается в введении единой системы отсчета (единиц измерения работ). Преимущество данного метода заключается в том, что в ряде случаев удается добиться аддитивности оценок отдельных операций [132]. Метод процента завершения может рассматриваться как разновидность метода эквивалентных единиц (когда едини-

цей измерения является в общем случае неаддитивный процент завершения).

6. Метод стандартов (Earned Standards) заключается в установлении для каждой операции детальных стандартов (гораздо более подробных, чем в методе характерных точек) результатов деятельности, достижение которых означает определенное значение освоенного объема. Данный метод позволяет очень «точно» измерять значение освоенного объем, однако его использование требует большой подготовительной работы, а также регулярного и трудоемкого мониторинга (сбора и обработки значительного количества информации) реализации проекта.

На практике, естественно, зачастую используется комбинация перечисленных методов, выбираемая с учетом опыта руководителей проекта, специфики проекта и т.д. В прикладных программах по управлению проектами (например, Primavera Project Planner for Enterprise (P3e) [147]) агрегирование осуществляется в том числе по: времени начала и завершения работ, требуемым ресурсам и т.д. При этом затраты и количества суммируются, а времена (даты) вычисляются как минимум/максимум сроков (ранних или поздних) и т.д. в зависимости от установок пользователя.

Прогнозирование результатов выполнения проекта.

Общепризнанно, что основным свойством методики освоенного объема является возможность: «раннего обнаружения» (обнаружения на ранних стадиях реализации проекта) несоответствия фактических показателей проекта плановым значениям, прогнозирования на их основании результатов выполнения проекта (сроков, затрат и т.д.) и принятия своевременных корректирующих воздействий, вплоть до прекращения проекта (примером может служить крупный военный проект [112-114], который был свернут на основании прогноза перерасхода средств, несмотря на то, что освоенный объем уже составлял несколько сотен миллионов долларов).

Для прогнозирования результатов выполнения проекта в работах [106, 109, 111, 122, 145, 152] предлагается использовать следующие оценки.

Основным показателем, оцениваемым в ходе реализации проекта, является величина C фактических суммарных затрат на проект. Так как показатель $b(t)$ характеризует эффективность использования средств, то в момент времени t величина C может быть оценена как сумма уже потраченных средств и средств, необходимых для завершения проекта. Последняя величина определяется как отношение разности между плановым значением суммарных затрат и освоенным объемом затрат к эффективности использования средств, то есть[1]:

(1) $C(t) = c(t) + (C_0 - c_e(t)) / b(t)$.

Альтернативой является использование «пессимистической» оценки суммарных затрат на проект, в которой эффективностью использования средств считается произведение $a(t)\ b(t)$:

(2) $C(t) = c(t) + (C_0 - c_e(t)) / a(t)\ b(t)$.

Понятно, что если существует момент времени t_0 такой, что при t ³ t_0 величина $b(t)$ (и $a(t)$) остается постоянной, то есть $b(t) = b_0$, t ³ t_0, то (1) – точная оценка. Большинство известных (исключения - [113, 131]) на сегодняшний день результатов использования методики освоенного объема существенно использует предположение о «стабилизации» показателей $a(t)$ и $b(t)$ в ходе реализации проекта (см. рисунок 2).

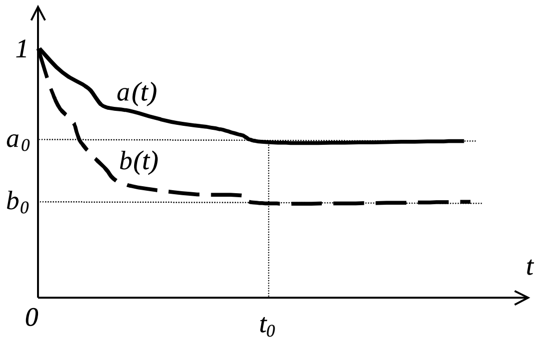


Рис. 2. Стабилизация коэффициентов $a(t)$ *и* $b(t)$

Более того, в [103] утверждается (правда, без должного обоснования), что «на основании более 500 контрактов Министерства Обороны США можно сделать вывод, что суммарный перерасход средств будет не менее перерасхода на момент 15%-го завершения

[1] *В настоящей работе используется независимая нумерация формул внутри каждого параграфа.*

контракта». В [122] приводится мнение, что характеристики $a(t)$ и $b(t)$, наблюдаемые на момент 10-20% завершения контракта, далее остаются стабильными.

Детальное исследование статистических свойств коэффициентов $a(t)$ и $b(t)$ проведено в работе [113], в которой на основании анализа хода выполнения 64 завершенных крупных военных (научно-производственных) проектов с 95% доверительным интервалом показано, что: а) среднее значение суммарного перерасхода средств (и в долларах, и в процентах) превышает текущее значение перерасхода средств; б) перерасход средств (и в долларах, и в процентах) растет с ростом процента завершения проекта. Для обоснования последнего утверждения вычислялась регрессия перерасхода средств $D_e(t)/c(t)$ по проценту завершения проекта. Скорость роста перерасхода составляла от 0.1 до 0.4 в зависимости от типа проекта.

К сожалению, как исследования, так и статистические данные, по проектам, реализуемым в России, на сегодняшний день отсутствуют. Проведение элементарного статистического анализа (в рамках основных и производных показателей освоенного объема) процесса их выполнения позволило бы не только обосновать или опровергнуть возможность использования простых прогнозных оценок типа (1), но и выявить качественную специфику управления проектами в существующих в России социально-экономических условиях.

Тем не менее, в прикладных компьютерных программах по управлению проектами используются оценки типа (1) и (2). Более конкретно, например, в P3e пользователю предлагается оценивать средства, необходимые для завершения проекта, либо как разность между суммарными плановыми затратами и текущими затратами (традиционных подход к анализу затрат), либо (в рамках методики освоенного объема) по следующей формуле (см. также раздел «Прикладная методика освоенного объема»): $g\ (C_0 - c_e(t))$, где множитель g принимает одно из трех значений: 1) единица; 2) любое постоянное значение, задаваемое пользователем; 3) $1/b(t)$ или $1/a(t)b(t)$.

Помимо оценки суммарных затрат на выполнение проекта, на основании наблюдаемых показателей освоенного объема возможно также прогнозирование и других характеристик проекта.

Например, может быть оценен показатель $r(t)$ (TCPI – To-Complete Performance Index), характеризуемый отношение оставшегося объема работ (выраженного в финансовых показателях) к имеющимся или требуемым средствам:

(3) $r(t) = (C_0 – c_e(t)) / G(t) \geq 1$,

где знаменатель $G(t)$ может выбираться равным суммарным плановым затратам на проект C_0, оценке $C(t)$ суммарных затрат на проект, вычисляемой по выражениям (1) или (2), разности между суммарными плановыми затратами и текущими затратами и т.д. Содержательно показатель $r(t)$ характеризует как должны использоваться средства (какова должна быть эффективность использования средств начиная с текущего момента, для которого вычисляется оценка, до конца реализации проекта), чтобы проект был завершен в соответствии с запланированными показателями.

Для прогнозирования результатов выполнения проекта на основании текущих наблюдений хода его реализации, помимо простых эвристик типа (1) и (2), соответствующих «линейному тренду»[1] (см. ниже более подробно), применялись и более сложные подходы, начиная от методов статистического анализа и заканчивая когнитивными моделями. Проведем их обзор.

В [151] описываются следующие методы прогнозирования (мы их перечислим в порядке усложнения и включения предыдущих случаев как частные):

1. В рамках простейшей методики оценки затрат (без учета освоенного объема):

(4) $C(t) = c(t) / l(t)$,

где $l(t)$ – процент завершения.

2. Усреднение и регрессия (с учетом всей истории наблюдений) показателей типа (1), (2) и (4).

3. Статистический анализ рядов показателей типа (1) и (2) с вычислением дисперсии, доверительных интервалов и т.д. (см. также [149]).

4. Статистический анализ рядов показателей типа (1) и (2) с вычислением трендов [115], скользящих средних для $C(t)$, учет

---

[1] *Для многих работ по методике освоенного объема характерно предположение о линейности планов (исключение - [131]), и для всех работ – предположение о постоянных интенсивностях выполнения работ (см. [106, 131], а также более подробно ниже).*

различных наблюдений с различными весами (присваемыми менеджером проекта или исследователем операций субъективно).

Необходимо подчеркнуть, что на сегодняшний день наибольший (и в своем роде единственный) опыт стандартизации и использования методики освоенного объема накоплен в Министерстве Обороны США. В стандарты C/SCSC и компьютерные программы встроены различные методики оперативного оценивания, например, суммарных затрат на проект. Эти (в основном (1), (2) и некоторые статистические) методы идентифицируются и тестируются на реальных проектах, что позволяет сравнивать их эффективность [114]. Институт PMI ежегодно публикует обзоры программного обеспечения, в том числе – использующего методику освоенного объема [148].

В [154, 155] предлагается использовать следующую прогнозную модель:

(5) $J = p_1 X_1 + p_2 X_2 + \ldots + p_m X_m + Const + e$,

где J – прогнозируемая (оцениваемая величина, например, фактические суммарные затраты на проект), X_i, $i = 1, 2, \ldots, m$ – факторы, p_i – их веса, m - число факторов, e - ошибка. На основании опроса экспертов выявляются факторы (например, процент завершения проекта, политическая ситуация и др. [154, 155]), далее путем статистического моделирования производится идентификация модели (генерируются значения факторов, для которых эксперты оценивают величину J), то есть вычисляются веса.

В целом, завершая обзор методов, используемых в рамках методики освоенного объема, следует констатировать, что авторами предлагались частные модели, совокупность которых далеко не полна и в значительной степени несистематизирована. Это тем более странно, что в теории принятия решений и прогнозировании (см. [2, 7, 47, 51, 70, 80 и др.]) накоплен значительный опыт анализа и синтеза алгоритмов идентификации, прогнозирования и т.д. (в том числе с учетом адаптации и обучения [97-99] в рамках современных информационных систем [30, 49 и др.]) в самых разных областях. Поэтому, наверное, можно считать, что использование этих подходов применительно к методике освоенного объема является перспективной задачей инженерных исследований и разработок.

Наиболее распространенными причинами несовпадения фактических затрат и освоенных затрат (наличия перерасхода средств) являются ошибки планирования и невыполнение требований качества выполняемых работ, то есть необходимость проведения дополнительных работ (rework) для достижения требуемого уровня качества, что требует дополнительных затрат. В работе [117, 118] приводится статистика дополнительных работ для различных типов проектов и областей, в которых они выполняются (военные проекты, строительные, проекты по созданию программного обеспечения и др.). Там же подчеркивается возможность несовпадения сообщаемых исполнителями параметров проекта с фактическими (в том числе – упомянутый выше «синдром 90%»). Например, если из-за необходимости проведения дополнительных работ значение освоенных затрат, которые известны исполнителю, но неизвестны достоверно менеджеру проекта, осуществляющему контроль и оперативное планирование, в момент времени t оказалось равным $c_e(t)$, то исполнитель может сообщить, что значение освоенных затрат равно $s(t)$, то есть $s(t) \in [c_e(t); c(t)]$ и возможно, что $s(t) \neq c_e(t)$ (см. рисунок 3).

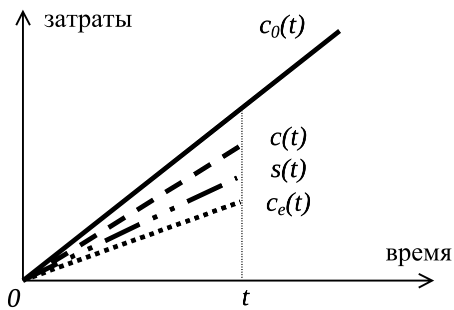


Рис.3. Несовпадение сообщения исполнителя о значении освоенных затрат с фактическим значением

В работе [117, 118] подчеркивается возможность несовпадения сообщаемого значения освоенных затрат (или сообщаемого значения освоенного объема) с фактическими, однако не рассматриваются механизмы принятия решений, позволяющие учитывать подобные искажения.

Таким образом, анализ результатов теоретического исследования и практического применения методики освоенного объема позволяет констатировать, что использование показателей освоенного объема является распространенным и эффективным методом оперативного управления проектами. Тем не менее, существующие модели не учитывают или не полностью учитывают следующие факторы.

Во-первых, все показатели проекта описываются в терминах затрат. При этом не учитывается «физический» (измеряемый в физических величинах, то есть отличных от финансовых) объем работ, который может быть связан с затратами достаточно сложным образом и является, наряду с затратами, одним из важнейших показателей реализации проекта и основным критерием его завершения. Такое положение дел вполне естественно для стабильных социально-экономических условий. В современной российской действительности измерение всех характеристик проекта в финансовых показателях зачастую просто невозможно.

Во-вторых, отсутствуют относительно универсальные методы агрегирования временных, финансовых и «физических» показателей выполнения операций, учитывающие технологическую и другие виды взаимосвязи между этими показателями.

В-третьих, методика освоенного объема опирается на использование такой (не всегда достоверно известной руководителю проекта) величины как освоенный объем (или процент выполнения работ, на основе которого рассчитывается освоенный объем). При этом отсутствуют механизмы принятия решений, учитывающие свойство активности участников проекта, то есть - возможность самостоятельного выбора действий, искажения информации о параметрах проекта при ее сообщении от более информированных участников менее информированным и т.д.

Наличие перечисленных нерешенных проблем позволяет сформулировать задачи настоящей работы:

1. Описание формальной модели проекта, включающей его описание в терминах показателей освоенного объема, и решение в рамках этой модели задач планирования, прогнозирования результатов выполнения проекта и синтеза оптимальных управляющих

воздействий с учетом агрегирования показателей освоенного объема и активности поведения участников проекта.

2. Описание оптимальных механизмов оперативного управления проектами, описываемых показателями освоенного объема, в том числе механизмов: планирования и стимулирования, учитывающих активность поведения участников проекта и возможную неопределенность относительно условий его выполнения.

3. Описание прикладной методики освоенного объема.

Выделенная на основании проведенного обзора моделей и методов управления проектами с помощью методики освоенного объема совокупность задач определила следующую структуру изложения материала настоящей работы.

Первая глава посвящена описанию методики освоенного объема в оперативном управлении проектами (отдельными проектами или их совокупностью) в условиях полной информированности.

В разделе 1.1 перечисляется максимальная («расширенная») система показателей освоенного объема и обсуждаются проблемы их использования при управлении проектами в рамках двух ключевых предположений. Первое предположение – рассматривается агрегированное описание проекта, без выделения составляющих его частей – фаз, этапов, работ, операций и т.д. Второе предположение – на момент принятия решений имеется достоверная и полная информация о тех параметрах, которые не отнесены в рассматриваемой модели к неопределенным, то есть имеется пассивная модель проекта. Кроме того предполагается, что участники проекта пассивны, то есть не обладают собственными интересами, способностью к искажению информации и т.д.

В разделе 1.2 вводится минимальная система показателей освоенного объема, в терминах которых формулируется задача оперативного управления, для которой показывается, что в ней могут быть выделены три составляющие – задача идентификации проекта, задача прогнозирования результатов реализации проекта и собственно задача управления, причем для первых двух задач обосновывается, что они могут быть сведены к известным оптимизационным задачам.

В разделе 1.3 доказывается, что в условиях полной информированности задача управления проектом включает задачи планирования и задачи оперативного управления, причем, обосновывается, что оба эти класса задач эквивалентны и могут быть сведены к каноническим задачам оптимального управления.

В разделе 1.4 производится отказ от агрегированного описания проекта, то есть методика освоенного объема обобщается на случай группы проектов, и рассматриваются проблемы агрегирования показателей освоенного объема при представлении проекта в виде комплекса взаимосвязанных операций.

Во **второй главе** производится отказ от предположения о пассивности участников проекта, то есть рассматривается комплекс механизмов оперативного управления, учитывающих активность участников проекта. В состав этого комплекса входят: механизмы активной экспертизы (раздел 2.1), направленные на получение информации о внутренних и внешних условиях реализации проекта, прогнозов результатов его выполнения и т.д.; механизмы стимулирования (раздел 2.2), побуждающие исполнителей проекта сокращать его продолжительность, в том числе – в условиях неопределенности; и механизмы планирования (раздел 2.3), побуждающие исполнителей сообщать руководителю проекта достоверную информацию о своих параметрах, отражающих их возможности по сокращению продолжительности проекта.

В **третьей главе** обсуждаются возможности и результаты практического использования методики освоенного объема в оперативном управлении проектами. В том числе, приводится алгоритмическая реализация методики освоенного объема, ориентированная на применение современных программных средств по управлению проектами.

Глава 1. Показатели освоенного объема в оперативном управлении проектами

1.1. Модель проекта и показатели освоенного объема

Рассмотрим агрегированное описание проекта в виде одной операции. Следуя методологии освоенного объема (см. обзор во введении) необходимо учитывать плановые показатели, фактические показатели и показатели освоенного объема. Выше подчеркивалось, что, помимо финансовых показателей (см. приведенное во введении описание методики освоенного объема в терминах затрат), необходимо учитывать показатели, отражающие результаты выполнения работ и выражаемые в «физических» единицах (например - штуки, метры, этажи, часы и т.д.), для которых возможно измерить как количественную характеристику, так и характеристики качества. Поэтому, наряду с тремя финансовыми показателями, введем три показателя «физического» объема[1] – далее просто «объема» - (плановый, фактический и освоенный) и перечислим производные показатели, которые могут быть построены на основании шести основных показателей (избыточность этой системы показателей обсуждается ниже).

Сделав маленькое отступление, отметим, что более корректно было бы описывать проект восьмью показателями: три показателя затрат (план – факт – освоенные), три показателя ресурсов (план – факт – освоенные), используемых при выполнении проекта, и два показателя объема (план – освоенный). Например, если проект заключается в рытье траншеи, то объемом будет протяженность траншеи или объем грунта и т.д., а ресурсами – рабочие, экскаваторы, лопаты и т.д. С точки зрения причинно-следственных связей первичны ресурсы, а затраты и объем являются вторичными показателями (иногда, и в основном – финансовые показатели, могут быть пересчитаны через ресурсы). Однако использование восьми показателей усложняет описание проекта, тем более, что во многих случаях эти показатели взаимосвязаны. Поэтому введем **предположение** о взаимно-однозначном соответствии между затратами и

---

[1] *Здесь и далее по тексту под объемом понимается суммарный (кумулятивный) объем.*

ресурсами, исключив из рассмотрения ресурсы, то есть сократив число показателей с восьми до шести[1].

Итак, каждая операция и проект в целом описываются следующими переменными («основные показатели освоенного объема»)[2] (см. рисунки 4 и 5):

C_0 – планируемые суммарные затраты на проект (BAC – Budget At Completion или BC – Budget Cost);

T_0 – планируемый срок завершения проекта;

X_0 – суммарный объем работ по проекту (QAC – Quantity At Completion);

$c_0(t)$ – планируемая динамика затрат (BCWS – Budgeted Cost of Work Scheduled);

$c(t)$ – фактическая динамика затрат (ACWP – Actual Cost of Work Performed);

$c_e(t)$ – динамика освоенных затрат (BCWP – Budgeted Cost of Work Performed);

$x_0(t)$ – планируемая динамика объемов работ (BQWS – Budgeted Quantity of Work Scheduled);

$x(t)$ – фактическая динамика объема (AQWP – Actual Quantity of Work Performed);

$x_e(t)$ – освоенный объем (BQWP – Budgeted Quantity of Work Performed):

T – фактический срок окончания проекта;

C – фактические суммарные затраты на проект (EAC – Estimate At Completion).

---

[1] *Традиционно в работах зарубежных авторов под «объемом» (quantity) подразумеваются ресурсы, в работах отечественных авторов – «физический» объем. Мы будем следовать сложившейся (российской!) традиции, считая, что при заданных затратах однозначно определяются ресурсы, которые могут быть использованы (ограничения на ресурсы легко переносятся на затраты). Кроме того, пока (в настоящем разделе) мы вынуждены сохранить такой трудноинтерпретируемый показатель как фактический объем. Несколько забегая вперед, можно сказать (см. следующий раздел), что фактический объем и освоенные затраты могут быть без потери общности исключены из списка показателей, по которым описывается проект.*

[2] *В скобках приводятся английские термины в соответствии со стандартами [122, 147].*

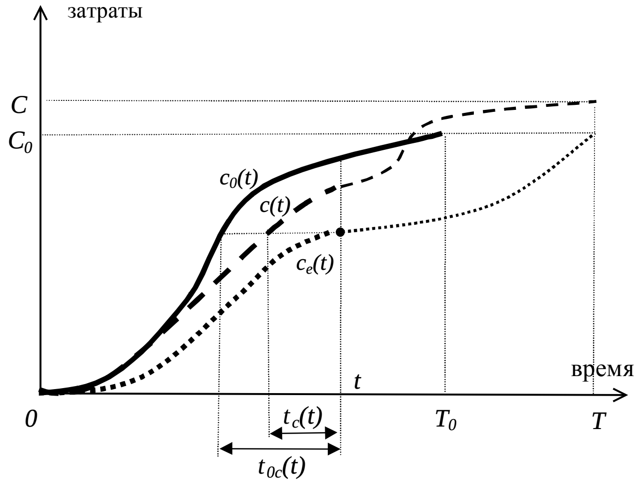


Рис. 4. Показатели динамики затрат

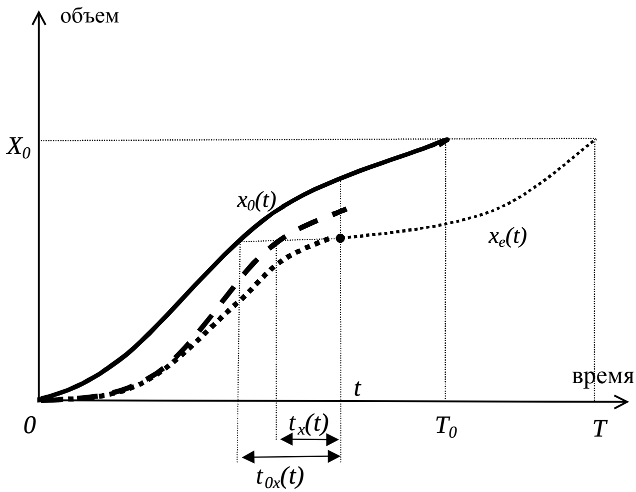


Рис. 5. Показатели динамики объема

Производные показатели освоенного объема:

$Dc_0(t) = c_0(t) - c(t)$ - разность между плановыми и фактическими затратами;

$Dc(t) = c_0(t) - c_e(t)$ - разность между плановыми и освоенными затратами;

$Dc_e(t) = c(t) - c_e(t)$ ³ 0 – разность между фактическими и освоенными затратами (Cost Overrun – «перерасход» средств);

$Dx_0(t) = x_0(t) - x(t)$ - разность между плановым и фактическим объемом;

$Dx(t) = x_0(t) - x_e(t)$ - разность между плановым и освоенным объемом;

$Dx_e(t) = x(t) - x_e(t)$ ³ 0 – разность между фактическим и освоенным объемом[1];

$a_c(t) = c_e(t) / c_0(t)$ – показатель объема освоенных затрат (SPI – Schedule Performance Index);

$b_c(t) = c_e(t) / c(t)$ – показатель динамики затрат (CPI – Cost Performance Index);

$a_x(t) = x_e(t) / x_0(t)$ – показатель освоенного объема (QSPI – Quantity Schedule Performance Index);

$b_x(t) = x_e(t) / x(t)$ – показатель динамики объема (QPI – Quantity Performance Index);

$t_{0c}(t) = t - c_0^{-1}(c_e(t))$ – текущая задержка (от плана), определяется из условия: $c_0(t - t_{0c}(t)) = c_e(t)$;

$t_c(t) = t - c^{-1}(c_e(t))$ – текущая задержка по затратам, определяется из условия: $c(t - t_c(t)) = c_e(t)$;

$t_{0x}(t) = t - x_0^{-1}(x_e(t))$ – текущая задержка (от плана), определяется из условия: $x_0(t - t_{0x}(t)) = x_e(t)$;

$t_x(t) = t - x^{-1}(x_e(t))$ – текущая задержка по затратам, определяется из условия: $x(t - t_x(t)) = x_e(t)$;

$e_0 = X_0 / C_0$ – плановая эффективность[2] проекта в целом;

---

[1] *Очевидно, что независимыми являются две из трех разностей Dc и Dx.*

[2] *Под эффективностью проекта, следуя сложившейся в математической экономике традиции [7, 15, 45, 46, 63 и др.], будем понимать отношение объема работ к затратам, то есть удельную стоимость объема.*

$e_0(t) = x_0(t) / c_0(t)$ – плановая эффективность использования средств на момент времени t;

$e = X / C$ – фактическая эффективность проекта в целом[1];

$e(t) = x_e(t) / c(t)$ – фактическая эффективность использования средств на момент времени t.

Таким образом, проект считается завершенным (цель проекта достигнута), как только освоенный объем совпадет с суммарным объемом работ по проекту: $x_e(T) = X_0$. Таким образом, именно объем, а не затраты, является характеристикой, которой определяется критерий завершения проекта[2]. Продолжительность проекта и суммарные затраты являются при этом основными показателями, выступая в роли составляющих критерия эффективности и/или ограничений.

Обсудим качественно содержательные интерпретации введенных показателей, а также ту первичную информацию о ходе реализации проекта, которую они несут.

Итак мы ввели шесть первичных динамических показателей освоенного объема. Их (даже поверхностное) наблюдение несет массу качественной информации о ходе реализации проекта и позволяет констатировать, например: недостаточность финансирования, перерасход средств, отставание от директивных сроков и т.д. Более детальный анализ дает возможность делать прогнозы и выбирать управляющие воздействия. Как отмечалось выше, разделение плановых и фактических показателей и их анализ традиционно используется не только в управлении проектами, но и в управлении вообще. Зачем же необходимо разделение фактических показателей и показателей освоенного объема? Дело заключается в следующем. Можно условно выделить две «причины» несовпадения плановых и фактических показателей проекта – «внешнюю» и «внутреннюю». К «внешним» причинам может быть отнесено, например, недоста-

---

[1] *Отметим, что в фактической эффективности использования средств, в отличие от плановой, фигурирует отношение освоенного объема не к освоенным затратам, а к фактическим затратам.*

[2] *Если в качестве характеристики завершения проекта понимаются затраты (см. введение), то возникает отдельная проблема - что понимать под завершением проекта и что такое 100% выполнения. При использовании в качестве критерия объема таких проблем, как правило, не возникает.*

точное финансирование, ошибки в планировании и т.д. Но, несовпадение освоенных средств и затраченных свидетельствует уже о том, что средства используются неэффективно внутри самого проекта. Действительно, утверждение о том, что потрачена некоторая сумма несет информацию с точки зрения финансовой отчетности, но ничего не говорит о состоянии проекта – фактический эффект расходования этой суммы может отличаться (и на практике очень часто отличается) от запланированного. Например, при строительстве дома планировалось, что «нулевой» цикл потребует некоторых затрат. Даже если фактический график финансирования совпадает с директивным, то есть все средства поступили вовремя и в полном объеме, это вовсе не означает, что «нулевой» цикл завершен. Часть средств могла быть потрачена не по назначению, часть уйти на исправление брака и т.д. (см. выше).

Введенные показатели освоенного объема, даже основные, не являются независимыми – как правило, существует так называемая «технологическая[1]» связь между ресурсами (затратами) и объемом. Пусть при планировании считалось, что эта связь – «технология» - отражена оператором $G_0(\cdot)$, то есть $x_0(t) = G_0(c_0(t))$. В силу внешних причин возможно, что $c(t) \neq c_0(t)$, что приведет к несовпадению фактического объема и планового. Кроме того, в силу внутренних причин (например, неполной информированности, приведшей к ошибкам в планировании) возможна неправильная оценка оператора $G_0(\cdot)$ – на самом деле связь между затратами и объемом имеет вид $x(t) = G(c(t))$. Подобные ошибки ($G(\cdot) \neq G_0(\cdot)$) приведут к несовпадению фактического и освоенного объема. Следовательно, для эффективного управления необходимо, учитывая как внешние, так и внутренние причины, решать задачи идентификации, прогнозирования и управления (см. таблицу 1, в которой условно отражена эта последовательность этапов).

---

[1] *Термин «технологическая» отражает тот факт, что акцент делается на технологии «преобразования» ресурсов (затрат) в объем.*

Причины /Задачи	***Идентификация*** «Что происходит?»	***Прогнозирование*** «Что произойдет, если не принять мер?»	***Управление*** «Какие меры следует предпринять?»
Внешние: $c(t) \neq c_0(t)$ Внутренние: $G(x) \neq G_0(x)$	Определение параметров модели проекта на основании имеющихся наблюдений за ходом его реализации.	Оценка показателей проекта в будущие моменты времени и сравнение их с плановыми значениями.	Реакция на: «внешнюю» и «внутреннюю» причину – корректировка директивного графика и технологии.

Таблица 1. Проблемы и задачи оперативного управления проектами при использовании методики освоенного объема.

Относительно основных показателей освоенного объема следует сделать также следующее замечание. Как отмечалось выше, величины x_0, c_0 являются плановыми (то есть известны – «наблюдаемы» руководству проекта), а величины x_e и c_e, как правило, ненаблюдаемы и для их оценки используются процедуры, включающие сообщение информации от более информированных участников проекта менее информированным. Следовательно, при решении задач идентификации, прогнозирования и управления необходимо учитывать активность участников, то есть их предпочтения, интересы, возможность манипулировать информацией и т.д. Охарактеризовав кратко существующие проблемы, перейдем к описанию взаимосвязи между затратами и объемом.

Взаимосвязь между затратами и объемом. Будем считать, что единственным ресурсом $u(t)$ в проекте являются финансы[1] (см. предположение выше), то есть ресурс $u(t) = c'(t) = \dfrac{dc(t)}{dt}$.

---

[1] *С содержательной точки зрения, если $c(t)$ – суммарные затраты, то ресурс $u(t)$ – затраты (деньги) в единицу времени – однозначно связан с затратами. В соответствии с методологией СПУ количество ресурса в некоторый момент времени определяет скорость выполнения проекта. Зависимость между скоростью выполнения проекта (изменением объема*

Примем, что скорость $w(\cdot)$ выполнения проекта (интенсивность), то есть скорость изменения объема, является функцией ресурса и, быть может, уже освоенного объема и времени (то есть операторы $G_0(\cdot)$ и $G(\cdot)$ неявно задаются следующими уравнениями):

$$\frac{dx_e(t)}{dt} = w(u(t)),\ x_e(t) = \int_0^t w(u(t))\,dt,\ \int_0^T w(u(t))\,dt = X_0.$$

В более общем случае:

$$\frac{dx_e(t)}{dt} = w(x_e(t),\ u(t),\ t),\ x_e(0) = 0,\ x_e(T) = X_0.$$

Пример 1. Рассмотрим частный случай линейных интенсивностей[1], то есть проект, в котором: 1) скорость изменения объема пропорциональна ресурсу: $w(u(t)) = k_0\, u(t)$, $k_0 > 0$; 2) количество ресурса $u(t) = u_0$ постоянно во времени.

Если u_0 – планируемое количество ресурса (затраты в единицу времени), то планируемая динамика затрат имеет вид:

(1) $c_0(t) = u_0\, t$,

а планируемая динамика объема:

(2) $x_0(t) = k_0\, u_0\, t$.

Если X_0 – суммарный объем работ по проекту, то планируемая продолжительность проекта составит (см. рисунок 7):

(3) $T_0 = X_0 / (k_0\, u_0)$,

а суммарные плановые затраты на проект, независимо от интенсивности потребления ресурса, равны:

(4) $C_0 = X_0 / k_0$.

в единицу времени) и количеством ресурса в СПУ получила название интенсивности [4, 14, 20, 25, 39 и др.].

[1] *Следует отметить, что единственным результатом, полученным зарубежными авторами при исследовании взаимосвязи между затратами и объемом в рамках методики освоенного объема, является приведенная в работе [152] интерпретация показателей освоенного объема для случая, когда отношение затрат к объему постоянно:* $c_0(t) / x_0(t) = c_e(t) / x_e(t) = Const$. *Предположение о линейной связи затрат и объема является наиболее распространенным (см. обсуждение в [106]).*

Следует отметить, что, как правило, в управлении проектами считается, что взаимосвязь между временем завершения проекта T и суммарными затратами на проект C имеет вид, приведенный на рисунке 6. Содержательные интерпретации такой зависимости очевидны.

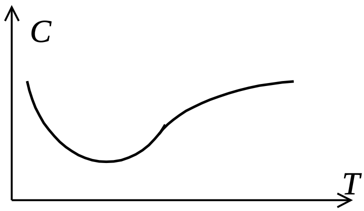


Рис. 6. Зависимость затрат на проект от времени его завершения

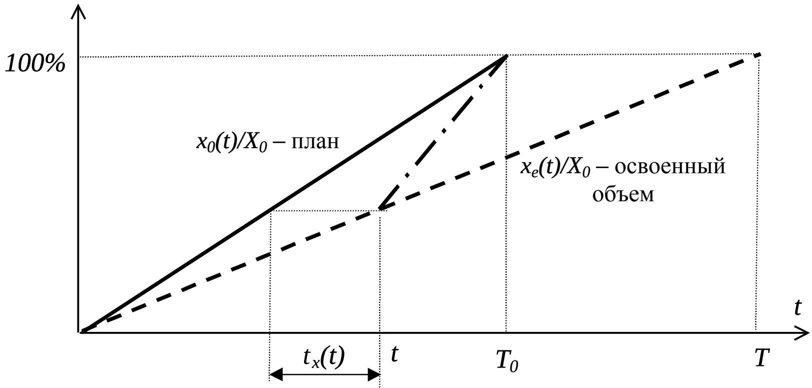


Рис. 7. Динамика объема в первом случае примера 1.

Плановые значения основных показателей:

$e_0 = X_0 / C_0 = k_0$ – плановая эффективность проекта в целом;

$e_0(t) = x_0(t) / c_0(t) = k_0$ – плановая эффективность использования средств.

Имея зависимости (1)-(4), можно до начала реализации проекта решать следующие задачи планирования: определения интенсивностей или количества ресурсов, позволяющих выполнить проект за заданное время; определения времени выполнения проекта при заданных ограничениях на интенсивности и ресурсы и т.д. (еще раз подчеркнем, что в рамках рассматриваемой модели минимизировать суммарные затраты нельзя, так как они не зависят от интенсивностей и динамики потребления ресурса). Решив перечисленные задачи планирования, можно оценивать упущенную выгоду, штрафы и прочие санкции за перерасход средств и задержки в достижении конечной цели проекта.

Рассмотрим теперь задачи <u>оперативного управления</u>. Если в процессе реализации показатели освоенного объема и фактических затрат совпадают с плановыми, то при фиксированных целях (относительно планируемого суммарного объема и планируемой продолжительности) необходимость в оперативном управлении отсутствует. Если же в процессе реализации проекта наблюдаются отклонения основных показателей освоенного объема от плановых значений, то возникает необходимость оперативного управления. Рассмотрим возможные случаи.

1. Предположим, что фактическое количество ресурса u оказалось меньше планируемого (внешняя причина – см. таблицу 1): u £ u_0, а интенсивность w равна плановой (внутренняя причина отсутствует). Тогда динамика фактических затрат совпадает с динамикой освоенных затрат и имеет вид:

(5) $c(t) = c_e(t) = u\ t$ £ $c_0(t)$,

а значение освоенного объема совпадает с фактическим объемом и равно:

(6) $x(t) = x_e(t) = k_0\ u\ t$ £ $x_0(t)$.

Если X_0 – суммарный объем работ по проекту, то фактическая продолжительность проекта составит (см. рисунок 7):

(7) $T = X_0 / (k_0\ u)\ ^3\ T_0$,

а фактические суммарные затраты на проект не изменятся (см. выражение (4)).

Вычислим основные показатели:

$$a_c(t)=c_e(t)/c_0(t)=u/u_0;\ b_c(t)=c_e(t)/c(t)=1;\ a_x(t)=x_e(t)/x_0(t)=u/u_0;$$
$$b_x(t)=x_e(t)/x(t)=1;\ t_{0c}(t)=(u_0\text{-}u)t/u_0;\ t_c(t)=0;\ t_{0x}(t)=(u_0\text{-}u)t/u_0;$$
$$t_x(t)=0;\ e_0=X_0/C_0=k_0;\ e(t)=x_e(t)/c(t)=k_0.$$

Итак, фактические суммарные затраты и фактическая эффективность совпадают с плановыми значениями. Тем не менее, продолжительность проекта увеличилась на следующую величину:

(8) $DT = T - T_0 = \dfrac{X_0}{k_0}\ \dfrac{u_0 - u}{u_0 u}$.

Специфика рассматриваемой модели заключается в том, что сразу после начала реализации проекта по единственному наблюдению освоенного объема или одного из введенных относительных показателей возможно однозначно определить и фактическое (и требуемое) значение ресурса, и действительную (и оставшуюся) продолжительность проекта.

Обнаружив в момент времени $t < T$ несоответствие освоенного объема (и затрат) и плановой динамики объема, мы имеем возможность решать задачи оперативного управления по корректировке параметров реализации проекта. Например, для того, чтобы завершить проект в плановые сроки (см. штрих-пунктирную линию на рисунке 7) необходимо в оставшееся время (T_0 - t) использовать ресурс в объеме:

(9) $u^* = \dfrac{X_0 - k_0 ut}{k_0 (T_0 - t)}$,

что не приводит к возрастанию суммарных фактических затрат по сравнению с плановыми.

2. Предположим, что внешняя причина отсутствует, то есть $u = u_0$, но присутствует внутренняя причина – фактическая интенсивность k использования ресурса u_0 оказалось меньше планируемой: $k \le k_0$. Тогда динамика фактических затрат совпадает с плановой (при $t \le T_0$):

(10) $c(t) = u_0\, t = c_0(t)$,

а значение освоенного объема отстает от планового значения (см. рисунок 8):

(11) $x(t) = x_e(t) = k\, u_0\, t \le x_0(t)$.

Если X_0 – суммарный объем работ по проекту, то фактическая продолжительность проекта составит (см. рисунок 4):

(12) $T = X_0 / (k\, u_0) \ge T_0$,

причем фактические суммарные затраты на проект превысят плановое значение:

(13) $C = X_0 / k \ge C_0$.

Вычислим основные показатели:

$$a_c(t)=c_e(t)/c_0(t)=1;\ b_c(t)=c_e(t)/c(t)=1;\ a_x(t)=x_e(t)/x_0(t)=k/k_0;$$
$$b_x(t)=x_e(t)/x(t)=1;\ t_{0c}(t)=0;\ t_c(t)=0;\ t_{0x}(t)=(k_0-k)t/k_0;$$
$$t_x(t)=0;\ e_0=X_0/C_0=k_0;\ e(t)=x_e(t)/c(t)=k.$$

Итак, фактические суммарные затраты превышают плановое значение, фактическая эффективность ниже, а фактическая продолжительность проекта увеличилась на:

(14) $DT = T - T_0 = \dfrac{X_0}{u_0} \dfrac{k_0 - k}{k_0 k}$.

Опять же, в рассматриваемой модели сразу после начала реализации проекта по единственному наблюдению освоенного объема или одного из относительных показателей возможно однозначно определить фактическое значение интенсивности, действительную продолжительность проекта, затрат и т.д.

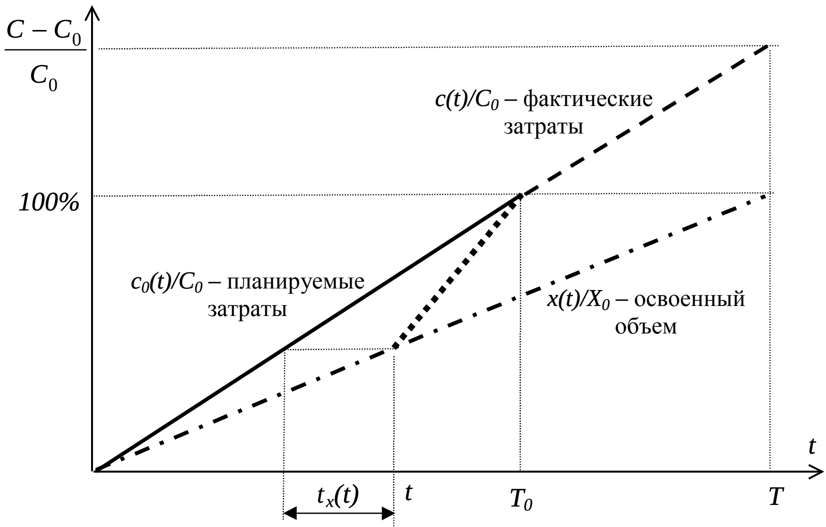


Рис. 8. Динамика объема во втором случае примера 1.

Обнаружив в момент времени $t < T$ несоответствие освоенного объема (и затрат) и плановой динамики объема, возможно решение задач оперативного управления по корректировке параметров реализации проекта. Например, для того, чтобы завершить проект в плановые сроки (см. линию, выделенную точками на рисунке 8) необходимо: либо в оставшееся время (T_0 - t) использовать ресурс в объеме:

(15) $u^* = \dfrac{X_0 - k u_0 t}{k(T_0 - t)}$,

либо увеличить интенсивность (что не всегда возможно с технологической точки зрения) до величины

(16) $$k^* = \frac{X_0 - ku_0 t}{u_0(T_0 - t)},$$

что в первом случае приводит к возрастанию суммарных фактических затрат по сравнению с плановыми на величину $DC = X_0 \frac{k_0 - k}{k_0 k}$, а во втором случае – не меняет суммарных затрат. Величина DC позволяет оценить перерасход средств, вызванный неправильной плановой оценкой, при условии необходимости завершения проекта в срок.

3. Предположим, что присутствуют и внешняя причина, то есть $u < u_0$, и внутренняя причина - фактическая интенсивность k использования ресурса u оказалось меньше планируемой: k £ k_0. Тогда динамика фактических и освоенных затрат имеет вид:

(17) $c_e(t) = c(t) = u\,t$ £ $c_0(t)$,

а значение освоенного объема отстает от планового значения:

(18) $x(t) = x_e(t) = k\,u\,t$ £ $x_0(t)$.

Если X_0 – суммарный объем работ по проекту, то фактическая продолжительность проекта составит:

(19) $T = X_0 / (k\,u)$ ³ T_0, $DT = X_0 \frac{k_0 u_0 - ku}{k_0 u_0 ku}$.

Вычислим основные показатели:

$a_c(t)=c_e(t)/c_0(t)=u/u_0$; $b_c(t)=c_e(t)/c(t)=1$; $a_x(t)=x_e(t)/x_0(t)=ku/k_0u_0$;

$b_x(t)=x_e(t)/x(t)=1$; $t_{0c}(t)=(u_0-u)t/u_0$; $t_c(t)=0$; $t_{0x}(t)=\frac{k_0 u_0 - ku}{k_0 u_0} t$; $t_x(t)=0$.

Для того, чтобы завершить проект в плановые сроки необходимо в оставшееся время (T_0 - t) использовать ресурс и интенсивность, удовлетворяющими уравнению:

(20) $$k^* u^* = \frac{X_0 - kut}{T_0 - t}.$$

Отметим, что для всех случаев рассматриваемого примера выполнено:

(21) $DT = max\,\{t_{0c}(T);\ t_c(T);\ t_{0x}(T);\ t_x(T)\}$.

Рассмотрим другую задачу. Пусть за каждый день превышения планового срока завершения проекта накладываются штрафные санкции в размере $c_0 > 0$. Тогда задача минимизации упущенной выгоды будет заключаться в определении минимального суммарного значения ресурсов, используемых начиная с момента времени t обнаружения отклонений реальной траектории от директивной до момента T завершения проекта (которое также необходимо определить) то есть:

$$(22)\quad \begin{cases} u^*(T - t) + c_0(T - T_0) \to \min\limits_{u^*,\,T} \\ T \geq T_0, \\ ku_0 t + ku^*(T - t) = X_0. \end{cases}$$

Решение задачи (22) совпадает с выражением (15). Содержательно при ненулевых штрафах за задержку в завершении проекта оптимальным является его завершение точно в срок, при этом фактические суммарные затраты на реализацию проекта совпадают с (13).

Итак, показатели освоенного объема в рассматриваемом примере позволяют тривиально прогнозировать (в результате единственного точного наблюдения за реализацией проекта) как время завершения проекта:

(23) $T = T_0 / a_x(t)$,

так и фактические затраты на выполнение (и, соответственно, завершение) проекта:

(24) $C = X_0 / e(t) = X_0\, a_x(t) / a_c(t)$.

Еще раз подчеркнем, что и в первом, и во втором случае фактические затраты на проект не изменялись в процессе оперативного управления, которое было нацелено на выполнение проекта в плановые сроки.

Более того, однократное наблюдение одного из параметров проекта позволяет в рамках введенных предположений однозначно определить и спрогнозировать будущие значения основных его параметров (так как ресурс и интенсивность считались постоянными во времени, то левые части выражений (23) и (24) не зависят от времени!). •[1]

Сделанный в результате рассмотрения примера вывод вполне согласован с результатами зарубежных авторов и имеющимся опытом практического применения методики освоенного объема, в частности – в крупных проектах, выполняемых по заказу Министерства обороны США. Более конкретно, в работах [102, 103, 113, 122] утверждается, что: 1) статистические данные по проектам указанного типа (более пятисот проектов за последние тридцать лет) свидетельствуют о том, что показатели освоенного объема (в частности – текущая эффективность использования средств) меняются не более чем на 10% относительно того значения, которое было достигнуто к моменту 20% выполнения проекта; 2) оценки (23) и (24)[2] могут и должны (по стандартам того же Министерства обороны) использоваться для определения соответственно времени завершения и суммарных затрат проекта.

Таким образом, ключевая идея, лежащая в основе всей методики освоенного объема заключается в следующем – показатели освоенного объема являются характеристиками, на основании исследования которых на ранних стадиях выполнения проекта возможна (иногда достаточно точная) оценка их будущих значений и, следовательно, выработка на их основе своевременных оперативных управляющих воздействий. Идея эта достаточно рациональна и грамотное ее использование на практике действительно целесообразно.

Проблема заключается в том, что существующие на сегодняшний день реализации этой идеи (будем надеяться, что по крайней мере – теоретические реализации) не выдерживают никакой критики. Как отмечалось выше (в частности, во введении и в примере 1), использование оценок (23)–(24) адекватно только в рамках предположений о линейной связи затрат и объема и постоянстве интенсивностей и ресурсов во времени, введенных в рассмотренном

---

[1] *Символ «·» здесь и далее обозначает окончание примера, доказательства и т.д.*

[2] *Справедливости ради, следует отметить, что оценка (23) считается «оптимистической», а в качестве «пессимистической» оценки времени завершения проекта иногда предлагается использовать выражение* T_0 / $(a(t)\ e(t))$ *(см. введение).*

выше примере! Для общего случая (произвольных плановых зависимостей между объемом и интенсивностями и произвольных плановых графиков финансирования, то есть плановой динамики затрат) они играют роль не более чем эвристик, эффективность использования которых может оказаться чрезвычайно низкой.

В чем же причина столь широкой распространенности «не очень корректной» версии методики освоенного объема? Представим себе следующую ситуацию. Пусть параметры проекта (например, интенсивности или объемы ресурсов и т.д.) зависят от некоторой внешней или внутренней причины – например - переменной, точное значение которой неизвестно до момента начала реализации проекта, но остается постоянным в течение всего времени реализации проекта. Следуя терминологии теории принятия решений назовем эту переменную «состоянием природы». На этапе планирования (до начала реализации проекта) приходится использовать те или иные оценки состояния природы. Например, в рассмотренном выше примере состоянием природы являлись: в первом случае (внешняя причина) – фактическое количество ресурса u, во втором случае (внутренняя причина) – фактическое значение интенсивности k. До начала выполнения проекта в качестве оценок состояния природы («плановых» значений) использовались соответственно величины u_0 и k_0.

Если реализовавшееся значение состояния природы взаимно однозначно связано с наблюдаемыми параметрами процесса реализации проекта (например, с параметрами освоенного объема), то после начала реализации проекта (причины «выжидания» примерно до 20% его завершения очевидны, хотя и эта величина может быть предметом отдельного исследования) появляется возможность на основании наблюдаемого хода его реализации «восстановить» истинное значение состояния природы. Такая примитивная идентификация позволяет полностью устранить неопределенность и при необходимости оптимизировать выполнение оставшейся части проекта уже в условиях полной информированности.

Итак, описанный подход справедлив в предположении, что состояние природы не изменяется в течение всего времени выполнения проекта. Возможность использования оценок (23)-(24) дополнительно требует линейной зависимости между объемом и ресурсами, а также - постоянства количества ресурсов во времени.

Иными словами, требуется «стационарность» условий, в которых выполняется проект. Быть может, такая стационарность и имеет место при реализации оборонных проектов в США, однако относительно современных российских условий подобные предположения вызывают, мягко говоря, подозрения в их обоснованности, что объясняет актуальность разработки методики освоенного объема, которая могла бы эффективно использоваться в оперативном управлении проектами в условиях современной социально-экономической ситуации. Кроме того, необходимо учитывать активность участников проекта, то есть разрабатывать механизмы управления, оперирующие показателями освоенного объема и побуждающие участников проекта к сообщению достоверной информации, выбору действий, совпадающих с планами, назначаемыми руководством проекта и т.д.

Тем не менее, уже имеющийся на сегодняшний день опыт использования методики освоенного объема свидетельствует, что используемый в ней набор показателей (показатели освоенного объема) является информативным[1] и в ряде случаев (см., например, условия выше) достаточным для принятия эффективных управленческих решений по управлению проектами. Основными преимуществами методики освоенного объема является то, что она оперирует теми же показатели, что и руководитель проекта (который делает это формально или интуитивно), достаточно проста в использовании и, что самое главное – позволяет принимать решения в реальном режиме времени.

Последнее обстоятельство является чрезвычайно существенным по следующим причинам. Хорошо развитые на сегодняшний день теоретические модели сетевого планирования и управления (СПУ) обладают высокой вычислительной сложностью и требуют для своего использования большого объема информации и достаточных резервов времени. Следствием этого является использование СПУ на этапе планирования, например, при разработке сетевого (ресурсного, календарного и др.) графика проекта до начала его

---

[1] *Набор переменных, фигурирующих в методике освоенного объема, с одной стороны невелик и соответствует используемым на практике показателям, а с другой стороны – несет в себе достаточную информацию о текущем состоянии проекта, для, по крайней мере, первичного анализа.*

реализации. В ходе реализации проекта, когда ограничены как информация, так и время принятия решений, необходимо принимать решения в реальном времени на основе имеющейся информации. В качестве такой информации можно использовать показатели освоенного объема. Для минимизации времени принятия решений необходима разработка готовых алгоритмов и процедур обработки информации, прогнозирования, генерации и оценке вариантов и т.д.

Поэтому при создании методов идентификации, прогнозирования и оперативного управления (см. таблицу 1) необходимо ориентироваться на включение соответствующего инструментария в существующие, модифицируемые и вновь создаваемые комплексы прикладных программ по управлению проектами. Исходя из вышесказанного в ходе дальнейшего изложения материала настоящей работы мы будем стремиться либо сводить рассматриваемые задачи управления к уже известным (для которых существуют эффективные методы и алгоритмы решения, готовые к программной реализации и не требующие дополнительного исследования с точки зрения специфики изучаемой области), либо описывать модели и механизмы в виде, максимально приближенном к требуемому для использования в прикладных моделях.

1.2. Общая постановка задачи оперативного управления проектом

Предположим, что в рамках имеющейся информированности руководителя проекта – центра – он обладает достоверной информацией обо всех существенных параметрах, то есть условно можно считать, что функционирование системы происходит в условиях полной информированности [15, 17, 19, 22, 78]. Исследуем в рамках этого предположения избыточность приведенной в разделе 1.1 системы показателей освоенного объема.

Даже краткое рассмотрение частных случаев (см. пример 1) свидетельствует, что набор показателей освоенного объема (основных и производных) является избыточным как с содержательной (в рамках рассматриваемой модели не всегда ясны содержательные трактовки различий между фактическими и освоенными затратами, а также между фактическим и освоенным объемом), так и с формальной (некоторые производные показатели являются комбинацией других основных или производных показателей и т.д.) точек зрения. Поэтому введем следующий минимальный[1] набор показателей освоенного объема (см. рисунок 9), которые используются ниже в настоящей работе.

Основные показатели освоенного объема:

C_0 – планируемые суммарные затраты на проект (TB);

T_0 – планируемый срок завершения проекта;

X_0 – суммарный объем работ по проекту;

$c_0(t)$ – планируемая динамика затрат (BCWS);

$c(t)$ – фактическая динамика затрат (ACWP);

$x_0(t)$ – планируемая динамика объемов работ (BQWS);

$x(t)$ – освоенный объем (BQWP);

T – фактический срок окончания проекта;

C – фактические суммарные затраты на проект (EAC – Estimate At Complete).

Производные показатели освоенного объема:

$Dc(t) = c_0(t) - c(t)$ - разность между плановыми и фактическими затратами;

$Dx(t) = x_0(t) - x(t)$ - разность между плановым и освоенным объемом[2];

$a(t) = x(t) / x_0(t)$ – показатель освоенного объема, характеризует выполнение плана по объему;

$b(t) = c(t) / c_0(t)$ – показатель динамики затрат, характеризует соответствие поступления средств директивному графику;

$g(t) = x(t) / c(t)$ – эффективность использования средств[3];

$t_c(t) = t - c_0^{-1}(c(t))$ – текущая задержка по затратам;

$t_x(t) = t - x_0^{-1}(x(t))$ – текущая задержка по объему;

$e_0 = X_0 / C_0$ – плановая эффективность проекта в целом;

$e_0(t) = x_0(t) / c_0(t) = b(t)\, g(t) / a(t)$ – плановая эффективность использования средств;

---

[1] *Условно можно считать, что освоенные затраты могут быть рассчитаны по освоенному объему (см. подробности ниже).*

[2] *По четырем независимым переменным с учетом размерности можно определить две независимых их разности.*

[3] *По четырем независимым переменным можно определить три их независимых отношения.*

$e = X / C$ – фактическая эффективность проекта в целом.

Помимо перечисленных показателей освоенного объема модель проекта должна включать в себя оператор $G(x)$, связывающий объем с затратами и отражающий «технологию» использования ресурсов.

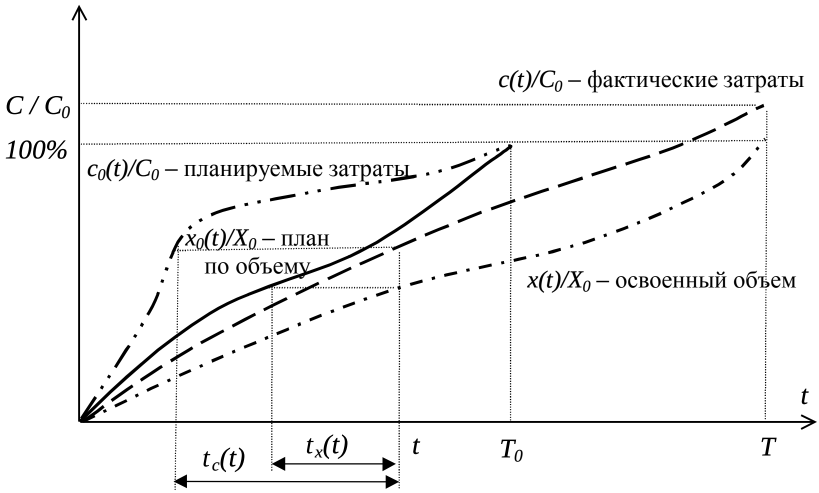


Рис. 9. Пример динамики основных показателей освоенного объема

Докажем, что введенная система показателей освоенного объема включает в себя используемую зарубежными авторами систему показателей (см. ее описание во введении) как частный случай. Пусть $x = kc$, где k – коэффициент интенсивности (в примере 1 использовалось уравнение $dx/dt = ku$, где $u = dc/dt$). Получаем, что:

$$SPI = a(t);\ CPI = g(t) / k;$$

$$EAC = c(t) + (C_0 - c_e(t)) / CPI = c(t) + (X_0 - x(t)) / g(t),$$

то есть в случае линейной связи между объемом и ресурсами соответствие полное (с точностью до линейного преобразования).

В рамках рассматриваемой модели задача управления проектом включает в себя задачу планирования, решаемую до начала реализации проекта, и задачу оперативного управления - выработки оперативных управляющих воздействий в ходе реализации проекта. Задача планирования заключается в определении объема проекта X_0, плановых значений затрат $c_0(t)$, объема $x_0(t)$ и продолжительности проекта T_0 при известной «модели проекта» $G_0(\cdot)$; при этом $C_0 = c_0(T_0)$, $x_0(T_0) = X_0$. Задача планирования рассматривается в разделе 1.3 настоящей работы, поэтому перейдем к рассмотрению **общей постановки задачи оперативного управления проектом**, которая включает задачи идентификации, прогнозирования и собственно управления.

На рисунке 10 изображена структура системы оперативного управления проектом в рамках модели освоенного объема. Прямоугольниками отражены реальный проект и его модель. Входом модели проекта является плановая зависимость затрат от времени $c_0(t)$, выходом – плановая зависимость объема от времени $x_0(t)$. Входом реального проекта является фактическая зависимость затрат от времени $c(t)$, выходом – величина освоенного объема $x(t)$. Как отмечалось выше, несовпадение: $x(t) \neq x_0(t)$ может быть вызвано следующими причинами: внешней – $c(t) \neq c_0(t)$ и/или внутренней – $G(\cdot) \neq G_0(\cdot)$.

Следовательно, первой <u>задачей идентификации</u> (обозначенной «И1» на рисунке 10), которую можно также рассматривать и как задачу прогнозирования, является задача оценки зависимости фактических затрат от времени на основании сравнения наблюдаемых значений фактических и плановых затрат.

Если представить, что на вход модели проекта подаются не плановые, а фактические затраты, то, зная оператор $G_0(\cdot)$, можно определить следующую зависимость от времени: $\hat{x}(t) = G_0(c(t))$, сравнение которой с плановой зависимостью $x_0(t)$ может служить исходными данными для решения <u>второй задачи идентификации</u> (обозначенной «И2» на рисунке 10) – задачи идентификации собственно модели проекта, то есть «уточнения» $\tilde{G}(\cdot, t)$ (см. двойную линию на рисунке 10), $\tilde{G}(\cdot, 0) = G_0$, соответствующего оператора (индекс “t” в операторе $\tilde{G}$ присутствует для того, чтобы подчеркнуть зависимость от времени t, то есть в зависимости от продолжительности имеющейся истории наблюдений за время $[0; t]$ модель может изменяться).

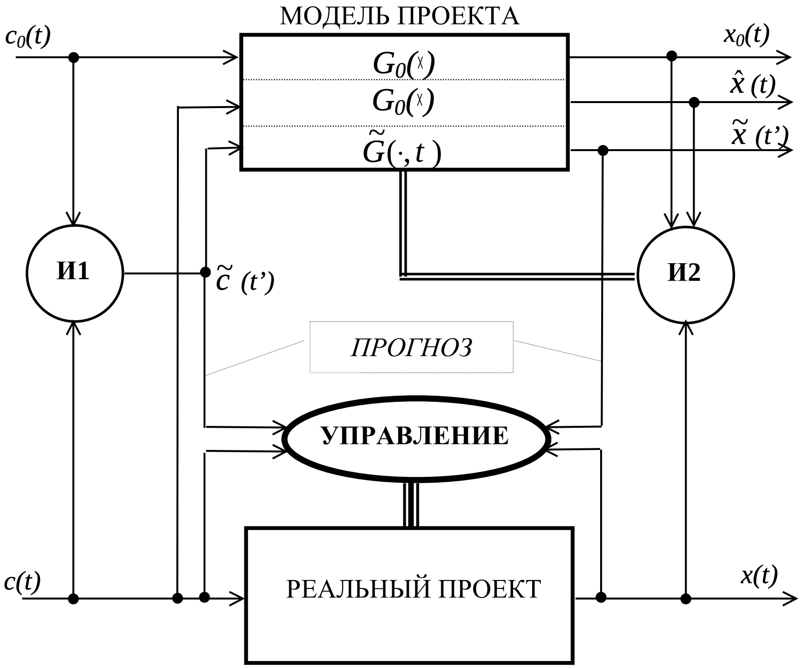


Рис. 10. Структура системы оперативного управления проектом

Итак, возникают следующие **задачи идентификации**:

И1. В момент времени $t \geq 0$ на основании истории наблюдений $\{c(t), c_0(t)\}_{t \in [0;\, t]}$ определить «прогноз» затрат $\tilde{c}\,(t',\, t)$ для $t' > t$.

И2. В момент времени $t \geq 0$ на основании истории наблюдений $\{c(t), c_0(t), x_0(t), x(t), \hat{x}(t)\}_{t \in [0;\, t]}$ идентифицировать проект, то есть построит адекватную ему модель $\tilde{G}\,(\cdot,\, t)$.

Решив обе задачи идентификации, то есть имея в своем распоряжении зависимости $\tilde{c}\,(t,\, t)$ и $\tilde{G}\,(\cdot,\, t)$, можно в момент времени $t \geq 0$ решить **задачу прогнозирования**, то есть сделать прогноз значения освоенного объема $\tilde{x}\,(t',\, t)$ для моментов времени $t' > t$:

$$\tilde{x}\,(t',\, t) = \tilde{G}\,(\tilde{c}\,(t',\, t),\, t).$$

Необходимо принимать во внимание, что для решения задач идентификации и прогнозирования могут использоваться не только данные о ходе реализации рассматриваемого проекта, но и информация о реализации других аналогичных проектов.

Сделав маленькое отступление, отметим, что в рамках рассматриваемого подхода легко показать, что введенная в настоящем разделе система показателей освоенного объема является минимально необходимой для полного описания проекта в рамках методики освоенного объема. Для этого достаточно доказать, что показатели фактического объема и освоенных затрат (присутствующие в «расширенном» списке показателей освоенного объема, приведенном во введении и в разделе 1.1) не являются независимыми и могут быть выражены, через фактические и плановые затраты, а также освоенный и плановый объем. Действительно, фактический объем может интерпретироваться как объем, который был бы освоен, если бы присутствовала только внешняя причина, а внутренняя причина отсутствовала, то есть фактический объем есть ни что иное, как $\hat{x}(t) = G_0(c(t))$. Освоенные затраты $c_e(t)$ соответствуют тем затратам, которые понадобились бы для того, чтобы показатель освоенного объема для реального проекта равнялся заданной величине $x(t)$, то есть $\tilde{G}(c_e(t)) = x(t)$.

Решив задачи идентификации и прогнозирования, то есть имея в момент времени t в своем распоряжении прогнозы $\tilde{c}(t', t)$ и $\tilde{x}(t', t)$, для $t' > t$, и зная директивные (плановые) графики затрат и объема, можно решать **задачи оперативного управления проектом** – выработки таких управляющих воздействий, которые корректировали бы ход реализации проекта в нужную (с точки зрения руководителя проекта – см. более подробно ниже) сторону.

Рассмотрим более подробно задачи идентификации, прогноза и оперативного управления. Отметим, что в настоящей работе при анализе и синтезе моделей оперативного управления проектами мы будем следовать следующему общему принципу. Так как конечная цель всех разрабатываемых в рамках методики освоенного объема методов и механизмов оперативного управления заключается в повышении эффективности управления реальными проектами, то критерием необходимости изучения той или иной частной задачи управления является неизвестность на сегодняшний день возможности сведения ее к уже исследованным, например, оптимизационным и другим задачам, методы решения которых могут быть алгоритмизированы, то есть использованы в методиках или прикладных компьютерных программах, ориентированных на использование руководителями проектов. Такая практическая направленность четко выделяет необходимую степень детализации при исследовании тех или иных задач управления, возникающих при описании проекта показателями освоенного объема. Другими словами, в рамках используемого подхода частная задача синтеза определенного механизма управления может считаться решенной, если для нее сформулированы либо алгоритм решения, либо приведена ссылка на метод решения эквивалентной ей задачи, которые могут быть использованы в прикладных методиках и алгоритмах, причем создание последних, при наличии подробно изученных с теоретической точки зрения методах решения, может рассматриваться как инженерная задача.

Первая задача идентификации (И1), которую можно также рассматривать как задачу прогнозирования значений фактических затрат, заключается в оценке будущей зависимости фактических затрат от времени на основании сравнения наблюдаемых значений фактических и плановых затрат.

Итак, имеются два временных ряда: $c_0(t)$ и $c(t)$, t £ t. Прогноз $\tilde{c}\ (t', t)$, $t' > t$, может быть получен двумя путями. Первый путь, не учитывающий специфику рассматриваемой задачи, заключается в использовании методов «технического» анализа (статистический анализ временных рядов [2, 51, 72, 99]) для оценки величины $\tilde{c}\ (t', t)$, $t' > t$, только на основании наблюдаемых реализаций $c(t)$, t £ t. Второй путь – построение модели, отражающей связь между плановыми и фактическими затратами и, быть может, учитывающей информацию о результатах реализации аналогичных завершившихся проектов, и адаптивная идентификация этой модели на основании имеющих статистических данных. Иллюстрацией второго пути может служить введенное в примере 1 предположение (модель) о постоянстве ресурсов, то есть затрат в единицу времени. Тогда однократное наблюдение фактических значений ресурсов позволяет однозначно идентифицировать модель. Таким образом, для прогнозирования будущих значений фактических затрат $\tilde{c}\ (t', t)$, $t' > t$, могут быть использованы (то есть, «зашиты» в соответствующую компьютерную программу без существенной адаптации) известные методы и алгоритмы прогнозирования и идентификации [2, 74, 97-99].

Аналогичным образом обстоит дело и со второй задачей идентификации (И2) - построения в момент времени $t \geq 0$ адекватной модели проекта $\tilde{G}(\cdot, t)$ на основании истории наблюдений $\{c(t), c_0(t), x_0(t), x(t), \hat{x}(t)\}_{t \in [0;\ t]}$, для решения которой в теории адаптивного управления и идентификации существуют хорошо развитые методы решения [98, 99 и др.]. В рамках примера 1 идентификация проекта означала определение коэффициентов интенсивности на основании однократного наблюдения (которое оказывалось достаточным) параметров фактической реализации проекта.

При известном прогнозе фактических затрат и имеющейся модели проекта решение задачи прогнозирования будущих значений показателей освоенного объема тривиально – оно заключается в подстановке прогноза $\tilde{c}(t', t)$ в модель $\tilde{G}(\cdot, t)$, то есть

$$\tilde{x}(t', t) = \tilde{G}(\tilde{c}(t', t), t), t' > t:$$

Несколько сложнее обстоит дело с задачей собственно управления – поиска оптимальных управляющих воздействий на основании результатов решения задач идентификации и прогнозирования. Этот класс задач, как и задачи планирования, заслуживает отдельного исследования, проводимого в разделе 1.3 настоящей работы.

Таким образом, для решения задач идентификации и прогнозирования в рамках методики освоенного объема на сегодняшний день существуют хорошо развитые методы адаптивного управления, идентификации и прогнозирования. Другими словами, возникающие при использовании методики освоенного объема задачи идентификации и прогнозирования, естественно, обладают собственной спецификой, однако, специфичны они не настолько, чтобы к ним были неприменимы известные методы и алгоритмы решения.

1.3. Планирование и оперативное управление проектом в условиях полной информированности

Сохраним введенное в начале раздела 1.2 предположение о том, что руководитель проекта – центр – в рамках своей информированности обладает достоверной информацией.

Часть показателей освоенного объема, введенных в разделе 1.2, может рассматриваться как управляющие параметры (ими могут, например, быть плановые затраты, интенсивности и т.д.). Остальные показатели являются при этом зависимыми, то есть при фиксированной модели проекта однозначно определяемыми значениями управляющих параметров (например, если плановые затраты интерпретируются как управляющий параметр, то при модели проекта $G_0({}^{x})$ плановое значение объема является зависимым показателем: $x_0(t) = G_0(c_0(t))$ и т.д.). В зависимости от рассматриваемой модели (то есть в зависимости от рассматриваемой задачи управления) одни и те же показатели могут быть либо управляющими, либо зависимыми.

Пусть известны ограничения на значения управляющих параметров и задан критерий эффективности управления[1], зависящий как от управляющих, так и от зависимых параметров. Тогда на качественном уровне задачу управления можно сформулировать следующим образом: выбрать такие допустимые значения управляющих параметров, которые доставляли бы экстремум критерию эффективности управления (в частном случае – максимизировали эффективность проекта).

Задача планирования, являющаяся частным случаем сформулированной выше задачи управления, решается до начала реализации проекта и заключается в определении на основании всей имеющейся на данный момент информации оптимальных плановых значений управляющих параметров для $t'\ {}^{3}\ 0$.

Задача оперативного управления, также являющаяся частным случаем задачи управления, решается в ходе реализации проекта и заключается в определении на основании всей имеющейся на данный момент информации оптимальных текущих и будущих значе-

---

[1] *Следует различать эффективность проекта, определяемую как отношение объема к затратам (см. выше), и эффективность управления.*

ний управляющих параметров, то есть оптимальных плановых значений управляющих параметров для t' ³ t.

Таким образом, задачи планирования и оперативного управления являются частными случаями одной и той же задачи управления, отличающимися лишь той информацией, которая имеется на момент принятия решений.

Поясним последнее утверждение более подробно. При решении задачи планирования имеется информация об ограничениях на допустимые значения плановых показателей и модель проекта. При решении задачи оперативного управления имеется информация об ограничениях на допустимые значения показателей освоенного объема и модель проекта, скорректированные в соответствии с решениями соответствующих задач идентификации и прогнозирования, описанными в разделе 1.2, и учитывающие историю реализации проекта.

Коль скоро установлена качественная эквивалентность задач планирования и оперативного управления, достаточно рассмотреть подробно одну из них, поэтому ниже в настоящем разделе мы по умолчанию будем подразумевать, что формулируемые и решаемые задачи могут интерпретироваться двояко. Более того, качественно основной результат настоящего раздела заключается в следующем: при агрегированном представлении проекта, то есть рассмотрении проекта как единого целого в рамках модели, описанной в разделе 1.2, решение задач планирования и оперативного управления в условиях полной информированности заключается в сведении к известным оптимизационным задачам, методы и алгоритмы решения которых хорошо известны.

Обоснуем это утверждение.

Важную часть показателей освоенного объема составляют плановые показатели: планируемая длительность проекта, планируемая динамика затрат, плановые значения величины освоенного объема. Поэтому рассмотрим возможные постановки задачи планирования.

В разделах 1.1-1.2 была введена следующая взаимосвязь между освоенным объемом и количеством ресурса (напомним, что количество ресурса – объем средств – затрат, которые вкладываются в единицу времени: $u(t) = c'(t)$, $c(t) = \int_0^t u(t)\,dt$):

(1) $\dfrac{dx(t)}{dt} = w(u(t))$, $x(t) = \int_0^t w(u(t))\,dt$, $\int_0^T w(u(t))\,dt = X_0$,

или в более общем случае:

(2) $\dfrac{dx(t)}{dt} = w(x(t), u(t), t)$, $x(0) = 0$, $x(T) = X_0$.

Соотношения (1) или (2) определяют модель проекта, то есть в задаче планирования ими косвенно задается оператор $G_0(\cdot)$, а в задаче оперативного управления – оператор $\tilde{G}(\cdot, t)$, причем в последнем случае нулевой момент времени в (1) или (2) заменяется на момент времени t. Во избежании путаницы, а также для того, чтобы приводимые результаты с минимальной адаптацией были применимы и к задаче планирования, и к задаче оперативного управления, будем рассматривать только задачу планирования, помня, что переход к задаче оперативного управления в момент времени t осуществляется следующей формальной заменой:

$u(t) = c'(t)$, $\quad c(t) = c(t) + \int_t^t \tilde{u}(y,t)\,dy$, $\quad \dfrac{dx(t)}{dt} = \tilde{w}(\tilde{u}(t,t),t)$,

$x(t) = x(t) + \int_t^t \tilde{w}(\tilde{u}(y,t),t)\,dy$, t ³ t, $x(t) + \int_t^T \tilde{w}(\tilde{u}(y,t),t)\,dy = X_0$,

или в более общем случае: $\dfrac{dx(t)}{dt} = \tilde{w}(x(t), \tilde{u}(t,t), t, t)$, $x(t=t) = x(t)$, $x(T) = X_0$, где $\tilde{w}(\cdot, t)$ - результат идентификации модели проекта в момент времени t, $\tilde{u}(\cdot, t) = \tilde{c}'(\cdot, t)$ – прогноз динамики финансовых ресурсов в момент времени t. Кроме того, отметим, что в задаче планирования приведенные соотношения связывают плановые показатели, а в задаче оперативного управления – фактические или прогнозные. Однако, так как мы установили эквивалентность формулировок этих задач, ниже будем опускать нижние и верхние индексы, соответствующие плановым или прогнозным значениям.

Аналогичным образом учитывается и другая, поступившая до момента времени t информация[1]. Например, если стало известно, что завершению проекта соответствует значение суммарного объема X', отличное от X_0, то учет этой информации приведет к замене в приведенных выше для задачи оперативного управления соотношениях старой величины суммарного объема на новую.

Предположим, что ограничения на ресурсы и интенсивности заданы в следующем виде:

(3) $c(t) \in X$,

(4) $u(t) \in U$,

(5) $w(\cdot) \in W$,

где X, U и W – классы возможных значений соответственно затрат, ресурсов и интенсивностей.

Возможны следующие постановки **задач планирования**.

Пусть $K(x_0(\cdot), c_0(\cdot), T_0)$ - некоторый критерий эффективности[2]. Тогда в общем случае задача планирования заключается в выборе допустимых с точки зрения (1)-(5) плановых значений $\{x_0(\cdot), c_0(\cdot), T_0\}$, при которых эффективность $K(x_0(\cdot), c_0(\cdot), T_0)$ была бы максимальна:

(6) $K(x_0(\cdot), c_0(\cdot), T_0) \to \max\limits_{(1)-(5)}$.

Задача (6), несмотря на свою общность, на практике редко формулируется и решается именно в приведенном виде. Чаще возникает необходимость решать более частные задачи планирования, описываемые ниже. Так как считается, что суммарный объем проекта фиксирован (задан извне), то возможна оптимизация таких характеристик как время выполнения проекта и финансовые показатели.

Следует признать, что задача минимизации времени выполнения проекта может рассматриваться (с формальной точки зрения) как частный случай задачи оптимизации более общих, например,

---

[1] *Самостоятельный интерес представляет задача определения оптимальных моментов получения информации, если предположить, что получение информации связано с определенными затратами. Рассмотрение этой задачи выходит за рамки настоящей работы. Подходы к решению близких задач обсуждаются в [59, 71, 79, 86, 99].*

[2] *Здесь и далее, если не оговорено особо, под эффективностью будем понимать эффективность управления, а не эффективность проекта.*

финансовых показателей. Тем не менее, ее выделение в качестве самостоятельной задачи оправданно с содержательной точки зрения, кроме того задача минимизации времени выполнения проекта является традиционной (даже хрестоматийной) задачей управления проектами.

1. Задача минимизации времени выполнения проекта. Рассмотрим несколько случаев.

Случай 1.1. Задано бюджетное ограничение $c_0(t)$, требуется найти допустимую зависимость интенсивности $w(\cdot) \in W$ от времени:

(7) $T \to \min\limits_{w(\cdot)\in W}$,

при ограничении $\int\limits_0^T w(u_0(t))\,dt = X_0$, $u_0(t) = c_0'(t)$ или (2).

Введем следующее множество:

$$\overline{W} = \{\, \overline{w}(t) = w(u_0(t)) \mid w(\cdot) \in W \},$$

то есть множество таких зависимостей интенсивности от времени, которые являются допустимыми при известных плановых затратах.

Задача: $T \to \min\limits_{\overline{w}\in\overline{W}}$, $dx(t)/dt = \overline{w}(t)$, $x(0) = 0$, $x(T) = X_0$ является хорошо известной задачей о быстродействии [12, 59, 71]. Из принципа максимума следует, что оптимальным является следующая (легко угадываемая даже интуитивно) зависимость интенсивности от времени: $\overline{w}^*(t) = \max\limits_{\overline{w}(t)\in\overline{W}} \overline{w}(t)$. Содержательно, интенсивность должна быть максимально возможной при заданном количестве ресурса.

Более сложные оптимальные решения могут появляться в случае, когда интенсивность зависит от освоенного объема: $T \to \min\limits_{\overline{w}\in\overline{W}'}$,

$$\frac{dx(t)}{dt} = \overline{w}(x(t), u_0(t), t),\ x(0) = 0,\ x(T) = X_0.$$

Случай 1.2. Задана интенсивность $w_0(t)$ и ограничения на затраты, требуется найти допустимую зависимость ресурсов (и, следовательно, затрат) от времени:

(8) $T \to \min\limits_{u(\cdot)\in U}$,

при ограничении $dx(t)/dt = w_0(u(t))$, $x(0)= 0$, $x(T) = X_0$ или (2).

Задача (8) является канонической задачей о быстродействии [12, 59, 71].

Возможно объединение случаев 1.1. и 1.2., то есть поиск одновременно допустимых зависимостей и затрат, и интенсивностей, минимизирующих время выполнения проекта. Получающаяся при этом задача решается следующим образом.

Рассмотрим исходную систему уравнений:

$$\begin{cases} \dot c(t) = u(t) \\ \dot x(t) = w(u(t)) \end{cases}$$

с ограничениями:

$$u \in U = \{u(t) \mid \forall\, t \ge 0 \quad 0 \le u(t) \le u_{max}(t)\},$$

$$w \in W = \{w(t) \mid \forall\, u \in U \quad 0 \le w(t) \le w_{max}(t)\},\ x(0) = 0,\ x(T) = X_0.$$

Пусть имеются два управляющих воздействия – плановые затраты (и, следовательно, ресурсы) и интенсивность.

Применим принцип максимума Понтрягина [12, 59] для определения допустимой стратегии управления, обеспечивающей минимум времени выполнения проекта.

Запишем гамильтониан: $H = \Psi_1\, u(t) + \Psi_2\, w(u(t))$. Для сопряженных переменных имеем: $\dot\Psi_1 = -\dfrac{\partial H}{\partial c(t)} = 0$, $\dot\Psi_2 = -\dfrac{\partial H}{\partial x(t)} = 0$, то есть $\Psi_1(t) = Const$, $\Psi_2(t) = Const$.

Условие максимума гамильтониана имеет вид:

$$u^*(t) = u_{max}(t)\ Sign\ \Psi_1(t),\ w^*(t) = w_{max}(t)\ Sign\ \Psi_2(t),$$

то есть оптимальной является следующая стратегия: независимо от объема проекта, все время следует использовать максимально возможное количество ресурса с максимально возможной интенсивностью. Содержательные интерпретации такого решения очевидны.

2. Задача максимизации финансовой эффективности. Под финансовой эффективностью проекта (при фиксированном его объеме) будем понимать либо суммарные затраты на проект (быть может, приведенные к текущему или некоторому будущему) моменту времени), либо упущенную выгоду, то есть финансовый показатель зависящий от суммарных затрат на проект, времени его окончания, штрафов за задержку времени выполнения проекта и

т.д. В общем случае минимизируемой величиной является некоторый функционал $K_C = K_C(c_0(t), T)$ (который может задаваться как интеграл от плановой траектории затрат и, быть может, освоенного объема) от плановой динамики затрат или функционал $K_U = K_U(u_0(t), T)$ от плановой динамики потребления финансовых ресурсов.

Как и при минимизации времени выполнения проекта возможны несколько случаев.

Случай 2.1. Задано (плановое) бюджетное ограничение $c_0(t)$, требуется найти допустимую зависимость интенсивности от времени, такую, что:

(9) $K_C(c_0(t), T) \to \min\limits_{w(\cdot)\in W,\, T\geq 0}$,

при ограничении $\int_0^T w(u_0(t))\, dt = X_0$, $u_0(t) = c_0'(t)$ или (2).

Задача (9) является задачей терминального управления [12, 59, 71] (метод ее сведения к каноническому виду аналогичен использованному при рассмотрении случая 1.1).

Случай 2.2. Задана интенсивность $w_0(t)$ и ограничение на затраты, требуется найти допустимую зависимость ресурсов (и, следовательно, затрат) от времени:

(10) $K_C(c(t), T) \to \min\limits_{c(\cdot)\in \Xi,\, T\geq 0}$,

при ограничении $\int_0^T w_0(u(t))\, dt = X_0$, $u(t) = c'(t)$ или (2).

Задача (10) может также интерпретироваться, например, как следующая задача финансового планирования. Пусть проект выполняется за счет заемных средств (кредита) с процентной ставкой d, причем выплаты по кредиту производятся сразу по завершении проекта, то есть в момент времени T. Тогда задача финансового планирования заключается в определении допустимого графика заимствования средств $u(t)$ с учетом процентов по кредиту (отражаемых дисконтирующим множителем d):

$$K_C(u(t), T) = \int_0^T u(t)\, e^{d\,(T-t)}\, dt \to \min_{u(\cdot)\in U,\, T\geq 0},$$

$$dx(t)/dt = w_0(u(t)),\ x(0) = 0,\ x(T) = X_0.$$

Сформулированная задача финансового планирования является задачей терминального управления [12, 59, 71].

Таким образом, в условиях полной информированности при рассмотрении проекта как единого целого задача планирования (определения оптимальных плановых значений переменных, которые можно в рамках рассматриваемой модели или задачи отнести к управляющим) сводится к известным оптимизационным задачам (задачам оптимального управления). Проведенное в настоящем разделе рассмотрение позволяет сделать несколько важных методологических выводов.

Во-первых, задача планирования рассматривалась в предположении, что плановые значения всех показателей определяются до момента начала реализации проекта. В то же время, если в ходе реализации проекта обнаруживается отклонение фактических значений показателей освоенного объема от плановых или изменение суммарного объема и т.д., то задачи (7)-(10) могут решаться «заново» с учетом имеющейся информации. При этом техника решения останется без изменений, изменятся лишь «начальное» значение времени (оно будет равно не нулевому, а текущему), «начальное» значение освоенного объема (оно также будет равно не нулевому, а текущему) и т.д. Другими словами, задачи оптимизации параметров проекта (задачи оптимального планирования), рассмотренные в настоящем разделе, без значительных модификаций могут решаться в ходе реализации проекта (как задачи оперативного управления) с учетом накопленной информации.

Второй вывод заключается в следующем. Если на этапе планирования имелась неопределенность относительно состояния природы, то в ходе реализации проекта при решении задач оперативного управления эта неопределенность может снижаться за счет имеющейся информации об истории реализации проекта. Для этого при решении соответствующих оптимизационных задач может использоваться хорошо развитая техника идентификации [62, 99], в частности – методы стохастической аппроксимации, дифференциальных и повторяющихся игр и т.д. [73, 83, 97, 98, 143] (см. также раздел 1.2).

И, наконец, в третьих, в качестве гипотезы можно предположить, что при представлении проекта в виде комплекса зависимых операций оптимизационные задачи для показателей освоенного объема операций могут формулироваться и решаться по аналогии с рассмотренными выше задачами. В пользу этой гипотезы, в частности, говорит тот факт, что в теории сетевого планирования и управления на сегодняшний день накоплен богатый опыт теоретического решения и практической реализации (в виде прикладных компьютерных программ) подобного рода задач. Более подробно задачи агрегирования (при представлении проекта в виде комплекса взаимосвязанных операций) показателей освоенного объема рассматриваются в разделе 1.4.

Поэтому можно считать, что в рамках рассматриваемой модели для задач планирования и оперативного управления проектом в условиях полной информированности существуют эффективные методы решения[1].

1.4. Методы агрегирования показателей освоенного объема

В разделах 1.1–1.3 рассматривалось описание проекта в целом в терминах показателей освоенного объема. Агрегированное описание проекта в виде одной операции является первым шагом в создании практически любой [8, 9, 13, 14, 18, 20, 23, 35, 44, 57 и др.] модели управления проектом. Однако большинство реальных проектов имеют сложную структуру и включают множество операций, зависимости между которыми могут иметь достаточно сложный вид. Различные представления сложных проектов в виде комплексов зависимых операций можно найти в [14, 37, 39 и др.]. Более того, появление и интенсивное развитие сетевого планирования и управления (СПУ) обусловлено именно необходимостью учета зависимостей между операциями.

На сегодняшний день в теории СПУ накоплен богатый опыт анализа и синтеза сетевых моделей проектов (начиная от простейших, учитывающих технологические связи при оптимизации времени выполнения проекта [20, 25 и др.], и заканчивая обобщенными сетевыми моделями, представляющими мощный и гибко настраиваемый инструмент анализа, позволяющий учитывать

---

[1] *Отдельный вопрос заключается в том, насколько полно на сегодняшний день эти методы реализованы в существующих методических и программных средствах управления проектами, однако исследование этого вопроса выходит за рамки настоящей работы (см. также раздел 3.1).*

множество типов зависимостей, учитывать неопределенность и решать широкий спектр оптимизационных задач [33, 34]), которые реализованы в виде пакетов прикладных программ.

Одной из основных задач, решаемых при построении модели проекта является задача агрегирования, то есть задача представления комплекса операций в виде комплекса с меньшим числом операций. Необходимость агрегирования очевидна – в крупных проектах менеджеры высшего звена не имеют возможности обрабатывать (даже в условиях автоматизации) информацию о всех деталях выполнения отдельных операций нижнего уровня. Однако агрегирование (как любое сжатие информации [8, 32, 65, 76]) приводит к потерям, которые отрицательно сказываются на эффективности управления. Поэтому задачу агрегирования качественно можно сформулировать как задачу поиска оптимального (или рационального) компромисса между уменьшением информационной нагрузки на управляющие органы и снижением эффективности управления, вызванным недостаточностью информации. Общие подходы к решению проблем агрегирования при решении задач управления иерархическими системами рассмотрены в [76]. В настоящем разделе рассматриваются детальное и агрегированное описание комплекса операций в терминах показателей освоенного объема, формулируется проблема агрегирования и предлагаются подходы к ее решению для ряда частных случаев.

Так как и проект в целом, и каждая из составляющих его операций могут быть описаны основными и производными показателями освоенного объема (см. раздел 1.2), то основной акцент следует сделать на установление взаимосвязи между этими показателями. Поэтому предположим, что проект состоит из n операций (см. рисунок 11), каждая из которых характеризуется следующими основными показателями освоенного объема:

X_{0i} – суммарный объем i-ой операции, $i \in I = \{1, 2, \ldots, n\}$;

C_{0i} – планируемые суммарные затраты на операцию;

$T_{0i}^{\text{Н}}$ – планируемое время начала операции;

$T_{0i}^{\text{К}}$ – планируемое время окончания операции;

$T_{0i} = T_{0i}^{\text{К}} - T_{0i}^{\text{Н}}$ - планируемая продолжительность операции;

$x_{0i}(t)$ – планируемая динамика объемов работ по операции;

$c_{0i}(t)$ – планируемая динамика затрат на операцию;

$T_i^{\text{Н}}$ – фактическое время начала операции;

$T_i^{\text{К}}$ – фактическое время окончания операции;

$x_i(t)$ - освоенный объем операции;

$c_i(t)$ – фактическая динамика затрат на операцию;

$T_i = T_i^{\text{К}} - T_i^{\text{Н}}$ - фактическая продолжительность операции;

C_i – фактические суммарные затраты на операцию.

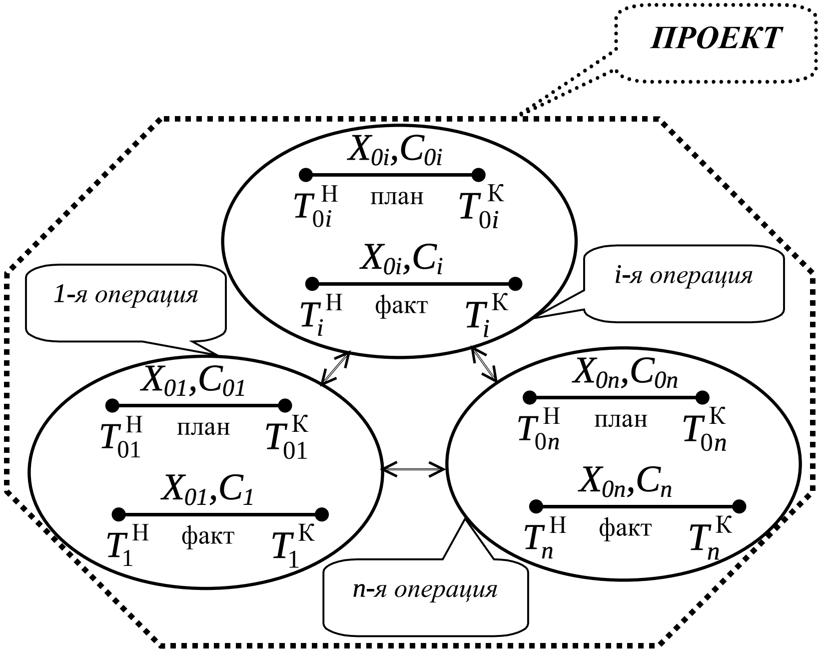


Рис. 11. Представление проекта в виде комплекса операций

<u>Параметр операции (интенсивность)</u>: $w_i(u_i)$, или в более общем случае – $w_i(x_i(t), u_i(t), t)$, определяет скорость изменения объема: $\dfrac{dx_i(t)}{dt} = w_i(u_i(t))$ или в более общем случае $\dfrac{dx_i(t)}{dt} = w_i(x_i(t), u_i(t), t)$, $x_i(T_i^{\text{Н}}) = 0$, $x_i(T_i^{\text{К}}) = X_{0i}$.

Все производные показатели освоенного объема для операций вводятся по аналогии с производными показателями проекта в целом (см. раздел 1.2):

$Dc_i(t) = c_{0i}(t) – c_i(t)$ - разность между плановыми и фактическими затратами на операцию;

$Dx_i(t) = x_{0i}(t) – x_i(t)$ - разность между плановым и освоенным объемом операции;

$a_i(t) = x_i(t) / x_{0i}(t)$ – показатель освоенного объема, характеризует выполнение плана по объему;

$b_i(t) = c_i(t) / c_{0i}(t)$ – показатель динамики затрат, характеризует соответствие поступления средств директивному графику;

$g_i(t) = x_i(t) / c_i(t)$ – эффективность использования средств;

$t_{ci}(t) = t - c_{0i}^{-1}(c_i(t))$ – текущая задержка по затратам;

$t_{xi}(t) = t - x_{0i}^{-1}(x_i(t))$ – текущая задержка по объему;

$e_{0i} = X_{0i} / C_{0i}$ – плановая эффективность операции;

$e_{0i}(t) = x_{0i}(t) / c_{0i}(t) = b_i(t)\, g_i(t) / a_i(t)$ – плановая эффективность использования средств;

$e_i = X_i / C_i$ – фактическая эффективность операции.

Агрегирование показателей освоенного объема.

При агрегировании временных (t – «физическое» время) и финансовых показателей проблем, как правило, не возникает:

$T_0^{\text{Н}} = \min\limits_{i=\overline{1,n}} T_{0i}^{\text{Н}}$ - планируемое время начала проекта (в агрегированном описании проекта, как правило, считается, что $T_0^{\text{Н}} = 0$);

$T_0^{\text{К}} = \max\limits_{i=\overline{1,n}} T_{0i}^{\text{К}}$ - планируемое время окончания проекта;

$T^{\text{Н}} = \min\limits_{i=\overline{1,n}} T_i^{\text{Н}}$ - фактическое время начала проекта;

$T^{\text{К}} = \max\limits_{i=\overline{1,n}} T_i^{\text{К}}$ - фактическое время окончания проекта;

$C_0 = \sum\limits_{i=1}^{n} C_{0i}$ – планируемые суммарные затраты на проект;

$C = \sum_{i=1}^{n} C_i$ – фактические суммарные затраты на проект;

$c_0(t) = \sum_{i=1}^{n} c_{0i}(t)$ – планируемая динамика затрат на проект;

$u_0(t) = c_0'(t) = \sum_{i=1}^{n} c_{i0}'(t) = \sum_{i=1}^{n} u_{0i}(t)$ – плановая динамика потребления ресурсов;

$c(t) = \sum_{i=1}^{n} c_i(t)$ – фактическая динамика затрат на проект

$u(t) = c'(t) = \sum_{i=1}^{n} c_i'(t) = \sum_{i=1}^{n} u_i(t)$ – фактическая динамика потребления ресурсов.

Рассмотрим агрегирование показателей освоенного объема. Введем оператор агрегирования $Q(\cdot)$: $\Re_+^n \rightarrow \Re_+^1$ освоенного объема, то есть будем считать что освоенный объем проекта в целом определяется[1] по освоенным объемам операций следующим образом: $x(t) = Q(x_1(t), x_2(t), \ldots, x_n(t))$.

Предположим, что оператор агрегирования $Q(\cdot)$ обладает следующими свойствами (их содержательные интерпретации очевидны):

1. Непрерывность по всем переменным.
2. Монотонность по всем переменным.
3. $Q(0, 0, \ldots, 0) = 0$, $Q(X_{01}, X_{02}, \ldots, X_{0n}) = X_0$.

Введенные предположения о свойствах оператора агрегирования необременительны и им удовлетворяет множество различных операторов. Примером может служить вычисление среднего арифметического[2] агрегируемых переменных и т.д.

---

[1] *Следует отметить, что выбор того или иного оператора $Q(\cdot)$ должен быть обусловлен спецификой рассматриваемого проекта и, в первую очередь, учитывать именно ее. Другими словами, можно условно считать, что в каждом конкретном случае вид оператора агрегирования задан «объективно».*

[2] *Использование в качестве операторов агрегирования взвешенных сумм показателей освоенного объема операций оправданно в случае, когда*

Пример 2 . Рассмотрим описание проекта как комплекса операций, для которых в качестве освоенного объема используется показатель процента выполнения (см. введение): $l_i(t) = x_i(t) / X_{0i}$ ($L_{0i} = 1$), тогда $l_i(T_i^{\text{Н}}) = 0$, $l_i(T_i^{\text{К}}) = 1$, $i \in I$.

Введем следующие требования, которым должен удовлетворять оператор агрегирования процентов выполнения:

1. Непрерывность по всем переменным.
2. Монотонность по всем переменным.
3. $Q(0, 0, \ldots, 0) = 0$, $Q(X_{01}, X_{02}, \ldots, X_{0n}) = 1$.
4. $\max\limits_{i=1,n} x_i(t) \geq Q(x_1(t), x_2(t), \ldots, x_n(t)) \geq \min\limits_{i=1,n} x_i(t)$.
5. Условие единогласия: $\forall\, y \in [0; 1]$ $Q(y, y, \ldots, y) = y$.

Примерами операторов агрегирования процентов выполнения, удовлетворяющих приведенным пяти требованиям, могут служить: вычисление максимума, минимума, взвешенных сумм (включая, естественно, вычисление среднего арифметического) и т.д., то есть все операции, которые используются для процентов выполнения (см. введение).

Например, если $Q(\cdot) = \sum\limits_{i=1}^{n} a_i l_i$, $a_i > 0$, $\sum\limits_{i=1}^{n} a_i = 1$, то $Q(\cdot)$: $[0; 1]^n \to [0; 1]$, а интенсивность выполнения проекта в целом определяется следующим образом: $w(t) = \sum\limits_{i=1}^{n} \dfrac{a_i}{X_{0i}} w_i(u_i(t))$. •

Таким образом, следуя определению, приведенному в [4, 18, 20], под агрегированным описанием проекта будем понимать его представление в виде агрегированной операции[1] объема X_0 и зависимостью $w(u(t))$ скорости изменения освоенного объема от количества ресурсов.

работы, выполняемые в рамках различных операций однородны или, как минимум, сравнимы. А таким свойством они обладают, так как одним из принципов разработки WBS-структуры является сравнимость пакетов работ, а освоенные объемы, как правило, оцениваются именно за пакеты работ.

[1] *В более общем случае агрегированное описание проекта – его представление в виде комплекса с меньшим числом операций* [8].

Значит, если задан оператор агрегирования, то проект в целом может описываться двумя способами. Первый способ заключается в использовании агрегированного описания, при котором связь между освоенным объемом и использованными ресурсами имеет вид:

(1) $\frac{dx(t)}{dt} = w(u(t))$, $x(T^H) = 0$, $x(T^K) = X_0$.

При этом количество ресурса, используемого в проекте в целом равно сумме ресурсов, используемых в каждой из составляющих его операций (см. выше):

(2) $u(t) = \sum_{i=1}^{n} u_i(t)$.

Второй способ – использование оператора агрегирования освоенных объемов операций для определения скорости выполнения проекта в целом:

(3) $\frac{dx(t)}{dt} = \sum_{i=1}^{n} \frac{\partial Q(x_1, x_2, ..., x_n)}{\partial x_i} w_i(u_i(t))$.

Понятно, что эффективность управления (например, значения критериев, оптимизируемых в рамках задач оптимального управления, рассмотренных в разделе 1.3) в случае агрегированного описания проекта не выше, чем в случае детального его описания. Следовательно, возникает вопрос – при использовании каких классов агрегированных описаний потери в эффективности управления, вызванные наличием агрегирования, будут равны нулю.

Задача идеального (по времени выполнения проекта) агрегирования заключается в следующем.

Пусть известны все параметры операций и заданы: оператор агрегирования $Q(\cdot)$ и класс ограничений X на затраты $c(t)$ (или класс ограничений U на количество ресурсов, выделенных для реализации проекта в целом). Обозначим $t_{min}(c(t))$ – минимальная продолжительность комплекса операций как решение задачи оптимального распределения ресурсов между операциями. Обозначим $T_{min}(c(t)) \geq t_{min}(c(t))$ – минимальное время реализации проекта при представлении его в агрегированном виде.

Величина

(4) $e_T(c(t))$ = $\left|1 - \frac{t_{\min}(c(t))}{T_{\min}(c(t))}\right|$ Î [0; 1]

называется ошибкой агрегирования по времен выполнения проекта. Агрегирование, при котором максимальная (по классу X ограничений на затраты или по классу U ограничений на ресурсы) из ошибок агрегирования: $e_T = \max\limits_{c(t) \in \Xi} e_T(c(t))$ равна нулю, называется идеальным[1] в классе X (в классе U).

Если нулевое значение ошибки агрегирования e_T недостижимо, то есть идеальное агрегирование невозможно, то задача агрегирования заключается в поиске допустимого оператора агрегирования, минимизирующего эту ошибку.

Аналогичным образом определяется агрегирование, идеальное с точки зрения объема ресурсов, упущенной выгоды и других критериев.

Задача идеального (по финансовым показателям) агрегирования заключается в следующем.

Обозначим $k_{max}(u(t))$ ($k_{max}(w(t))$) – максимальное значение критерия $k(\cdot)$ финансовой эффективности для комплекса операций как решение задачи оптимального распределения ресурсов (интенсивностей) – соответственно случаям 2.1 и 2.2, описанным в разделе 1.3, между операциями, $K_{max}(u(t))$ ($K_{max}(w(t))$) – соответствующее максимальное значение критерия финансовой эффективности проекта при представлении его в агрегированном виде. Величина

(5) $e_C(u(t))$ = $\left|1 - \frac{K_{\max}(u(t))}{k_{\max}(u(t))}\right|$

---

[1] *В работе [76], посвященной исследованию многоуровневых активных систем, идеальным было предложено называть агрегирование, при котором эффективность управления в многоуровневой АС с агрегированием по модели или по состоянию равна эффективности управления в соответствующей АС с полной информированностью центра о моделях активных элементов и подсистем. Таким образом, критерием "качества агрегирования" выступает эффективность управления.*

($e_C(w(t))$ = $\left|1-\dfrac{K_{\max}(w(t))}{k_{\max}(w(t))}\right|$) называется ошибкой агрегирования по финансовым показателям. Агрегирование, при котором максимальная (по классу U ограничений на ресурсы или, соответственно, по классу W ограничений на интенсивности) из ошибок агрегирования: $e_C = \max\limits_{u(t)\in U} e_C(u(t))$ ($e_C = \max\limits_{w(t)\in W} e_C(w(t))$ равна нулю, называется идеальным в классе U (соответственно, в классе W).

Подчеркнем, что утверждение о том, что некоторый оператор агрегирования является идеальным требует конкретизации: во-первых, ошибка агрегирования по какому из параметров (время, ресурсы и т.д.) равна нулю, и, во-вторых, при каком классе ограничений (на ресурсы, время и т.д.) рассматривается агрегирование.

Исследованию проблемы идеального агрегирования в литературе по управлению проектами и СПУ посвящено значительное число работ [8, 18, 23, 96]. Опишем кратко некоторые из результатов.

Предположим, что операции технологически независимы, то есть каждая из них может начинаться в любой момент времени, независимо от состояния других операций, и рассмотрим задачу распределения ресурсов между операциями с целью минимизации времени выполнения проекта.

Если количество ресурса постоянно во времени ($\sum\limits_{i=1}^{n} u_i(t) = U_{max}$) и $w_i(\cdot)$ – вогнутые функции, то:

- каждая операция выполняется с постоянным уровнем ресурса (постоянной скоростью);
- все операции заканчиваются одновременно [13, 14].

Если обозначить w_i^* - оптимальные (постоянные) скорости операций, то получим, что $w_i^* = X_{0i} / T$, $u_i = w_i^{-1}(X_{0i} / T)$, то есть минимальное время выполнения проекта определяется из следующего уравнения:

(6) $\sum\limits_{i=1}^{n} w_i^{-1}(w_i^*) = U_{\max}$.

В [18] рассмотрен случай, когда $\sum_{i=1}^{n} u_i(t) \leq U_{max}(t)$, где $U_{max}(t)$ – кусочно-постоянная функция. Там же показано, что, если функции интенсивностей не являются вогнутыми, то возможно построение множества, являющегося выпуклой оболочки множества пар «ресурсы - интенсивность», граница которого – вогнутая функция, для которой применимы приведенные выше результаты. В [14, 18] доказано, что идеальное агрегирование возможно, если $w_i(\cdot)$ – степенные функции[1].

Таким образом, в рамках методики освоенного объема возникают несколько классов задач агрегирования показателя освоенного объема по различным критериям – времени реализации проекта и финансовым показателям.

В заключение настоящей главы отметим, что до сих пор, рассматривая проект в целом, мы стояли на позициях оперирующей стороны – руководителя проекта, то есть учитывали в рассматриваемых моделях ту информацию, которой он обладает на момент принятия решений. При этом считалось, что основные показатели освоенного объема связаны некоторыми соотношениями (системой дифференциальных уравнений и т.д.), то есть сам проект с точки зрения руководителя проекта описывался как пассивная система.

На практике дело обстоит сложнее. Участники проекта – сам руководитель проекта, исполнители, поставщики и др. обладают свойством активности, то есть действуют в соответствии с собственными целями и интересами. Поэтому в модели проекта, помимо неопределенности о состоянии природы (которая может учитываться и устраняться полностью или частично путем применения процедур идентификации, вычисления гарантированных и/или ожидаемых значений в рамках пассивной модели), необходимо учитывать свойство активности управляющего органа и управляемых субъектов.

Перечисленные проблемы и задачи обуславливают последовательность дальнейшего изложения материала настоящей работы.

---

[1] *Следует отметить, что случай степенных интенсивностей является хрестоматийным примером, в котором агрегирование является идеальным [8, 9, 18, 21, 76, 110].*

Умея решать задачи оперативного управления для проекта в целом и для комплекса операций (результаты первой главы), а также оценив потери эффективности, вызванные переходом к агрегированному описанию проекта в рамках методики освоенного объема, можно рассматривать задачу синтеза механизмов оперативного управления проектами с учетом факторов активности участников и агрегированного описания, что и делается во второй главе настоящей работы.

Так как одной из важнейших характеристик проекта является время его завершения, то во второй главе в основном рассматриваются такие механизмы оперативного управления проектами, в которых основной акцент делается именно на снижение продолжительности проекта, точнее – на обеспечение совпадения его плановой и фактической продолжительности. С этой целью рассматриваются задачи оценки времени завершения проекта на основании мнений экспертов (механизмы экспертизы – раздел 2.1); задачи мотивации исполнителей, то есть побуждения их к сокращению продолжительности проекта, в том числе с учетом неопределенности того или иного типа или вида (механизмы стимулирования – раздел 2.2); задачи определения оптимальных значений параметров проекта (в том числе – параметров системы стимулирования) на основании информации, сообщаемой исполнителями руководителю проекта (механизмы планирования – раздел 2.3).

Глава 2. Механизмы оперативного управления проектами

Во второй главе настоящей работы рассматриваются три обширных класса механизмов управления проектами, учитывающих активность как управляющего органа, так и управляемых субъектов, и нацеленных, в основном, на оптимизацию такой важнейшей характеристики проекта как фактическое время[1] его завершения.

Первым классом механизмов, рассматриваемым в разделе 2.1, являются механизмы получения информации о возможной продолжительности проекта от лиц (экспертов), обладающих большей информацией по этому вопросу, чем руководитель проекта. Если эксперты заинтересованы в результатах экспертизы, то возникает проблема манипулируемости (целенаправленного искажения ими сообщаемой информации), решение которой для случая сообщения экспертами скалярных оценок описано в [15]. Однако, во многих случаях эксперту проще сформулировать свое мнение в нечетком виде, поэтому ниже рассматриваются нечеткие механизмы активной экспертизы, оперирующие нечеткими мнениями экспертов.

Вторым классом механизмов, рассматриваемым в разделе 2.2, являются механизмы стимулирования, в которых решается задача синтеза поощрений исполнителей, при которых они были бы готовы сократить продолжительность проекта на оптимальную с точки зрения проект-менеджера (с учетом затрат на стимулирование исполнителей) величину. Помимо изучения детерминированных моделей, то есть моделей проектов (рассматриваемых как активные системы), функционирующих в условиях полной информированности, ниже рассматриваются задачи управления продол-

---

[1] *В теории сетевого планирования и управления (СПУ) ключевым понятием является понятие критического пути, поэтому когда речь идет о сокращении продолжительности проекта, в первую очередь необходимо сокращать критические операции, причем величина сокращения, очевидно, не должна превышать минимальный из резервов околокритических операций. Следовательно, можно рассматривать по отдельности задачи сокращения каждой из критических операций, то есть в рамках методологии СПУ достаточно ограничиться рассмотрением набора одноэлементных задач управления (в терминологии теории активных систем [22]).*

жительностью проекта за счет использования механизмов мотивации в условиях неопределенности.

Одним из способов снижения неопределенности является сообщение информации от более информированных участников системы менее информированным. На основании сообщенной исполнителями руководителю проекта информации последний определяет значения управляющих параметров, то есть использует механизмы планирования, рассматриваемые в разделе 2.3. Для механизмов планирования исследуется задача манипулируемости и показывается, что использование механизмов с сообщением информации, даже в условиях манипулирования со стороны исполнителей, не снижает эффективности управления.

2.1. Механизмы нечеткой активной экспертизы

Под механизмом активной экспертизы понимается следующая модель [15, 17, 21, 43, 76]. Пусть имеются n активных элементов (АЭ) – экспертов [60, 61], каждый из которых имеет собственные представления r_i Î $[d; D]$ Í $Â^1$ (r_i является точкой пика однопиковой [22, 78] функций предпочтения i-го АЭ) об оцениваемой скалярной величине и сообщает центру информацию s_i Î $[d; D]$, i Î $I = \{1, 2, \ldots, n\}$ о своих предпочтениях. Результат экспертизы (итоговое мнение, коллективное решение и т.д.) x Î $[d; D]$ определяется в соответствии с процедурой планирования $p(s)$, то есть $x = p(s)$, где $s = (s_1, s_2, \ldots, s_n)$ – вектор сообщений экспертов.

Относительно процедуры планирования предполагают:

А.2.1. $p(\cdot)$ - непрерывна, строго монотонно возрастает по всем переменным и удовлетворяет условию единогласия: " z Î $[d; D]$ $p(z, z, ..., z) = z$.

Без потери общности можно положить $d = 0, D = 1$.

Если предположить, что каждый из экспертов заинтересован в том, чтобы результат экспертизы был максимально близок к его мнению, то в общем случае он будет сообщать недостоверную информацию, стремясь повлиять на результат в требуемую с его точки зрения сторону. Следовательно, возникает проблема манипулируемости механизма активной экспертизы.

В работе [15] доказано, что для любого механизма экспертизы, удовлетворяющего введенным выше предположениям, существует эквивалентный прямой (неманипулируемый) механизм, причем итоговое мнение в равновесии определяется совокупностью истинных мнений (иногда называемых их идеальными точками) экспертов $r = \{r_i\}$ и числами $n(p) = \{n_i(p)\}_{i=0}^{N}$, определяемыми следующим образом: если собственные представления всех экспертов различны и упорядочены в порядке возрастания, то

(1) $n_k(p) = p\,(\underbrace{0,0,\ldots,0}_{k}, \underbrace{1,1,\ldots,1}_{n-k}),\ k = \overline{0,n}$.

При этом равновесное итоговое мнение (коллективное решение) x^* определяется [15]:

(2) $x^*(r, n(p)) = \max\limits_{k=\overline{1,n}} \min\,(n_{k-1}, r_k)$.

Понятно, что последовательность $n(p)$ зависит от упорядочения идеальных точек экспертов. В общем случае существует 2^n разбиений вида (1), однако, так как (2) является соответствующим механизму p прямым механизмом, все рассуждения можно проводить для некоторого фиксированного упорядочения.

Кроме того, в настоящем разделе мы ограничимся анонимными механизмами активной экспертизы, то есть механизмами, симметричными относительно перестановок АЭ. Если механизм экспертизы является анонимным, то разбиение (1) единственно и не зависит от упорядочений истинных мнений экспертов.

Определим линейный механизм активной экспертизы [76]:

(3) $p_L(s) = \sum\limits_{k=1}^{n} a_k s_k$,

где $a_k \geq 0$, $\sum\limits_{k=1}^{n} a_k = 1$. Последовательность (1) для линейного механизма имеет вид:

(4) $n_k(p_L) = 1 - \sum\limits_{i=1}^{k} a_i,\ k = \overline{1,n},\ n_0(p_L) = 1$.

Очевидно, у любого анонимного механизма последовательность $n(p)$ разбивает отрезок [0; 1] на N равных частей, в частности - у анонимного линейного механизма экспертизы $a_i = 1/N$. В работе [76] для анонимных механизмов экспертизы доказано, что в многоуровневых АС они допускают произвольную децентрализацию. Кроме того, в упомянутой работе доказано, что для любого механизма экспертизы в двухуровневой АС существует эквивалентный линейный механизм экспертизы, причем при доказательстве этого факта устанавливается следующая взаимосвязь между исходным (нелинейным) механизмом экспертизы и соответствующим ему линейным механизмом:

(5) $a_k = n_{k-1} - n_k,\ k = \overline{1, n}$,

и любой механизм вида (3), являющийся механизмом экспертизы, удовлетворяет $a_k > 0, k = \overline{1, n}$, и для любого механизма экспертизы все элементы последовательности $n(p)$, определяемой (1), различны.

При нечетном числе экспертов анонимный механизм активной экспертизы является оптимальным (в смысле погрешности процедуры принятия решений в ситуации равновесия относительно базовой процедуры) в классе линейных механизмов [76], и, следовательно (см. выше), в классе произвольных механизмов экспертизы с соответствующим фиксированным упорядочением истинных мнений экспертов.

Таким образом, мы привели известные результаты исследования механизмов активной экспертизы, позволяющие определять равновесие и описывающие свойства линейных механизмов (см. (1)-(5)). Важным свойством анонимных механизмов экспертизы является то, что при их исследовании достаточно ограничиться изучением линейных механизмов экспертизы с одинаковыми весами всех экспертов.

Перейдем к рассмотрению нечетких механизмов активной экспертизы, то есть механизмов, в которых сообщения экспертов нечеткие. Для этого, в первую очередь, требуется определить, что понимается под равновесием Нэша в случае, когда стратегии игроков нечеткие. Напомним, что в четком случае $s^* \in S$ – равновесие Нэша, тогда и только тогда, когда выполнено:

(6) $\forall\ i \in I\ \ \forall\ s_i \in S_i\ \ f_i(s_i^*, s_{-i}^*) \geq f_i(s_i, s_{-i}^*)$,

где $f_i(s)$ – целевая функция i-го АЭ, $s = (s_1, s_2, \ldots, s_n)$ – вектор сообщений, $s_{-i} = (s_1, s_2, \ldots, s_{i-1}, s_{i+1}, \ldots, s_n)$ – обстановка игры для i-го АЭ.

Обозначим $P(p)$ – множество четких равновесий Нэша. В [15, 76] доказано, что $P(p) \neq \emptyset$.

Пусть функции выигрыша игроков f_i : X ® $\hat{A}^1$ и механизм планирования $p : S$ ® X четкие, а сообщения АЭ нечеткие. Обозначим[1] $\tilde{S}_i$ - множество всех нечетких подмножеств множества S_i, i $\hat{I}$ I, $\tilde{S}$ - множество всех нечетких подмножеств множества S.

Стратегией i-го АЭ является нечеткое сообщение $\tilde{s}_i \in \tilde{S}_i$ с функцией принадлежности $m_{\tilde{s}_i}(s_i)$. Построим функцию принадлежности $m_{\tilde{s}}(s)$ вектора $\tilde{s}$ $\hat{I}$ $\tilde{S}$ [81, 82]:

(7) $m_{\tilde{s}}(s) = \min\limits_{i \in I} \{ m_{\tilde{s}_i}(s_i) \}$.

Обозначим $S(x) = \{s$ $\hat{I}$ $S \mid p(s) = x\}$, $\tilde{X}$ - множество всех нечетких подмножеств множества X. Тогда в соответствии с принципом обобщения [82] при нечетких сообщениях АЭ и четкой процедуре планирования коллективное решение $\tilde{x}$ будет нечетким подмножеством множества [0; 1] с функцией принадлежности $m_{\tilde{x}}(x)$, определяемой следующим образом:

(8) $m_{\tilde{x}}(x) = \sup\limits_{s \in S(x)} m_{\tilde{s}}(s)$.

Определим предпочтения экспертов на множестве $\tilde{X}$ нечетких коллективных решений. Образом нечеткого множества $m_{\tilde{x}}(x)$ при четком отображении f_i: X ® $\hat{A}^1$ будет нечеткое множество $\tilde{f}_i$ с функцией принадлежности $m_{\tilde{f}_i}(f_i)$, которая в силу принципа обобщения удовлетворяет:

(9) $m_{\tilde{f}_i}(f_i) = \sup\limits_{x \in X_i(f_i)} m_{\tilde{x}}(x)$,

где $X_i(z) = \{x$ $\hat{I}$ $X \mid f_i(x) = z\}$. Подставляя (7) и (8) в (9), получим:

(10) $m_{\tilde{f}_i}(f_i) = \sup\limits_{x \in X_i(f_i)} \sup\limits_{s \in S(x)} \min\limits_{i \in I} \{ m_{\tilde{s}_i}(s_i) \}$.

Выражение (10) есть функция принадлежности нечеткого выигрыша АЭ в ситуации игры $\tilde{s} = (\tilde{s}_1, \tilde{s}_2, \ldots, \tilde{s}_n)$.

---

[1] *Здесь и далее тильда обозначает нечеткость соответствующей переменной.*

В общем случае, когда предпочтения АЭ на множестве коллективных решений нечеткие, то есть заданы нечеткими отношениям предпочтения (НОП) $\widetilde{R}_i$ с функциями принадлежности $m_{\widetilde{R}_i}(x, y)$, x, y Î X, i Î I. Фиксируем для i-го АЭ нечеткую обстановку $\widetilde{s}_{-i}$, тогда (8) можно записать как $m_{\widetilde{x}}(x, \widetilde{s}_i, \widetilde{s}_{-i})$. Аналогично можно записать (10) как: $m_{\widetilde{f}_i}(f_i, \widetilde{s}_i, \widetilde{s}_{-i})$. Тогда обобщенное НОП i-го АЭ на множестве $\widetilde{S}_i$ есть [75, 82]:

$$(11)\ h_i(\widetilde{s}_i^1, \widetilde{s}_i^2, \widetilde{s}_{-i}) = \sup_{x_1, x_2 \in X} \min\{ m_{\widetilde{x}}(x_1, \widetilde{s}_i^1, \widetilde{s}_{-i}), m_{\widetilde{x}}(x_1, \widetilde{s}_i^2, \widetilde{s}_{-i}),\ m_{\widetilde{R}_i}(x_1, x_2)\}.$$

Имея НОП (11) можно по аналогии с тем как это делается в [82] построить для каждого АЭ множество максимально недоминируемых при данной обстановке альтернатив, а затем воспользоваться (6) для определения нечеткого равновесия Нэша. Такой путь возможен, но трудоемок, поэтому вспомним, что в рассматриваемой модели предпочтения АЭ четкие, и вернемся к выражению (10).

Введем на множестве $\widetilde{S}_i$ отношение « $\mathbf{f}_{\widetilde{s}_{-i}}$ » доминирования стратегий: при фиксированной остановке $\widetilde{s}_{-i}$ игры $\widetilde{s}_i^2\ \mathbf{f}_{\widetilde{s}_{-i}}\ \widetilde{s}_i^1$ тогда и только тогда, когда:

(12) '' f_i^1 \$ f_i^2: f_i^2 ³ f_i^1 и $m_{\widetilde{f}_i}(f_i^1, \widetilde{s}_i^1, \widetilde{s}_{-i})$ £ $m_{\widetilde{f}_i}(f_i^2, \widetilde{s}_i^2, \widetilde{s}_{-i})$.

Рациональным будем считать выбор активным элементом недоминируемой стратегии. Вектор недоминируемых стратегий назовем *нечетким равновесием Нэша*. Отметим, что в предельном случае – при переходе к четким стратегиям – введенное нечеткое равновесие Нэша совпадает с (6).

Обозначим $\widetilde{P}(p)$ – множество нечетких равновесий Нэша. Очевидно, что выполнено $P(p) \subseteq \widetilde{P}(p)$, то есть $\widetilde{P}(p)$ ¹ Æ.

Введем следующее предположение:

А.2.2. Функции выигрыша АЭ строго однопиковые с точками пика r_i; нечеткие множества $\tilde{s}_i$, $i \in I$, нормальны[1].

Теорема 2.1. В нечетком анонимном механизме активной экспертизы для любого АЭ и для любого равновесного по Нэшу его сообщения существует недоминируемое равновесное по Нэшу четкое сообщение.

Доказательство. В силу предположения А.2.2 множество $X_i(f_i)$ состоит не более чем из двух точек (и не менее, чем одной точки), которые мы обозначим $x_i^-(f_i)$ и $x_i^+(f_i)$, $x_i^-(f_i) \le x_i^+(f_i)$. Очевидно, что при этом выполнено:

$$\forall\ f_i^1 > f_i^2 \quad x_i^-(f_i^2) \le x_i^-(f_i^1) \le r_i \le x_i^+(f_i^1) \le x_i^+(f_i^2).$$

Выражение (9) при этом упрощается и принимает вид:

(13) $\mu_{\tilde{f}_i}(f_i) = \max \{ \mu_{\tilde{x}}(x_i^-(f_i)), \mu_{\tilde{x}}(x_i^+(f_i))\}$.

Пусть при нечеткой обстановке $\tilde{s}_{-i}$ для i-го АЭ существует нечеткая недоминируемая стратегия $\tilde{s}_i^*$. Сделаем ее четкой (произведем «дефаззификацию»), положив соответствующую функцию принадлежности $\mu_{\tilde{s}_i^*}(s_i)$ равной нулю всюду, за исключением точки, на которой достигается максимум в (12)-(13).

Получим четкую недоминируемую стратегию i-го АЭ. Аналогичным образом можно поступить по одиночке и для других АЭ, получив в итоге четкое равновесие Нэша типа (6), эквивалентное исходному. •

Следствием утверждения теоремы 2.1 является тот факт, что для любого АЭ и для любой его нечеткой стратегии всегда существует не худшая для него четкая стратегия. Поэтому, с одной стороны, можно утверждать, что допущение возможности сообщения экспертами нечеткой информации качественно не изменяет[2] структуру и свойства равновесных стратегий.

---

[1] *Нормальным называется нечеткое множество, максимальное значение функции принадлежности которого равно единице [82].*

[2] *С содержательной точки зрения нечеткое коллективное решение может давать лицу, принимающему решение (ЛПР), большую информацию, нежели чем четкое коллективное решение экспертов.*

С другой стороны, при нечетких сообщениях АЭ расширяется множество равновесных по Нэшу стратегий ($P(p) \subseteq \widetilde{P}(p)$), что порождает определенные трудности при построении соответствующего прямого механизма (см. также модель интервальной экспертизы ниже). Поясним последнее утверждение более подробно. Соответствующим исходному механизму $p(s)$, p: S ® X, прямым механизмов $h(r)$, h: $\hat{A}^n$ ® X, называется механизм [17, 78, 85], в котором АЭ сообщают центру информацию о своих точках пика, после чего центр вычисляет равновесные $s^*(r)$ в исходном механизме при данных точках пика заявки, то есть $h(r) = p(s^*(r)$. Если соответствующий прямой механизм неманипулируем, то есть в нем сообщение достоверной информации является равновесной стратегией каждого АЭ, то он называется эквивалентным прямым механизмом [78, 85].

Если для каждого профиля предпочтений (профилем предпочтений в случае однопиковых целевых функций называется вектор точек пика) в исходном (непрямом) механизме существует единственное равновесие Нэша (вектор равновесных по Нэшу сообщений АЭ), то это равновесие подставляется в соответствующий прямой механизм. Именно так дело обстоит в четком механизме активной экспертизы, в котором существует единственное равновесие Нэша и для которого можно построить эквивалентный прямой механизм.

Сложнее дело обстоит, когда существует несколько равновесий Нэша. В этом случае для задания соответствующего прямого механизма используют соответствие отбора равновесий, определяющее единственное для каждого профиля предпочтений равновесие в непрямом механизме. При этом возникают следующие трудности. Основная проблема заключается в том, что при практическом использовании соответствия отбора равновесий нет никакой гарантии, что АЭ выберут равновесие, отбираемое применяемым соответствием. Выходов из этой ситуации несколько: либо использование максимального гарантированного (по множеству равновесий при каждом профиле) результата, либо введение дополнительных гипотез о поведении АЭ (см. интервальные модели экспертизы ниже). В первом случае уменьшается эффективность управления, во втором требуется обоснование вводимых гипотез.

Таким образом, можно сделать следующий качественный вывод – при использовании механизмов нечеткой активной экспертизы увеличивается информация, поступающая к ЛПР, но, в то же время, возникает неопределенность относительно равновесных стратегий экспертов, снятие которой либо приводит к снижению эффективности данного механизма, либо требует дополнительной информации для введения обоснованных предположений о поведении экспертов. И тот и другой способ применимы далеко не во всех ситуациях, встречающихся на практике, поэтому наиболее прямолинейным способом решения проблемы множественности равновесий является отказ от нечеткости, то есть переход к четким механизмам экспертизы, в которых равновесие единственно.

Частным случаем механизмов нечеткой активной экспертизы является класс *механизмов интервальной активной экспертизы*, к описанию которых мы и переходим. Пусть каждый эксперт (активный элемент) сообщает центру отрезок $\tilde{s}_i = [s_i^-;\ s_i^+]$, где $0 \le s_i^- \le s_i^+ \le 1$, $i \in I$. Механизм интервальной экспертизы является частным случаем механизма нечеткой экспертизы, так как первому соответствует конкретная функция принадлежности:

$$(14)\quad m_{\tilde{s}_i}(s_i) = \begin{cases} 1, & s_i \in [s_i^-; s_i^+] \\ 0, & s_i \notin [s_i^-; s_i^+] \end{cases},\ i \in I.$$

При использовании анонимного механизма множество $S(x)$ имеет вид:

$$S(x) = \{s \in S \mid \sum_{i=1}^{n} s_i = nx\}.$$

Коллективное решение является интервалом с функцией принадлежности:

$$(15)\quad m_{\tilde{x}}(x) = \begin{cases} 1, & nx \in [\sum_{i=1}^{n} s_i^-; \sum_{i=1}^{n} s_i^+] \\ 0, & nx \notin [\sum_{i=1}^{n} s_i^-; \sum_{i=1}^{n} s_i^+] \end{cases}.$$

Интервальный выигрыш i-го АЭ имеет функцию принадлежности $m_{\tilde{f}_i}(f_i)$, определяемую следующим образом

$$(16)\ m_{\tilde{f}_i} = \begin{cases} 1, & nx_i^-(f_i) \in [\sum_{i=1}^{n} s_i^-; \sum_{i=1}^{n} s_i^+] \text{ или } nx_i^+(f_i) \in [\sum_{i=1}^{n} s_i^-; \sum_{i=1}^{n} s_i^+] \\ 0, & nx_i^-(f_i) \notin [\sum_{i=1}^{n} s_i^-; \sum_{i=1}^{n} s_i^+] \text{ и } nx_i^+(f_i) \notin [\sum_{i=1}^{n} s_i^-; \sum_{i=1}^{n} s_i^+] \end{cases}.$$

Построим равновесие Нэша. Пусть АЭ упорядочены в порядке возрастания их точек пика: $r_1 \le r_2 \le \ldots \le r_n$. Построим разбиение отрезка [0; 1]: $W_i = [\frac{n-i}{n}; \frac{n-i+1}{n}]$, $i \in I$. По аналогии с четким случаем [15] можно утверждать, что если существует (а он если существует, то единственен) АЭ с номером k таким, что $r_k \in W_k$, то он является диктатором, то есть его тока пика будет принадлежать интервальному коллективному решению.

Обозначим $\Sigma_i^- = \sum_{j \ne i} s_j^-$, $\Sigma_i^+ = \sum_{j \ne i} s_j^+$. Структура равновесия Нэша $\tilde{s}^*$ и его свойства в рамках предположений А.2.1-А.2.2 даются следующей теоремой.

Теорема 2.2. 1) Если $\Sigma_i^- > nr_i$, то $\tilde{s}_i^* = [0; a]$, где a – произвольное число из отрезка [0; 1];

Если $\Sigma_i^+ + 1 < nr_i$, то $\tilde{s}_i^* = [a; 1]$, где a – произвольное число из отрезка [0; 1];

Если $nr_i \in [\Sigma_i^-; \Sigma_i^+ + 1]$, то $\tilde{s}_i^* = [a; b]$, где $a \le b$ и $a \in [0; \min\{nr_i - \Sigma_i^-; 1\}]$.

Доказательство теоремы 2.2 тривиально, так как заключается в проверке того, что построенные сообщения при фиксированной обстановке являются недоминируемыми, и опускается.

Следствие. В интервальном механизме активной экспертизы диктатором является АЭ с номером k (см. определение выше). Равновесные сообщения имеют следующий вид:

$$(17)\ \forall\ i < k\ \ \tilde{s}_i^* = [0; a],\ \forall\ i > k\ \ \tilde{s}_i^* = [b; 1],$$

а сообщение диктатора таково, что $r_k \in p(\tilde{s}^*)$.

Отметим, что в соответствии с результатом теоремы 2.2 одним из равновесий Нэша является сообщение всеми экспертами одинаковых сообщений, совпадающих с отрезком [0; 1] (см. выражение (17)), то есть всем интервалом возможных значений оцениваемой величины. Понятно, что подобные сообщения (являющиеся равновесными!) не несут для ЛПР никакой информации.

Основной качественный результат теоремы 2.2 заключается в том, что в интервальных механизмах активной экспертизы существует множество равновесий Нэша. Для уменьшения их числа необходимо вводить те или иные гипотезы о поведении АЭ или модифицировать механизм, например, ограничивать «ширину» отрезков, сообщаемых АЭ, и т.д.

Выше мы рассмотрели модель нечеткой активной экспертизы, в которой механизм планирования и целевые функции АЭ были четкими, а нечеткими могли быть сообщения АЭ. «Фаззифицировать» можно и другие параметры, например, механизм планирования и др. В качестве иллюстрации в заключение настоящего раздела кратко рассмотрим модель экспертизы, в которой все параметры за исключением предпочтений АЭ четкие.

Пусть $\tilde{R}_i$ – НОП i-го АЭ, i Î I, на множестве $X = [0; 1]$, имеющее функцию принадлежности $m_{\tilde{R}_i}(x, y)$, i Î I. Если стратегии АЭ и механизм планирования четкие, то четким является и результат экспертизы – коллективное решение.

Механизм планирования $p(\times)$ и НОП АЭ $\tilde{R}_i$ индуцируют на множестве $S_i = [0; 1]$ НОП $\tilde{Q}_i$ с функцией принадлежности $m_{\tilde{Q}_i}(s_i^1, s_i^2, s_{-i})$. При фиксированной обстановке игры s_{-i}, в частном случае, функцию принадлежности НОП $\tilde{Q}_i$ можно записать в виде: $m_{\tilde{Q}_i}(s_i^1, s_i^2, s_{-i}) = m_{\tilde{R}_i}(p(s_i^1, s_{-i}), p(s_i^2, s_{-i}))$. Значит НОП $\tilde{Q}_i$ является прообразом НОП $\tilde{R}_i$ при отображении $p(\times)$, то есть объединением всех нечетких множеств в S_i ´ S_i, образы которых при этом отображении лежат в нечетком множестве $m_{\tilde{Q}_i}$ (определение прообраза нечеткого множества для общего случая приведено в [82]).

Построим в S_i нечеткое подмножество недоминируемых альтернатив с функцией принадлежности

(18) $h_i(s_i, s_{-i}) = 1 - \sup\limits_{z \in S_i} [\, m_{\tilde{Q}_i}(z, s_i, s_{-i}) - m_{\tilde{Q}_i}(s_i, z, s_{-i}) \,]$.

Функцию (18) можно рассматривать как функцию выигрыша i-го АЭ и определять по ней нечеткое равновесие Нэша. В предельном случае (при переходе к четким предпочтениям АЭ) нечеткое равновесие Нэша переходит в четкое (см. выражение (6)).

2.2. Механизмы стимулирования

Рассмотрим задачу оперативного управления продолжительностью проекта. Пусть проект состоит из двух участников – руководителя проекта (центра в терминологии теории активных систем [22, 78]), осуществляющего управление проектом, и исполнителя (активного элемента (АЭ) в терминологии теории активных систем). Таким образом, проект рассматривается в виде активной системы (АС), имеющей следующую структуру.

Участники АС - менеджер проекта (центр) и исполнитель (АЭ). Центр выполняет планирующие, управляющие и контролирующие функции и несет ответственность за завершение проекта в директивные сроки с требуемым качеством и запланированными затратами. Активный элемент является исполнителем работ по проекту, то есть от его действий (и, быть может, от состояния природы – см. первую главу) зависят качество, сроки и т.д.

В качестве основного выберем такой показатель как время завершения проекта (см. также обсуждение во введении к данной главе). Если в процессе реализации проекта оказывается, что прогнозируемое время его завершения отличается от планового, то возникает необходимость в оперативном управлении – дополнительных мерах по сокращению продолжительности выполнения незавершенной части проекта. Реализация этих мер требует соответствующих затрат, то есть возникает задача определения оптимальных коррекционных воздействий, причем критерием эффективности, как правило, выступают финансовые показатели, зависящие как от продолжительности проекта (санкции и штрафы за задержку сроков завершения и т.д.), так и от затрат на выполнение проекта (см. примеры в первой главе).

При решении задачи управления центр должен учитывать активность АЭ, то есть вознаграждение исполнителя в зависимости от сокращения им сроков должно быть согласовано с его предпочтениями. В теории активных систем задачи согласования предпочтений и интересов изучаются при синтезе механизмов стимулирования [77, 79], поэтому рассмотрим постановку задачи стимулирования исполнителей, в которой критерием эффективности являются финансовые показатели центра, зависящие в свою очередь от продолжительности проекта.

Последовательность изложения материала настоящего раздела следующая. Сначала рассматривается задача стимулирования в детерминированной АС, то есть в АС, функционирующей в условиях полной информированности о существенных внешних и внутренних параметрах. Затем исследуются более сложные модели, учитывающие возможность наличия интервальной, вероятностной или нечеткой неопределенности. В качестве одного из способов снижения неопределенности предлагается также использовать механизмы с сообщением информации, которые подробно рассматриваются в следующем разделе.

2.2.1. Детерминированная АС (отсутствие неопределенности)

Будем считать, что известны плановое T_0 и прогнозируемое T времена завершения проекта (ограничимся наиболее распространенным на практике случаем T ³ T_0). Как отмечалось выше, рассматриваемая модель охватывает как задачи планирования (решаемые до начала реализации проекта), так и задачи оперативного управления, которые могут последовательно решаться в ходе реализации проекта по мере поступления новой информации – уточнения прогнозируемого времени завершения проекта и других параметров (см. модели в разделах 1.2. и 1.3, а также механизмы экспертного прогнозирования в разделе 2.1).

Предположим, что в случае задержки выполнения проекта центр выплачивает, например, заказчику или вышестоящей организации, штрафы $c(t)$, t ³ T_0 (в частном случае, например, штрафы могут быть линейны: $c(t) = c_0\, t$). Исполнитель имеет возможность сократить срок реализации проекта (относительно прогнозируемого) или, что то же самое – сократить продолжительность одной или нескольких критических операций, что требует от него определенных затрат[1] $c(y)$, где y Î A – время, на которое сокращается продолжительность проекта. Переменная y может интерпретироваться как действие АЭ – выбираемая им стратегия.

[1] *Следует подчеркнуть, что в настоящем и следующем разделе* $c(y)$ *– затраты исполнителя, но не затраты на проект (как это имело место во введении и первой главе)!*

Для того, чтобы побудить АЭ к выбору некоторой стратегии центр должен использовать соответствующую систему стимулирования, то есть назначить зависимость $s(y)$ вознаграждения АЭ от выбираемых им действий. Эта зависимость $s(\cdot) \in M$ называется функцией стимулирования (M – множество допустимых функций стимулирования).

Интересы участников проекта (активной системы) выражены их целевыми функциями. Будем считать, что рациональность поведения участников проекта заключается в стремлении к максимизации целевых функций. Более подробно, предположим, что центр заинтересован в том, чтобы минимизировать свои выплаты (суммарные выплаты по штрафам и стимулированию АЭ), то есть целевая функция центра $\Phi(s(\cdot), y)$ имеет вид:

(1) $F(s(\cdot), y) = s(y) + c(T - T_0 - y)$.

Целевая функция активного элемента $f(s(\cdot), y)$ представляет собой разность между стимулированием и затратами:

(2) $f(s(\cdot), y) = s(y) - c(y)$.

Введем следующие предположения:

А.2.3. $A = [0; T - T_0]$.

А.2.4. M – множество кусочно-непрерывных положительнозначных функций.

А.2.5. $c(y)$ – положительнозначная, монотонно возрастающая, строго выпуклая, непрерывно дифференцируемая функция, такая, что $c(0) = 0$.

В ходе всего изложения материала настоящего раздела, если не будет оговорено особо, будем предполагать, что выполнена гипотеза благожелательности (ГБ) – из множества реализуемых действий[1]

$$P(s) = Arg \max_{y \in A} f(y, s)$$

активный элемент выбирает действия, наиболее благоприятные для центра.

Последовательность функционирования следующая: центр сообщает АЭ функцию стимулирования, после чего АЭ при известной функции стимулирования выбирает свое действие. Следова-

---

[1] *Реализуемым некоторой системой стимулирования действием АЭ называется такое его допустимое действие, на котором достигается максимум его целевой функции* [78, 79].

тельно, задача центра заключается в выборе такой допустимой системы стимулирования, которая минимизировала бы значение его целевой функции при условии, что АЭ выбирает допустимое действие, максимизирующее его собственную целевую функцию:

$$(3)\ \begin{cases} \Phi(s\,(y^*),\, y^*) \to \min\limits_{s \in M,\, y^* \in [0;T-T_0]} \\ y^* \in Arg \max\limits_{y \in A} f(y) \end{cases}.$$

Задача (3) является игрой типа Γ_2 (в терминологии теории иерархических игр [38, 40, 56]) и может рассматриваться как детерминированная задача стимулирования второго рода (в терминологии теории активных систем [22, 78]). Ее решение дается следующей теоремой[1].

<u>Теорема 2.3.</u> Оптимальное решение $s^*(y)$ задачи (3) имеет вид:

$$(4)\ s^*(y) = \begin{cases} c(y^*), & y = y^* \\ 0, & y \neq y^* \end{cases},$$

где оптимальное действие АЭ y^* определяется следующим выражением:

$$(5)\ y^* = arg \min\limits_{y \in [0, T-T_0]} F(y).$$

При использовании центром системы стимулирования (4) (называемой в теории активных систем квазикомпенсаторной [22, 78, 79]), максимальное значение целевой функции равно нулю и принимает это значение в двух точках, то есть $P(s^*) = \{0\}$ È $\{y^*\}$.

В [78, 79] доказано, что оптимальной является такая допустимая система стимулирования, на которой достигается минимум затрат центра на стимулирование по реализации действий АЭ. Поэтому докажем, что система стимулирования (4)-(5) характеризуется минимальными затратами центра на стимулирование. Пусть существует система стимулирования $\tilde{s}$, такая, что y^* Î $P(\tilde{s})$, $\tilde{s}(y^*) < s^*(y^*)$. Условие реализуемости имеет вид:

---

[1] *В теории активных систем существует семейство теорем, дающих оптимальное решение задачи стимулирования в различных моделях АС* [22, 79]. *Поэтому теорема 2.3 может рассматриваться как результат применения этой общей методологии к конкретной модели оперативного управления продолжительностью проекта.*

$$'' \ y \ \hat{I} \ A \quad \tilde{s}\,(y^*) - c(y^*) \ ^3 \ \tilde{s}\,(y) - c\,(y).$$

Подставим в это условие $y = 0$. Получим: $\tilde{s}\,(y^*) - c(y^*) \ ^3 \ \tilde{s}\,(0)$. В силу введенных предположений $\tilde{s} < 0$, что противоречит А.2.4. •

<u>Пример 3.</u> В частном случае, когда штрафы центра линейны: $c(t) = c_0\, t$, действие (5) единственно (так как штрафы линейны, а функция затрат АЭ строго выпукла), следовательно на отрезке $[0;\ T - T_0]$ функция $\{c(y) - c_0\, y)\}$ достигает единственного максимума. Более того, оптимальное решение оказывается устойчивым по параметрам модели в следующем смысле.

Обозначим $x = c'^{\,-1}(c_0)$, где $c'^{\,-1}(\cdot)$ – функция, обратная производной функции затрат АЭ (она существует в силу А.2.5). Тогда оптимальное решение задачи (3) можно записать в виде:

$$(6)\ y^*(x) = \begin{cases} T - T_0, & T \le T_0 + x \\ x, & T \ge T_0 + x \end{cases}.$$

Содержательно, в случае линейных штрафов центру не обязательно знать «точную» оценку реального времени T завершения проекта (неизвестного и приближенно оцениваемого в ходе его реализации), если оптимистичная оценка задержки $T - T_0$ времени завершения проекта превышает величину x, которая зависит от внешних штрафов и функции затрат АЭ, то оптимальное с точки зрения внешних выплат центра сокращение продолжительности проекта «не зависит» от оценки будущей его продолжительности. •

Итак, мы рассмотрели задачу оптимизации продолжительности проекта за счет использования механизмов стимулирования в одноэлементной активной системе. Перейдем к описанию многоэлементного случая.

Пусть имеется многоэлементная АС с $n \ ^3 \ 1$ активными элементами, каждый из которых отвечает за соответствующую операцию (комплекс которых и составляет проект) и может сокращать ее продолжительность, независимо от продолжительности других операций. Обозначим $y_i \ ^3 \ 0$ – время сокращения i-ой операции, $i \ \hat{I} \ I$, где $I = \{1, 2, \ldots, n\}$ – множество АЭ.

Время сокращения продолжительности проекта DT зависит от порядка выполнения и технологической связи операций и является функцией от сокращений каждой из операций (как критических, так и околокритических), то есть: $DT = Y(y_1, y_2, \ldots, y_n)$. Получили многоэлементную активную систему со слабо связанными элементами [79].

Пусть центр решил n задач типа (3) – по одной для каждого АЭ. Результатом является набор $\{J_i(y_i)\}$ минимальных затрат центра на стимулирование по реализации[1] соответствующего вектора y действий АЭ: $y = (y_1, y_2, ,\ldots, y_n)$. Целевая функция центра имеет при этом вид:

$$F(y) = c(T - T_0 - Y(y)) - \sum_{i \in I} J_i(y_i).$$

Следовательно, задача стимулирования заключается в поиске такого допустимого ($y \in A' = \Re^n$) вектора действий АЭ, который минимизировал бы целевую функцию центра $F(y)$. Задача $F(y) \to \min\limits_{y \in A'}$ является стандартной задачей условной оптимизации.

В качестве ограничения множества допустимых действий АЭ может выступать, например, бюджетное ограничение: если фонд оперативного управления центра ограничен величиной R, то, очевидно, допустимыми будут такие действия, для которых имеет место: $A' = \{y \in \Re_n^+ \mid \sum\limits_{i \in I} J_i(y_i) \le R\}$.

В зависимости от технологической взаимосвязи показателей операций (см. раздел 1.4, посвященный проблемам агрегирования показателей освоенного объема) возможны различные зависимости $Y(\cdot)$. Например, если операции выполняются последовательно, то $\Delta T = \sum\limits_{i \in I} y_i$, если параллельно, то $\Delta T = \min\limits_{i \in I} y_i$ и т.д.

Проиллюстрируем использование предложенного похода к решению задач стимулирования в многоэлементных АС на следующем примере.

<u>Пример 4.</u> Предположим, что штрафы линейны, а бюджетное ограничение отсутствует и $\Delta T = \sum\limits_{i \in I} y_i$, тогда получаем набор

[1] *В случае оптимальности компенсаторных функций стимулирования минимальные затраты центра на стимулирование определяются затратами АЭ, то есть имеет место:* $J_i(y_i) = c_i(y_i)$, $i \in I$.

одноэлементных задач, в каждой из которых оптимально решение типа (6) с соответствующей функцией x_i(×) = $c_i^{'-1}$(×), i Î I.

Если $DT = \min\limits_{i \in I} y_i$, тогда, очевидно, что в оптимальном решении все АЭ должны завершить свои операции одновременно, то есть $ v ³ 0: " i Î I $y_i = v$. Следовательно, решение задачи стимулирования заключается в поиске такого значения скалярной величины v, которое минимизировало бы целевую функцию центра, то есть: $c(T - T_0 - v)$ - $\sum\limits_{i \in I} J_i(v)$ ® $\min\limits_{v \geq 0}$. Получили стандартную задачу скалярной оптимизации. Если штрафы линейны, то оптимальным оказывается следующее сокращение продолжительности проекта: $v^* = \left[\sum\limits_{i \in I} c_i^{'}(\cdot)\right]^{-1} (c_0)$. •

Итак, задача оперативного управления продолжительностью проекта в случае многоэлементной АС со слабо связанными АЭ сводится к параметрическому набору одноэлементных задач стимулирования и задаче поиска оптимальных значений параметров. Основную сложность при этом представляет решение одноэлементных задач[1], так как второй этап сводится к стандартной задаче условной или безусловной оптимизации. Поэтому при изучении задач стимулирования в условиях неопределенности мы ограничимся рассмотрением, в основном, одноэлементных задач.

Рассмотрев детерминированные задачи стимулирования, перейдем к рассмотрению задач оперативного управления продолжительностью проекта в условиях неопределенности.

---

[1] *Для случая сильно связанных АЭ игра АЭ может быть декомпозирована. При этом оптимальной является «компенсаторная» «одноэлементная» система стимулирования, то есть сделанные качественные выводы, относительно необходимости акцентирования основного внимания на специфике одноэлементных задач, остаются в силе и в общем случае многоэлементных АС, то есть при сильно связанных активных элементах.*

2.2.2. Внешняя интервальная неопределенность относительно результатов деятельности АЭ

В рамках модели, рассмотренной в предыдущем подразделе, предположим, что реальное сокращение $z \in A_0 = A = [0; +\infty)$ продолжительности проекта зависит от действия АЭ и от состояния природы. Будем считать, что, выбирая свои стратегии, участники проекта имеют информацию лишь об интервале возможных значений: $z \in Z(y) = [Q^-(y); Q^+(y)]$. Кроме того, предположим, что действия, выбираемые АЭ, не наблюдаются центром, которому становится известен лишь результат деятельности. Поэтому стимулирование АЭ центром уже не может (как в детерминированном случае) основываться на действиях АЭ, а должно зависеть от неопределенной величины – результата деятельности.

Целевая функция АЭ равна: $f(s, y, z) = s(z) - c(y)$. Устраняя интервальную неопределенность, то есть применяя метод максимального гарантированного результата (МГР), получим, что гарантированное значение целевой функции АЭ равно:

(7) $f_\Gamma(s, y) = \min\limits_{z \in Z(y)} s(z) - c(y)$.

Следовательно, в рассматриваемой модели множество реализуемых действий АЭ есть $P(s) = Arg \max\limits_{y \in A} f_\Gamma(s, y)$.

Введем следующее предположение:

А.2.6. $\forall\ y \in A\ \ Q^-(y) \le y,\ Q^+(y) \ge y;\ Q^-(\cdot),\ Q^+(\cdot)$ – строго возрастающие непрерывные функции.

Если целевая функция центра зависит от фактического сокращения продолжительности проекта $z \in A_0$, то ее гарантированное значение равно:

(8) $F_\Gamma(s, y) = \max\limits_{z \in Z(y)} F(z, s)$.

Итак, задача стимулирования имеет вид:

$$(9)\ \begin{cases} \Phi_{\text{г}}(s(y^*), y^*) \to \min\limits_{s \in M,\ y^* \in [0; T - T_0]} \\ y^* \in Arg \max\limits_{y \ge 0} f_{\text{г}}(s, y) \end{cases}.$$

Задача (9) является детерминированной задачей стимулирования (см. задачу (3)).

Теорема 2.4а. Система стимулирования

$$(10)\ s(y^*, z) = \begin{cases} c(y^*), & z \in [Q^-(y^*); Q^+(y^*)] \\ 0, & z \notin [Q^-(y^*); Q^+(y^*)] \end{cases},$$

реализует действие АЭ y^*. Оптимальное значение реализуемого действия АЭ определяется следующим выражением:

$$(11)\ y^* = arg \min_{y \in [0, T-T_0]} \max_{z \in Z(y)} F(z,\ s(z)).$$

При этом гарантированное значение целевой функции АЭ равно нулю.

Реализуемость действия y^* Î A системой стимулирования (10) следует из определения гарантированной реализуемости и предположения А.2.6. Справедливость остальных утверждений теорема 2.4а очевидна. •

Отметим, что в условиях теоремы 2.4а не фигурирует правая граница $Q^+(y)$ диапазона возможных значений результата деятельности при заданном действии. Это объясняется тем, что при вычислении МГР в (7) и (8) используется минимум (соответственно, максимум) про множеству $Z(y)$ (см. также [79]).

Содержательно, для того, чтобы побудить АЭ выбрать действие y^* Î A центр вынужден компенсировать ему затраты в размере $c(y^*)$ во всем множестве $Z(y)$.

Предположим, что функция штрафов центра монотонна, тогда целевая функция центра имеет вид:

$$F(y) = \max_{z \in Z(y)} \{c(T - T_0 - z) + s(y, z)\}.$$

Так как функция штрафов монотонна, а система стимулирования (10) кусочно-постоянна, то $F(y) = c(T - T_0 - Q^-(y)) + c(y)$. Задача $F(y)$ ® $\min\limits_{y \geq 0}$ является скалярной оптимизационной задачей.

Пример 5. Пусть левая граница множества возможных результатов деятельности имеет следующий вид: $Q^-(y) = (1-D^-)y$, где выполнено: D^- Î $[0; 1]$, а функция штрафов линейна. Тогда получаем, что оптимальное решение $y^* = arg \min\limits_{y \geq 0} F(y)$ имеет вид (3), где

$x(\chi) = c'^{-1}((1 - D^-)c_0)$.

Легко проверить, что с ростом неопределенности (увеличением D^- Î $[0; 1]$) эффективность стимулирования не возрастает. В предельном случае (при $D^{-} = 0$) решение задачи в условиях неопределенности переходит в решение соответствующей детерминированной задачи, что вполне согласуется с общими принципами, изложенными в [79]. •

Рассмотрим теперь случай, когда на момент принятия решений участники АС информированы асимметрично (данная модель близка к задачам стимулирования, рассмотренным в [79]): АЭ знает достоверно каким будет результат деятельности z Î A_0 в зависимости от выбираемого им действия: $z = z(y)$, а центр имеет информацию об интервале возможных значений: $z(y)$ Î $Z(y)$. Для простоты можно положить ″ y Î A $z(y) = y$.

Целевая функция АЭ равна: $f(s, y) = s(z(y)) – c(y)$. Следовательно, в рассматриваемой модели множество реализуемых действий АЭ есть $P(s) = Arg \max\limits_{y \in A} \{s(z(y)) – c(y)\}$.

Если целевая функция центра зависит от фактического сокращения продолжительности проекта z Î A_0, то ее гарантированное значение равно:

(12) $F_Г(s, y) = \max\limits_{z \in Z(y)} F(z, s)$.

Итак, задача стимулирования имеет вид:

$$(13)\quad \begin{cases} \Phi_{г}(s\,(y^*),\, y^*) \to \min\limits_{s \in M,\; y^* \in [0;T-T_0]} \\ y^* \in Arg \max\limits_{y \geq 0} \{s\,(z(y)) - c(y)\} \end{cases}.$$

Задача (13) является детерминированной задачей стимулирования (см. задачу (3)).

<u>Теорема 2.4б.</u> Система стимулирования

$$(14)\quad s(y^*, z) = \begin{cases} c(y^*),\ z \in [Q^-(y^*); Q^+(y^*)] \\ 0, \qquad z \notin [Q^-(y^*); Q^+(y^*)] \end{cases},$$

реализует действие АЭ y^*. Оптимальное с точки зрения центра значение реализуемого действия АЭ определяется следующим выражением:

(15) $y^* = arg \min\limits_{y \in [0, T-T_0]} \max\limits_{z \in Z(y)} F(z, s(z))$.

При этом гарантированное значение целевой функции АЭ равно:

$$f_Г(y^*) = c(y^*) – c(Q^-(y^*)) \;³\; 0.$$

Доказательство теоремы 2.4б аналогично доказательству теоремы 2.4а и опускается. Обсудим качественное различие результатов.

Отличие моделей заключается в том, что в задаче (13), по сравнению с задачей (10), АЭ достоверно знает зависимость между своим действием и результатом деятельности, а центру по-прежнему известен лишь интервал возможных значений. Следовательно, имеет место асимметричная информированность участников. Так как в обоих случаях информированность центра одинакова, то одинакова в обоих случаях и максимальная гарантированная эффективность управления (максимальное гарантированное значение целевой функции центра на множестве гарантированно реализуемых действий АЭ). Отличие в информированности АЭ приводит к тому, что увеличивается гарантированное значение его целевой функции. Системы стимулирования (11) и (14) одинаковы, однако АЭ имеет возможность «обмануть центр», то есть выбрать действие $Q^{-}(y^*)$ (обеспечив тем самым $z = Q^{-}(y^*)$) и получить при этом вознаграждение $c(y^*)$ превышающее его реальные затраты $c(Q^{-}(y^*))$.

В предельном случае, то есть при увеличении информированности участников АС, задачи (10) и (13) и их решения переходят, соответственно, в детерминированную задачу (3) и ее решение (5), то есть принцип соответствия [79] имеет место.

2.2.3. Внешняя вероятностная неопределенность относительно результатов деятельности АЭ

В рамках модели, рассмотренной в предыдущем подразделе, предположим, что реальное сокращение $z \in A_0 = [0; +\infty)$ продолжительности проекта зависит от действия АЭ, но является случайной величиной с интегральной функцией условного распределения $F(z, y)$ – модель теории контрактов [79, 105, 107, 133-136, 144]. Будем считать, что, выбирая свои стратегии, участники проекта имеют информацию лишь об этом распределении. Кроме того, предположим, что действия, выбираемые АЭ, не наблюдаются центром, которому становится известен лишь результат деятельности. Поэтому стимулирование АЭ центром уже не может (как в детерминированном случае) основываться на действиях АЭ, а должно зависеть от случайной величины – результата деятельности.

Дополнительно к предположениям А.2.4 и А.2.5 введем следующее предположение относительно свойств функции распределения (модель простого активного элемента [22, 79, 42]):

А.2.7. $F(z, y) = \begin{cases} F(z), & z < y \\ 1, & z \geq y \end{cases}$, $F(T - T_0) < 1$.

Содержательно предположение А.2.7 означает, что реальное сокращение продолжительности проекта оказывается не большим, чем действие АЭ. Кроме того, считается, что, даже если АЭ ориентируется (выбирает действие) на такое сокращение длительности, что продолжительность проекта в детерминированном случае оказалась бы меньшей, чем плановая, то существует ненулевая вероятность того, что фактическая продолжительность проекта превысит плановую.

Так как функции полезности (не путать с целевыми функциями! [78]) участников проекта:

(16) $F(s(z), z) = s(z) + c(z)$,

(17) $f(s(z), z) = s(z) – c(z)$

зависят от случайных величин, распределения которых им известны, будем считать, что они выбирают свои стратегии, стремясь максимизировать ожидаемую полезность. Таким образом, целевые функции участников определяются их ожидаемой полезностью, то есть имеет место[1]: $F(s, y) = E\ F(s, z) = E\ \{s(z) + c(T – T_0 – z)\}$, $f(s, y) = E\ f(s, z) = E\ \{s(z) – c(z)\}$, а задача управления имеет вид:

$$(18)\quad \begin{cases} \int\limits_{A_0} \Phi(s\ (z), z)\ p(z, y^*)\ dz \to \min\limits_{s \in M,\ y^* \in [0; T - T_0]} \\ y^* \in Arg \max\limits_{y \geq 0} \int\limits_{A_0} f\ (s\ (z), z)\ p(z, y)\ dz \end{cases}.$$

[1] *Символ «Е» обозначает оператор вычисления математического ожидания.*

Теорема 2.5а. Оптимальное решение $s^*(z)$ задачи (18) имеет вид:

(19) $$s^*(z^*, z) = \begin{cases} c(z), & z \le z^* \\ 0, & z > z^* \end{cases},$$

где оптимальное значение результата деятельности АЭ z^* определяется следующим выражением:

(20) $$z^* = arg \min_{y \in [0, T - T_0]} F(s^*, y).$$

Доказательство теоремы 2.5а использует тот факт, что в модели простого АЭ стационарные точки функции полезности и целевой функции совпадают, то есть, практически, повторяет доказательство утверждения 3.1.15, приведенного в работе [79], и по этой причине опускается.

Если затраты АЭ зависят не от результата его деятельности, а непосредственно (и только!) от его действия, то есть $c = c(y)$, то дело обстоит несколько более сложным образом. Для этого случая оптимальное решение задачи оперативного управления дается следующей теоремой.

Теорема 2.5б. Если затраты АЭ зависят от его действия, то оптимальное решение $s^*(z)$ задачи (18) имеет вид:

(21) $$s^*(y^*, z) = \begin{cases} \dfrac{c(y^*)}{1 - F(y^*)}, & z = y^* \\ 0, & z \ne y^* \end{cases},$$

где оптимальное значение результата деятельности АЭ z^* определяется следующим выражением[1]:

(22) $$z^* = arg \max_{y \in A} \{c(y) + Ec(T - T_0 - z)\}.$$

Докажем, что система стимулирования (21)[2] реализует действие y^* Î A. Ожидаемая полезность АЭ равна:

---

[1] *Символ «E» обозначает оператор математического ожидания.*

[2] *Отметим, что в работе* [42] *для близкой к рассматриваемой задачи* (*также в модели простого АЭ*) *была доказана оптимальность следующей системы стимулирования:* $w_0(z) = \int_0^z \frac{c'(x)}{1 - F(x)} dx$.

$$f(y,\, s) = \int\limits_0^{y} s(z)\, p(z)\, dz + s(y)\, [1 - F(y)] - c(y).$$

Подставляя систему стимулирования (21), легко видеть, что выполнено условие реализуемости: $'' \, y \;\hat{I}\; A \;\; f(y^*,\, s^*) \;{}^3\; f(y,\, s^*)$.

Докажем, что (21) минимизирует затраты центра на стимулирование. Предположим противное, то есть пусть существует $\tilde{s} \;\; \hat{I}\; M$, такое, что выполнено:

$$(23) \quad \int\limits_0^{y^*} \tilde{s}\,(z)\, p(z)\, dz + \tilde{s}\,(y^*)\, [1 - F(y^*)] < E s^*(y^*, z) = c(y^*).$$

Подставляя в условие реализуемости действия y^* системой стимулирования $\tilde{s}$ конкретное значение действия АЭ: $y = 0$, получим (первое неравенство следует из (23)):

$$0 > \int\limits_{A_0} \tilde{s}\,(z) p(z,\, y^*)\, dz - c(y^*) \;{}^3\; \tilde{s}\,(0) - c(0),$$

что противоречит А.2.4. •

Сравним эффективность стимулирования в двух случаях. Первый случай - когда функция затрат АЭ зависит от результата его деятельности, второй случай когда функция затрат АЭ зависит от его действия. Так как множества A и A_0 совпадают, то будем рассматривать одну и ту же функцию затрат $c(\cdot)$.

<u>Следствие.</u> Эффективность стимулирования в случае, когда затраты АЭ зависят от ненаблюдаемого центром действия АЭ, не выше, чем в случае, когда затраты АЭ зависят от его результата деятельности, наблюдаемого центром.

Вычислим ожидаемое значение функции стимулирования (19):

$$E\; s^*(z^*, z) = \int\limits_0^{z^*} c(z)\, p(z)\, dz + c(z^*)\, [1 - F(z^*)] \;\pounds\; c(z^*).$$

Последнее неравенство получено оценкой интеграла сверху в силу монотонности и неотрицательности затрат АЭ.

В ходе доказательства теоремы 2.5б было установлено, что ожидаемое значение функции стимулирования (21) равно следующей величине : $E\; s^*(y^*, z) = c(y^*)$.

Если приравнять действия y^* и z^*, реализуемые, соответственно, системами стимулирования (21) и (19), то получим: $E\,\sigma^*(y^*, z) \geq E\,\sigma^*(z^*, z)$.

Так как минимальные затраты на стимулирование по реализации любого действия системой стимулирования (21) выше, чем системой стимулирования (19), то по теореме о минимальных затратах на стимулирование [78] получаем утверждение следствия. •

Итак, теоремы 2.5а и 2.5б дают решение задачи синтеза оптимальной функции стимулирования, побуждающей простой активный элемент к сокращению времени выполнения проекта.

Проверим выполнение принципа соответствия – при «предельном переходе» от вероятностной АС (рассматриваемой модели простого АЭ) к соответствующей детерминированной АС оптимальные решения должны совпадать. Действительно, система стимулирования (19) переходит в оптимальную в детерминированной модели компенсаторную систему стимулирования [79], а (21) в точности совпадает с оптимальной квазикомпенсаторной системой стимулирования (4).

2.2.4. Внешняя нечеткая неопределенность относительно результатов деятельности АЭ

В рамках модели, рассмотренной в предыдущем подразделе, предположим, что реальное сокращение $z \in A_0 = [0; +\infty)$ продолжительности проекта зависит от действия АЭ, но, выбирая свои стратегии, участники проекта имеют о нем нечеткую информацию $\tilde{P}(z, y)$, $\tilde{P} : A \times A_0 \to [0; 1]$. По-прежнему будем считать, что действия, выбираемые АЭ, не наблюдаются центром, а стимулирование зависит от результата деятельности, в то время как целевая функция центра зависит от действия АЭ (если в рассматриваемой модели с нечеткой неопределенностью целевая функция центра зависит от результата деятельности АЭ, то в рамках вводимых ниже предположений задача управления сводится [79] к детерминированной, то есть описанной выше).

Дополнительно к предположениям А.2.4 и А.2.5 введем следующее предположение относительно свойств нечеткой информационной функции:

А.2.8. Нечеткая информационная функция $\tilde{P}(z,\ \ y)$ 1-нормальна [82], то есть:

$$" \, y \ Î \ A \ \sup_{z \in A_0} \tilde{P}(z, y) = 1 \ \text{и} \ " \, z \ Î \ A_0 \ \$ \, y \ Î \ A{:}\ \tilde{P}(z, y) = 1.$$

Так как функции полезности участников проекта (центра и АЭ): $F(s(z), z)$ и $f(s(z), z) = s(z) - c(z)$ зависят от неопределенных величин, то будем считать, что они выбирают свои стратегии, недоминируемые по индуцированному нечеткому отношению предпочтения (НОП) [82]. Множество максимально недоминируемых (по НОП, индуцированному на множестве A функцией полезности АЭ $f(z)$ и нечеткой информационной функцией $\tilde{P}(z, y)$) обозначим $P(\tilde{R}_{A_0}(s\ ), A)$. Алгоритм построения этого множества описан в [75, 82]. Таким образом, задача управления имеет вид:

$$(24)\ \begin{cases} \Phi(s\ (y^*), y^*) \to \min\limits_{s \in M,\ y^* \in [0; T - T_0]} \\ y^* \in \ P(\tilde{R}_{A_0}(s\ ), A) \end{cases}.$$

Обозначим $Q(z) = \{y \ Î \ A \mid \tilde{P}(z, y) = 1\}$. Решение задачи (24) дается следующей теоремой.

<u>Теорема 2.6.</u> Оптимальное решение $s^*(z)$ задачи (24) имеет вид:

$$(25)\ s^*(z) = \begin{cases} c(z^*), \ z = z^* \\ 0, \qquad z \neq z^* \end{cases},$$

где оптимальное значение результата деятельности АЭ z^* в рамках гипотезы благожелательности определяется следующим выражением:

$$(26)\ z^* = arg \min_{z \in A_0} \{ \min_{y \in Q(z)} [c(z) + c(T - T_0 - y)]\}.$$

Если гипотеза благожелательности не выполнена, то оптимальное значение результата деятельности АЭ z^* определяется следующим выражением:

$$(27)\ z^* = arg \min_{z \in A_0} \{ \max_{y \in Q(z)} [c(z) + c(T - T_0 - y)]\}.$$

Множество максимально недоминируемых (по НОП, индуцированному на множестве A целевой функцией АЭ $f(s, z)$ и нечеткой информационной функцией $\tilde{P}(z,\ y)$) действий АЭ описывается достаточно сложно (см. [75, 82]), и использование такого описания для решения задачи стимулирования затруднительно. Поэтому в теории активных систем (по аналогии с тем как это делалось в теории принятия решений [82]) был предложен подход, заключающийся в сведении задачи анализа зависимости множества недоминируемых альтернатив от системы стимулирования к анализу зависимости решения задачи четкого математического программирования (ЧМП) от системы стимулирования [75, 79]. Более конкретно, было доказано, что, если выполнено предположение А.2.8, то действие y_0 Î A является четко недоминируемым [82] тогда и только тогда, когда существует результат деятельности z_0 Î A_0, такой, что пара (y_0, z_0) является решением следующей задачи ЧМП:

(28) $f(s, z)$ ® max, $\tilde{P}(z, y) = 1$, y Î A, z Î A_0.

В соответствии с результатом теоремы 2.3 при использовании системы стимулирования (25) максимум целевой функции АЭ достигается в точке z. Кроме того, (25) – минимальная (квазикомпенсаторная) система стимулирования, реализующая этот результат деятельности. В соответствии с (28) множество $Q(z)$ Í A и только оно [78] будет множеством четко недоминируемых действий, то есть $P(\tilde{R}_{A_0}(s^*(z)), A) = Q(z)$.

Значит АЭ выберет одно из четко недоминируемых при данной системе стимулирования действий. Осталось устранить неопределенность относительно конкретного выбора АЭ. В рамках ГБ для этого используется минимум по множеству $Q(z)$, при использовании МГР – максимум (см. выражения (26) и (27)), то есть на втором этапе (этапе согласованного планирования [19, 78]) центру остается решить задачу поиска оптимального реализуемого действия АЭ – см., соответственно, выражения (26) и (27). •

Отметим, что при предельном переходе к соответствующему детерминированному случаю (в котором $\tilde{P}(z, y) = \begin{cases} 1, & z = y \\ 0, & z \neq y \end{cases}$) из теоремы 2.6 следует, что оптимальным становится решение (5), которое оптимально в соответствующей детерминированной задаче.

Пример 6. Пусть $\widetilde{P}(z, y) = \begin{cases} 1, & z \in [y(1-\Delta); y(1+\Delta)] \\ 0, & z \notin [y(1-\Delta); y(1+\Delta)] \end{cases}$, где D Î $[0; 1]$[1]. Тогда $Q(z) = [z - D; z + D]$. Вычислим множество $Q(z) = [\frac{z}{1+\Delta}; \frac{z}{1-\Delta}]$. Тогда оптимальное решение имеет вид:

$$z^* = arg \min_{z \in A_0} \{ \min_{y \in Q(z)} [c(z) + c(T - T_0 - y)]\} =$$

$$= arg \min_{z \in A_0} [c(z) - c(T - T_0 - \frac{z}{1+\Delta})].$$

Получили скалярную задачу оптимизации. В случае линейных штрафов получаем, что оптимально решение (6), где

$$x(x) = c'^{-1}(\frac{c_0}{1+\Delta}).$$

Отметим, что полученное решение совпадает с решением, оптимальным в случае соответствующей интервальной неопределенности (см. теоремы 2.4а и 2.4б), то есть методы учета этих двух типов неопределенности согласованы.

При отсутствии неопределенности ($D = 0$) получаем решение, в точности совпадающее с (5). Легко проверить, что с ростом неопределенности (увеличением D Î $[0; 1]$) эффективность стимулирования не возрастает. •

В случае интервальной и вероятностной неопределенности и симметричной информированности участников АС относительно времени завершения проекта устранение неопределенности производится, соответственно, применением МГР и ожидаемых полезностей, то есть методами, исследованными достаточно подробно [79]. Рассматривать их адаптацию к частному случаю задачи оперативного управления временем завершения проекта мы не будем, поэтому сконцентрируем основное внимание на случае нечеткой неопределенности относительно времени завершения проекта, который, практически, не исследован в литературе по управлению АС в условиях неопределенности.

---

[1] *При данной функции принадлежности нечеткая неопределенность может рассматриваться как интервальная неопределенность – см. обсуждение совпадения соответствующих решений ниже.*

2.2.5. Внешняя нечеткая неопределенность относительно времени завершения проекта

Предположим, что результат деятельности АЭ совпадает с его действием, однако относительно времени T завершения проекта имеется нечеткая информация: $m_T(t)$, m_T: $[0; +$¥$)$ ® $[0; 1]$. Задача оперативного управления заключается в выборе центром системы стимулирования, которая минимизировала бы его выплаты с учетом имеющейся информации.

Воспользовавшись результатом теоремы 2.3, получаем, что минимальные затраты центра на стимулирование АЭ, побуждающие последнего сократить продолжительность проекта на величину y ³ 0 равны $c(y)$.

Четкая целевая функция центра равна:

$$F(y, T) = c(y) + c(T - T_0 - y).$$

Обозначим $Y(T) = Arg \min_{y \in A} F(y, T)$. Множество $Y(T)$ может рассматриваться как нечеткое отображение $m_Y(t, y)$: A ´ A ® $[0; 1]$ времени окончания проекта в действия АЭ, то есть:

$$(29)\ m_Y(t, y) = \begin{cases} 1, & y \in \mathrm{Arg} \min_{y \in A} \Phi(y, t) \\ 0, & y \notin \mathrm{Arg} \min_{y \in A} \Phi(y, t) \end{cases}$$

Образом нечеткого множества $m_T(t)$ при нечетком отображении $m_Y(t, y)$ в соответствии с принципом обобщения [82] будет нечеткое множество $m(y)$ с функцией принадлежности

$$(30)\ m(y) = \sup_{t \geq 0} min \{m_T(t); m_Y(t, y)\}.$$

Обозначим $A_{max} = Arg \max_{y \in A} m(y)$ – множество действий АЭ, максимизирующих функцию принадлежности (30).

Оптимальным будем считать максимизирующее решение [82], то есть любое действие из множества A_{max}. Из вышесказанного следует справедливость следующей теоремы.

Теорема 2.7. Оптимальной в условиях нечеткой неопределенности относительно времени завершения проекта является следующая система стимулирования:

(31) $s^*(y) = \begin{cases} c(y), & y \in A_{\max} \\ 0, & y \notin A_{\max} \end{cases}.$

Доказательство теоремы 2.7 повторяет (с учетом выражений (29)-(31)) доказательство теоремы 2.3 (см. также теорему 2.6 и ее доказательство) и не приводится.

В предельном (детерминированном) случае нечеткое множество $m_T(t)$ имеет вид $m_T(t) = \begin{cases} 1, & t = T \\ 0, & t \neq T \end{cases}$, а множество $A_{max} = Arg \max_{y \in A} m(y) = Arg \min_{y \in A} F(y, T)$ соответствует (5).

<u>Пример 7</u>. Рисунки 12 и 13 являются графической иллюстрацией использования теоремы 2.7 для случая линейных штрафов. •

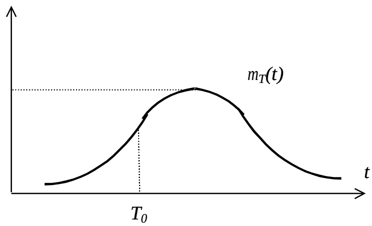


Рис. 12. Нечеткое множество $m_T(t)$ продолжительностей проекта в примере 7

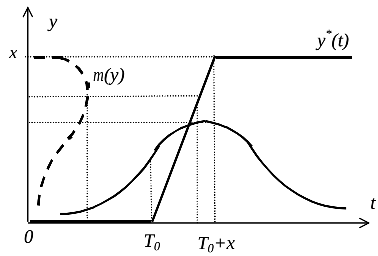


Рис. 13. Образ нечеткого множества $m_T(t)$ в примере 7

2.3. Механизмы планирования

В разделе 2.2 рассмотрены механизмы стимулирования, побуждающие активные элементы сокращать продолжительность выполнения проекта в случае, когда последняя превышает директивные сроки. Анализ механизмов управления в условиях неопределенности свидетельствует, что с ростом информированности управляющего органа эффективность оперативного управления не снижается. Выше были рассмотрены случаи интервальной, вероятностной и нечеткой внешней неопределенности, то есть неопределенности относительно результатов деятельности АЭ. Кроме нее в системе может присутствовать внутренняя неопределенность – недостаточная информированность центра о параметрах самих активных элементов.

В настоящем разделе рассматриваются механизмы управления в условиях внутренней неопределенности. В том числе, традиционно в качестве одного из методов снижения неопределенности используются механизмы с сообщением информации от более информированных участников менее информированным. При их применении возникают две основные задачи – оценки эффективности и исследования достоверности сообщаемой центру информации. Обе эти задачи для случая сокращения продолжительности времени реализации проекта рассматриваются ниже.

2.3.1. Внутренняя интервальная неопределенность относительно возможностей АЭ

Предположим, что функция затрат $c(y, r)$, удовлетворяющая при любом допустимом значении параметра r предположению А.2.4, активного элемента зависит от неизвестного центру параметра $r \in [d; D]$, относительно которого центру известен лишь диапазон $[d; D]$ его возможных значений (случай внутренней интервальной неопределенности в соответствии с классификацией, введенной в [22, 79]). Рассмотрим задачу синтеза оптимальных управляющих воздействий.

Если, помимо множества возможных значений неопределенного параметра, центр не имеет никакой дополнительной информации, то он вынужден применять принцип максимального гарантированного результата (МГР) и решать затем соответствующую задачу стимулирования.

Запишем условия гарантированной реализуемости некоторого действия $y^* \in A$ системой стимулирования $\sigma \in M$:

(1) $\forall y \in A \ \ \forall r \in [d; D] \ \ \sigma(y^*) - c(y^*, r) \geq \sigma(y) - c(y, r)$.

Положив $\sigma(y) = 0 \ \forall y \neq y^*$ и используя А.2.4, оценим по (1) минимальные затраты центра на стимулирование:

(2) $\sigma(y^*) \geq \max\limits_{r \in [d;D]} c(y^*, r)$.

Следовательно, решение задачи синтеза оптимальной системы стимулирования (по аналогии с теоремой 2.3) имеет вид:

(3) $s^*(y^*, y) = \begin{cases} \max\limits_{r \in [d;D]} c(y^*, r), & y = y^* \\ 0, & y \neq y^* \end{cases}$,

где оптимальное действие АЭ y^* определяется следующим выражением:

(4) $y^* = arg \min\limits_{y \in [0, T - T_0]} \{s^*(y) + c(T - T_0 - y)\}$.

Выше при рассмотрении задачи стимулирования в АС с интервальной внешней неопределенностью было показано, что при асимметричной информированности выигрыш АЭ (значение его целевой функции на реализуемом центром действии) не ниже, чем в случае симметричной информированности. Такое же заключение может быть сделано и для рассматриваемой модели. Выигрыш АЭ (по сравнению с детерминированным случаем) равен следующей величине: $\{\max\limits_{r \in [d;D]} c(y^*, r) - c(y^*, r)\}$, причем этот выигрыш не убывает с ростом неопределенности (расширением отрезка $[d; D]$). Качественно этот факт можно сформулировать следующим образом: чем меньше знает центр об АЭ, тем это более выгодно для последнего.

Сделанный вывод справедлив и для многоэлементных АС со слабо связанными АЭ (см. раздел 2.2.1 выше). Переход осуществляется следующим образом – для i-го АЭ используется функция затрат $\max\limits_{r_i \in [d_i; D_i]} c_i(y_i^*, r_i)$. Другими словами, вектор $\{x_i\}$ гарантированно оптимальных действий АЭ определяется как решение следующей задачи:

(5) $c(T - T_0 - \sum\limits_{i \in I} x_i) + \sum\limits_{i \in I} \max\limits_{r_i \in [d_i; D_i]} c_i(x_i, r_i) \rightarrow \min\limits_{\sum\limits_{i \in I} x_i \leq T - T_0}$.

<u>Пример 8.</u> Пусть $n = 1$ и функция затрат АЭ имеет вид: $c(y; r) = y^2/2r$, а штрафы линейны: $c(t) = c_0\, t$. Если истинное значение параметра r известно центру, то, применяя результат теоремы 2.3, получаем, что оптимальное решение имеет вид:

$$s^*(y) = \begin{cases} c(y^*), \; y = y^* \\ 0, \qquad y \neq y^* \end{cases}, \; y^* = \begin{cases} T - T_0, T \leq T_0 + c_0 r \\ c_0 r, \quad T \geq T_0 + c_0 r \end{cases}.$$

Оптимальное значение целевой функции центра при этом равно:

$$F^*(s^*(y^*), y^*) = \min \{ \frac{(T - T_0)^2}{2r}; c_0(T - T_0) - c_0^2 \, r/2 \}.$$

Если истинное значение параметра затрат АЭ неизвестно центру, то решение, максимизирующее гарантированный результат, имеет вид:

$$s_g^*(y) = \begin{cases} c(y^*, d), \; y = y^* \\ 0, \qquad y \neq y^* \end{cases}, \; y^* = \begin{cases} T - T_0, T \leq T_0 + c_0 d \\ c_0 d, \quad T \geq T_0 + c_0 d \end{cases}.$$

Оптимальное гарантированное значение целевой функции центра при этом равно:

$$\Phi_g^*(s_g^*(y^*), y^*) = \min \{ \frac{(T - T_0)^2}{2d}; c_0(T - T_0) - c_0^2 \, d/2 \}.$$

Очевидно, что имеет место:

$$'' \; r \; \hat{I} \; [d; D] \;\; F^*(s^*(y^*), y^*) \; \pounds \; \Phi_g^*(s_g^*(y^*), y^*),$$

то есть эффективность управления в случае неопределенности (незнания или неточного знания центром возможностей АЭ) не выше, чем в условиях полной информированности, причем с ростом неопределенности гарантированная эффективность управления не возрастает. •

2.3.2. Механизмы с сообщением информации

Одним из способов повышения эффективности управления в условиях неопределенности является сообщение информации от более информированных участников системы менее информированным (в нашем случае – от активных элементов центру). Так как участники системы обладают свойством активности, в том числе – способностью к самостоятельному выбору своих действий, то в общем случае активные элементы сообщат центру такую информацию (не обязательно достоверную), чтобы принятое центром на основании этой информации решение оказалось наиболее выгодным для АЭ [17, 78].

Принцип принятия решений центром на основании информации, сообщенной АЭ, называется механизмом планирования. Исследование свойств этого механизма, побуждающих АЭ сообщать достоверную информацию, называется в теории активных систем и теории принятия решений проблемой манипулируемости [19, 73, 104, 119, 138, 141, 144].

Рассмотрим сначала одноэлементную АС. Итак, пусть АЭ сообщает центру оценку s Î $[d; D]$ параметра своей функции затрат. Механизмом планирования $p(s)$, s Î S, в данном случае является отображение множества возможных сообщений S во множество X планов – параметров функции стимулирования, например - в то действие, которое центр хотел бы реализовать при данной информации о параметрах АЭ, то есть $X = A$, p: S ® A.

В теории активных систем известен следующий результат: в системах с одним активным элементом для любого механизма планирования существует неманипулируемый механизм не меньшей эффективности [15, 19, 78]. Этот принцип, называемый также принципом открытого управления, позволяет достаточно просто решить задачу синтеза оптимального механизма планирования для рассматриваемой модели, ограничившись классом механизмов открытого управления. Содержательно, центр должен принять сообщения АЭ за истинные и назначить такой план, который был бы наиболее выгоден для АЭ, если бы истинное значение параметра его функции затрат совпадало с сообщенным.

Следовательно, если центр использует принцип открытого управления, то АЭ в общем случае сообщит s ¹ r и центр будет вынужден, например, использовать систему стимулирования, компенсирующую затраты $c(y, s)$, то есть получим задачу стимулирования, методы решения которой описаны выше.

К сожалению, в многоэлементных АС утверждение об оптимальности принципа открытого управления не имеет места. Будем считать, что центр определяет планы (на основании предоставляемой элементами информации) по процедуре планирования $p : S \to X$, где $S = \prod_{i \in I} S_i$, $X = \prod_{i \in I} X_i$ и план, назначаемый i-му

АЭ, будет определяться выражением: $x_i = p_i(s)$, $i \in I$, $s = (s_1, s_2, .., s_n)$, $s \in S$. В качестве моделей поведения АЭ примем концепции равновесия Нэша и равновесия в доминантных стратегиях.

Механизм $p : S \to X$, в котором АЭ сообщают оценки из множеств $\{S_i\}$, называется непрямым механизмом [78, 85]. При фиксированном соответствии отбора равновесий для непрямого механизма $p(\cdot)$ можно построить соответствующий ему прямой механизм: $h(\tilde{r}) = p(s^*(\tilde{r}))$, где $s^*(\tilde{r})$ – вектор равновесных по Нэшу при значениях параметров $\tilde{r}$ стратегий, в котором АЭ сообщают непосредственно оценки своих параметров. Если в соответствующем прямом механизме сообщение достоверной информации является доминантной стратегией, то он называется эквивалентным прямым механизмом [78].

В предположении рационального поведения элементов при фиксированных планах выбираемые ими действия y_i^* будут максимизировать соответствующие целевые функции, то есть: $y_i^* \in P_i(x_i, r_i) = \underset{y_i \in A_i}{\mathrm{Argmax}}\ f_i(x_i, y_i, r_i)$. Таким образом, можно говорить о функции полезности АЭ (в игре с сообщением информации функции полезности АЭ называют функциями предпочтения [22, 78]): $j_i(x_i, r_i) = \max_{y_i \in A_i} f_i(x_i, y_i, r_i)$.

Очевидно, в механизмах с сообщением информации АЭ будут руководствоваться своей собственной полезностью и необязательно будут сообщать достоверную информацию. Явление сообщения АЭ недостоверной информации называется манипулированием информацией, а механизмы, в которых выгодно (является равновесием) сообщение достоверной информации называются неманипулируемыми. Для прямых механизмов неманипулируемым называется механизм, в котором при любых типах АЭ сообщение достоверной информации является равновесием в доминантных стратегиях.

Для механизмов управления проектами задача планирования (задача сокращения продолжительности производственного цикла) рассматривалась в работах [8, 18, 22]: для частного случая функций затрат АЭ типа Кобба-Дугласа [48] построен оптимальный неманипулируемый механизм. Этот результат, наряду с механизмами опережающего самоконтроля [18, 21] и другими, естественно, может использоваться и при применении методики освоенного объема (см. пример ниже).

Пусть центр использует следующий механизм планирования – назначаемые АЭ планы $\{x_i\}$ определяются в результате решения следующей задачи[1]:

(6) $c(T - T_0 - \sum_{i \in I} x_i) + \sum_{i \in I} c_i(x_i, s_i) \to \min\limits_{\sum_{i \in I} x_i \le T - T_0}$.

Содержательно, решая задачу (6), центр определяет вектор действий АЭ, реализация которого при использовании соответствующей компенсаторной системы стимулирования минимизирует суммарные выплаты центра при условии, что сообщенная АЭ информация считается истинной.

Отметим, что, если функция штрафов линейна, то получаем АС со слабо связанными АЭ (задача (6) распадается на набор одноэлементных задач, для которых существует общее бюджетное ограничение).

Очевидно, что в условиях внутренней интервальной неопределенности эффективность управления при использовании механизмов с сообщением информации не ниже, чем при использовании метода максимального гарантированного результата. Справедливость этого утверждения следует сравнения максимальных значений целевых функций в задачах (5) и (6).

Пусть зависимость затрат АЭ от параметра удовлетворяет следующему предположению:

(7) $\forall\ y \in A\ \ \forall\ r_1 \le r_2\ \ c(y, r_1) \ge c(y, r_2)$.

Если имеет место (7), то при использовании центром механизма планирования (6) выполнена гипотеза реальных оценок: $\forall\ i \in I$ $s_i < r_i$. Справедливость этого утверждения следует из того, что целевая функция i-го АЭ при выборе им действия x_i, удовлетворяющего (6), имеет вид:

(8) $f_i(x_i, r_i, s_i) = c_i(x_i, s_i) - c_i(x_i, r_i),\ i \in I$.

---

[1] *Содержательно, центр согласованно распределяет величины сокращений продолжительностей критических операций между соответствующими исполнителями.*

В силу условия индивидуальной рациональности значение целевой функции (8) должно быть неотрицательно, поэтому из (7) следует, что $\forall\ i \in I\ s_i < r_i$.

<u>Пример 9.</u> Пусть функции затрат АЭ имеют вид[1]: $c_i(y_i, r_i) = r_i\ \Psi(y_i\,/\,r_i),\ i \in I$. Если функция штрафов центра линейна, то, обозначая $\xi(\cdot) = \Psi'^{-1}(\cdot)$ и предполагая, что $\sum_{i \in I} r_i \le (T\text{-}T_0)/\xi(\chi_0)$, получим, что решение задачи (6) имеет вид: $y_i^*(s_i) = s_i\xi(\chi_0)$.

Функция предпочтения i-го АЭ имеет вид:

(9) $\varphi_i(s_i, r_i) = \max\limits_{y_i \in A_i} f_i(y_i, r_i, s_i) = c_i(\xi_i, s_i) - c_i(\xi_i, r_i),\ i \in I.$

В рассматриваемом примере

$$\varphi_i(s_i, r_i) = s_i\ \Psi(\xi(\chi_0)) - r_i\ \Psi(\xi(\chi_0)s_i/r_i).$$

Так как функция предпочтения каждого АЭ зависит только от его собственной стратегии s_i, то в равновесии АЭ сообщат:

(10) $s_i^*(r_i) = \max\ \{\delta_i, r_i \min\ \{1, \xi[\Psi(\xi(\chi_0))/\xi(\chi_0)]\}\},\ i \in I.$

Итак, у каждого АЭ существует доминантная стратегия (10), следовательно, можно воспользоваться принципом открытого управления.

Например, для функций Кобба-Дугласа выполнено:

$$\xi[\Psi(\xi(\chi_0))/\xi(\chi_0) = \alpha^{-\frac{1}{\alpha - 1}} \le 1,$$

то есть при квадратичных затратах $s_i^*(r_i) = r_i\,/\,2$ и т.д.[2] Легко видеть, что при $\alpha \to 1\ s_i^* \to r_i$. •

Итак, мы рассмотрели задачу синтеза неманипулируемого механизма, причем вопрос о его эффективности не ставился. Ниже

---

[1] *Частным случаем функции* $\Psi(\cdot)$ *является функция Кобба-Дугласа:* $\Psi(z) = z^\alpha/\alpha$.

[2] *Отметим, что мы решили задачу синтеза неманипулируемого механизма для рассматриваемой в примере модели. При этом оказалось, что в исходном (непрямом) механизме сообщение достоверной информации не является равновесной стратегией АЭ. На первый взгляд этот факт противоречит серии теорем об оптимальности принципа открытого управления в механизмах внутренних цен* [6, 76, 78]. *Противоречие, однако, кажущееся – в упомянутых работах использовалась пропорциональная система стимулирования, а в приведенном примере – квазикомпенсаторная (см. также механизмы В-типа в* [76]).

рассматривается класс активных систем, для которых также существует неманипулируемый механизм планирования.

Введем следующее предположение.

А.2.9. Функция штрафов и функции затрат АЭ линейны, причем относительно функций затрат АЭ центр не имеет никакой дополнительной информации[1].

В рамках предположения А.2.9 задача (6) примет вид:

$$(11)\quad \sum_{i\in I} x_i\,(s_i - c_0) \to \min_{\sum_{i\in I} x_i \le T - T_0},$$

где s_i – сообщение i-го АЭ центру о коэффициенте r_i линейной функции затрат: $c_i(y_i, r_i) = r_i\, y_i$, $i \in I$.

Пусть функции затрат АЭ упорядочены следующим образом:

(12) $r_1 \le r_2 \le \ldots \le r_n$.

Примем следующую договоренность: если несколько АЭ сообщили одинаковые заявки, то приоритет имеет АЭ с меньшим номером.

Если выполнено (12), то решение задачи (11) очевидно: упорядочиваем АЭ в порядке возрастания значений сообщенных ими параметров и назначаем планы в соответствии со следующей процедурой:

(13) $x_1^* = T - T_0$, если $s_1 \le c_0$, иначе $x_1^* = 0$; $x_i^* = 0$, $i = \overline{2, n}$.

При этом ненулевой план получает единственный АЭ (если он существует), а именно тот, который сообщил минимальное значение коэффициента (не превосходящее ставки c_0). Содержательно, если $s_1 \ge c_0$, то центру выгоднее платить внешние штрафы, чем сокращать продолжительность проекта.

<u>Теорема 2.8.</u> Если выполнено предположение А.2.9, то равновесие в механизме (13) имеет следующую структуру[2]:

(14) если $c_0 < r_1$, то $s_i^* = r_i$, $x_i^* = 0$, $i \in I$;

(15) если $c_0 \ge r_1$, то $s_1^* = r_2$, $x_1^* = T - T_0$, $s_i^* = r_i$, $x_i^* = 0$, $i = \overline{2, n}$.

Более того, соответствующий прямой механизм неманипулируем.

---

[1] *В терминах рассмотренной выше модели последнее утверждение означает, что* $\forall\ i \in I\ d_i = 0$, $D_i = +\infty$.

[2] *Отметим, что* (15) *является аукционным равновесием* [64, 86, 143].

Доказательство теоремы 2.8 заключается в построении соответствующего механизму (13) прямого механизма планирования.

В рассматриваемой модели гипотеза реальных оценок имеет вид: s_i ³ r_i, i Î I, то есть ни один из АЭ не сообщит оценку, строго меньшую истинного значения (в противном случае, попадая в число победителей при использовании центром компенсаторной системы стимулирования он получит строго отрицательную полезность). С другой стороны, если некоторый АЭ имеет значение r_i строго меньшее ставки c_0, то центру невыгодно включать его в число победителей. Поэтому введем множества $W_i(c_0, r_i) = [r_i, c_0]$, i Î I. Очевидно, множество потенциальных победителей I' есть множество тех АЭ, у которых соответствующее множество W_i непусто: $I' = \{i$ Î $I \mid W_i(c_0, r_i)$ ¹ Æ$\}$.

Рассмотрим два случая. Первый – когда $c_0 < r_1$. Понятно, что в этом случае центру невыгодно поручать сокращение продолжительности проекта ни одному из АЭ: $x_i^* = 0$, i Î I, поэтому в равновесии они сообщат минимальные (в силу гипотезы реальных оценок) оценки, то есть $s_i^* = r_i$, i Î I.

Во втором случай один или несколько АЭ имеют истинные значения параметров, не превосходящие ставку штрафов, то есть c_0 ³ r_1. При этом первый АЭ является монополистом и может увеличивать свою заявку в диапазоне $[r_1; r_2]$. Сообщая $s_1 > r_2$, первый АЭ рискует не попасть в число победителей, так как в этом случае второй АЭ может «перехватить инициативу», сообщив r_2 £ s_2 £ s_1. Аналогичным образом определяются множества диктаторства [85] всех АЭ. Следовательно, все АЭ, кроме первого (диктатора) сообщат минимальные заявки и не войдут в число победителей: $s_i^* = r_i$, $x_i^* = 0$, $i = \overline{2, n}$. Первый АЭ сообщит $s_1^* = min\,\{c_0; r_2\}$ и будет единственным победителем: $x_1^* = T - T_0$. Сообщать меньшее значение заявки ему невыгодно, так как при этом уменьшается значение его целевой функции.

Выражения (14)-(15) определяют соответствующий исходному прямой механизм, в котором АЭ сообщают непосредственно оценки своих параметров, а центр восстанавливает равновесие в исходном непрямом механизме по (14)-(15). •

Оценим эффективность K_1 механизма (13). Если бы центру были достоверно известны истинные значения параметров АЭ, то при

$c_0\ ^3\ r_1$, он назначил бы победителем первого АЭ, заплатив цену r_1 за единицу сокращения продолжительности проекта. Значение целевой функции центра при этом было бы равно $K^* = (T - T_0)\ min\ \{r_1;\ c_0\}$. В механизме (13) цена за единицу сокращения продолжительности проекта равна $min\ \{c_0;\ r_2\}$, а значение целевой функции центра равно $K_1 = (T - T_0)\ min\ \{c_0;\ r_2\}$. Разность

$$K_1 - K^* = (T - T_0)\ (min\ \{c_0;\ r_2\} - min\ \{c_0;\ r_1\})\ ^3\ 0$$

определяет потери эффективности, обусловленные неполной информированностью центра.

В более общем случае, то есть если существуют ограничения на максимальные значения действий АЭ: $A_i = [0;\ L_i]$, то величину $(T - T_0)$ сокращения времени выполнения проекта следует распределять последовательно в порядке возрастания номеров АЭ (в упорядочении значений сообщенных ими параметров) при условии, что коэффициент штрафов c_0 не меньше сообщенного коэффициента. Прежде чем рассматривать соответствующий механизм планирования, решим соответствующую детерминированную задачу, то есть найдем решение, которое оптимально в условиях полной информированности центра.

Итак, пусть центру известны значения $\{r_i\}$ и он распределяет величину требуемого сокращения продолжительности проекта $DT = (T - T_0)$ между АЭ следующим образом: если $c_0\ ^3\ r_1$ и $T - T_0\ ^3\ L_1$, то $x_1 = L_1$, если $c_0\ ^3\ r_2$ и $T - T_0 - L_1\ ^3\ L_2$, то $x_2 = L_2$ и так далее до тех пор, пока не найдется АЭ с номером k такой, что либо $r_{k+1} > c_0$ (далее - первый случай), либо $\sum_{i=1}^{k-1} L_i < T - T_0$ и $\sum_{i=1}^{k} L_i \geq T - T_0$ (далее – второй случай, который изображен на рисунке 14). Тогда равновесное сокращение продолжительности проекта равно:

(16) $DT^* = min\ \{T - T_0;\ \sum_{i=1}^{k} L_i\ \}$.

Суммарные затраты центра равны:

(17) $C^*(DT^*) = \sum_{i=1}^{k} r_i L_i$ - max $\{[\sum_{i=1}^{k} L_i - (T - T_0)]\ r_k,\ 0\} + c_0\ (T - T_0 - DT^*)$.

Зная (16) и (17), можно определить среднюю стоимость для центра сокращения продолжительности проекта на единицу времени (см. рисунок 14):

(18) $b^*(DT^*) = C^*(DT^*) / DT^*$.

Очевидно, что b^* £ c_0, но данное соотношение не может являться критерием включения соответствующего АЭ во множество победителей.

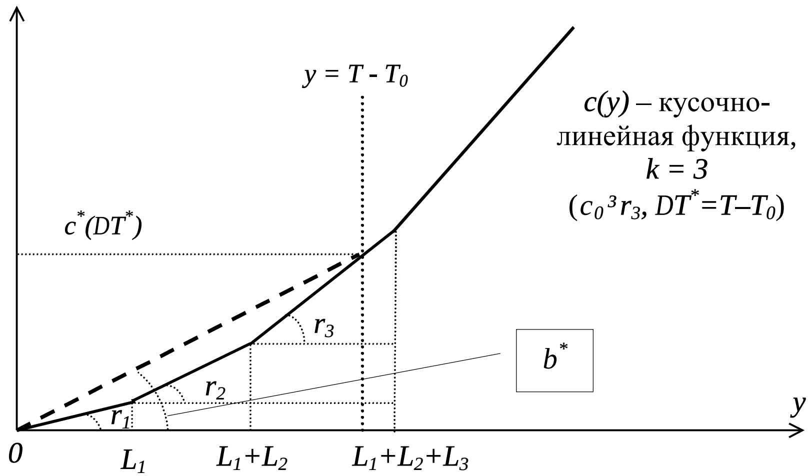


Рис. 14. Затраты центра на сокращение продолжительности проекта в условиях полной информированности

Сделав маленькое отступление, отметим, что двойственной (содержательно, но не формально) к рассматриваемой модели является модель отбора проектов в методе «затраты-эффективность». Напомним, что в этом методе центр имеет возможность привлекать внешние средства по ставке c_0 и имеет набор проектов, требующих каждый некоторого финансирования и приносящих определенную прибыль, причем рентабельности проектов неизвестны центру и сообщаются АЭ. Проекты выстраиваются в порядке убывания рентабельности (получается кусочно-линейная вогнутая функция – см. рисунок 14) и получают финансирование в порядке убывания рентабельности до тех пор, пока не закончится имеющийся у центра ресурс, или пока рентабельность очередного проекта не станет ниже ставки привлечения внешних средств. Понятно, что результаты исследования рассматриваемой в настоящем разделе модели АС с сообщением информации могут быть использованы в методе «затраты-эффективность».

Имея решение (16)-(18) детерминированной задачи, перейдем к анализу случая, когда истинные затраты АЭ неизвестны центру.

Если центр использует вместо истинных значений параметров функций затрат АЭ сообщенные ими заявки, то равновесие и его свойства определяются следующей теоремой.

Теорема 2.9. Если возможности АЭ ограничены, то равновесие имеет следующую структуру[1]:

(19) $s_i^* = r_i,\ i > k;\ s_i^* = \min\ \{c_0;\ r_{k+1}\},\ i = \overline{1,k}$;

(20) $x_i^* = 0,\ i > k;\ x_i^* = L_i,\ i = \overline{1,k-1},\ x_k^* = \min\ \{L_k;\ T - T_0 - \sum_{i=1}^{k-1} L_i\}$.

Доказательство очевидно и не приводится[2].

Равновесное сокращение продолжительности проекта равно как и в случае полной информированности DT^*, определяемой (16) (содержательно совпадение для случаев полной и неполной информированности обеспечивается за счет гипотезы реальных оценок).

Значение целевой функции центра в равновесии (19)-(20) (то есть суммарные затраты центра) равно:

(21) $C(DT^*) = \sum_{i=1}^{k} \min\{c_0, r_{k+1}\} L_i$ -

$$- \max\ \{[\sum_{i=1}^{k} L_i - (T - T_0)]\ \min\ \{c_0;\ r_{k+1}\};\ 0\} + c_0(T - T_0 - DT^*).$$

Зная (16) и (21), можно определить среднюю стоимость для центра сокращения продолжительности проекта на единицу времени:

---

[1] *Отметим, что при неограниченных возможностях АЭ $k = 1$ и результат теоремы 2.9 переходит в результат теоремы 2.8.*

[2] *Рассматриваемый механизм чрезвычайно близок к простым конкурсным механизмам с «игрой на эффекте», описанным в работах* [64]. *Поэтому перспективным представляется использование в рассматриваемой модели конкурсных механизмов, имеющих более высокую гарантированную эффективность, например, прямые конкурсы, двухэтапные конкурсы и др.* [21].

(22) $b(DT^*) = C(DT^*) / DT^*$.

Разность $DC = C(DT^*) - C^*(DT^*)$ характеризует потери центра, обусловленные неполной его информированностью. Видно, что при предельном переходе к случаю полной информированности разность DC обращается в ноль, причем с уменьшением неопределенности уменьшаются и потери центра.

Отметим, что при фиксированных параметрах функций затрат АЭ потери DC центра уменьшаются с ростом величины ограничений на действия АЭ.

Глава 3. Прикладная методика освоенного объема

Настоящая глава преследует следующие цели: во-первых, показать связь теоретических результатов первых двух глав с практическими задачами управления проектами, и, во-вторых, продемонстрировать возможность их практического использования в рамках существующих программных средств по управлению проектами.

Как отмечалось выше, методика освоенного объема предполагает составление полного описания проекта и детального графика его реализации еще на начальной стадии. Это позволяет производить оценки фактических данных и контролировать проект с начала и до полного завершения работ. Преимущество этого инструмента состоит в том, что он позволяет получать надежные данные о ходе выполнения проекта уже на стадии 15-20%-ного его выполнения. Руководитель проекта может использовать эти данные для прогноза затрат, требующихся для завершения всех работ по проекту (см. введение и разделы 1.1 и 1.3). Если на ранней стадии выполнения проекта руководитель получает данные по фактическому выполнению проекта, неприемлемые по ряду показателей, это может послужить для него предупредительным сигналом и позволит предпринять своевременные шаги для предотвращения нежелательных последствий.

Последовательность этапов, составляющих **прикладную методику освоенного объема**, приведена на рисунке 15.

Рассмотрим подробно этапы, изображенные на рисунке 15.

I. Планирование

Как показано на рисунке 15, фаза планирования состоит из четырех основных этапов: (1.1) определение полного объема работ по проекту, (1.2) разработка структуры затрат по проекту (CAP), (1.3) разработка детального графика проекта и (1.4) оптимизация и согласование графика проекта. Рассмотрим подробно эти этапы.

1.1. Определение полного объема работ по проекту. Данный этап обычно является наиболее трудным в применении методики освоенного объема. Однако, если не определить на первом этапе полного объема работ (100% объема работ), необходимых для завершения проекта, оценивать ход выполнения проекта становится затруднительным. Без понимания того, что есть 100% работ, практически невозможно оценить, например, 10-ти, 20-ти или 25-ти процентное выполнение работ по проекту.

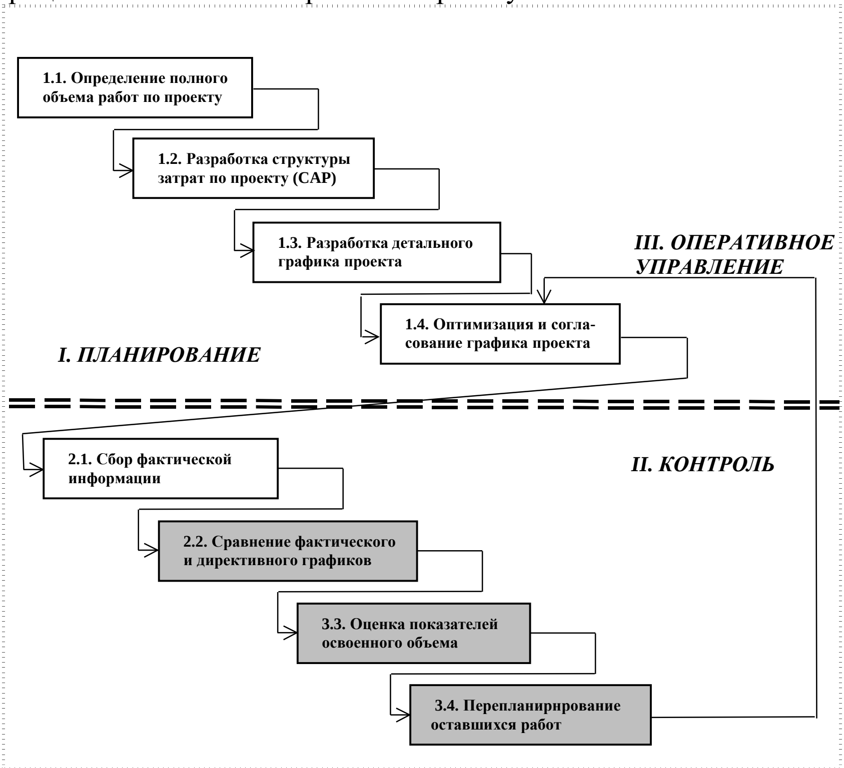


Рис. 15. Блок-схема процесса применения методики освоенного объема в оперативном управлении проектами (серым цветом выделены основные с точки зрения методики освоенного объема этапы).

В действительности с абсолютной точностью определить объем предстоящих работ достаточно сложно. Для этого необходимо определить границы проекта, чтобы появилась возможность планирования, расчета расписания и оценки его стоимости с определенной степенью достоверности.

Одним из наиболее распространенных инструментов оценки предстоящего объема работ по проекту является структура декомпозиции работ – WBS (Work Breakdown Structure), которая также необходима для руководителя проекта, как и организационная структура для администратора. WBS позволяет руководителю проекта определить объем работ по новому проекту с помощью разбиения каждой задачи (или операции в терминах СПУ) на измеримые пакеты работ. Если WBS-структура принята в качестве инструмента для ограничения области нового проекта, можно предпринимать следующие шаги для планирования проекта: анализ соотношения собственных и подрядных работ, оценка рисков, составление графиков, предварительные расчеты и, наконец, запуск проекта.

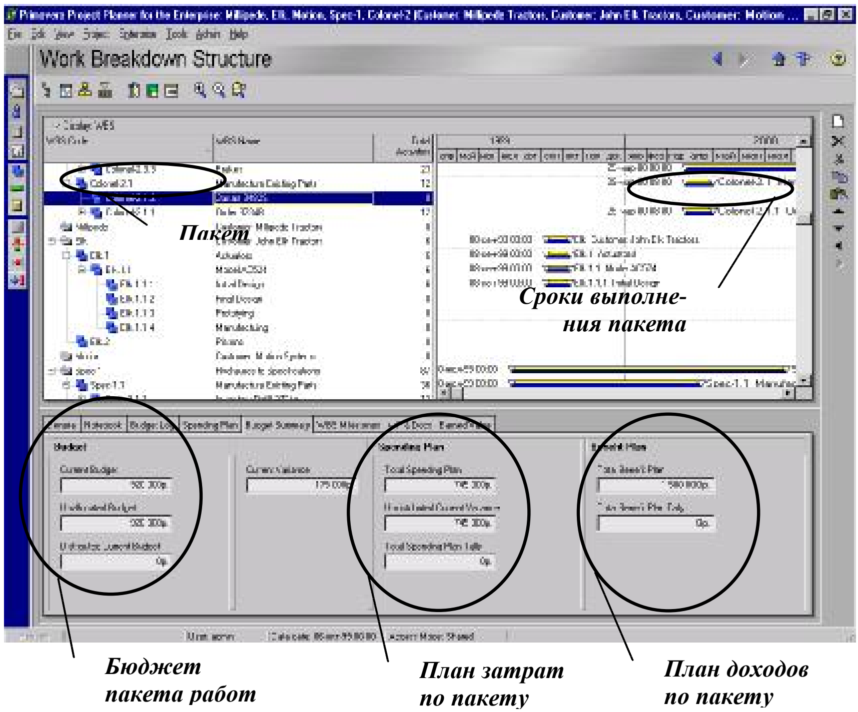


Рис. 16. Пример структуры декомпозиции работ

Пример[1] WBS приведен на рисунке 16: по каждому пакету работ может быть определен бюджет (Budget) – стоимость пакета работ, план затрат (Spending Plan) – финансы, имеющиеся в распоряжении для выполнения пакета работ, а также доход или выручка (Benefit Plan) – сумма, причитающаяся за выполнение пакета работ.

1.2. Разработка структуры затрат по проекту (CAP). Управление проектом с использованием методики освоенного объема осуществляется в рамках детальных CAP-планов (см. введение), которые и являются составными частями планирования проектов "снизу-вверх" (см. раздел 1.4).

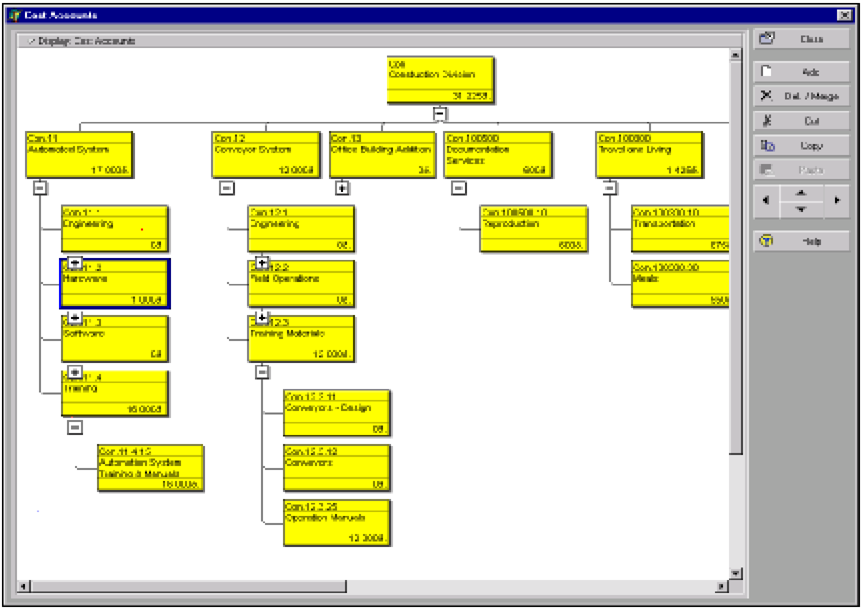


Рис. 17. Пример распределения затрат по «ячейкам»

---

[1] *Применения методики освоенного объема показаны на примере реального проекта модернизации автомобильного производства. К нему относятся как выпуск новых видов автомобилей, так и реконструкция старого и строительство нового здания для размещения новой линии сборки автомобилей. Автоматизация управления в рассматриваемом примере осуществлялась с помощью программного продукта* Primavera Project Planner for Enterprise *фирмы* Primavera Systems.

Каждая «ячейка» CAP-плана представляет собой объединение всех важнейших процедур, включая определение объема работ, планирование, расчет расписания, оценку затрат и санкционирование начала выполнения группы работ (см. рисунок 17).

Оценку выполнения проекта также целесообразно осуществлять в рамках детальных CAP-планов. Суммарное выполнение проекта является не чем иным, как суммой всего того, что отражают детальные CAP-планы. В сущности, каждый CAP-план представляет собой фрагмент общего проекта, а руководство над его выполнением, оценку его реализации и контроль берет на себя ответственный за данную CAP-ячейку.

Таким образом, при определении ответственности отдельных исполнителей или участников проекта за пакеты работ, формируется структура затрат (см. рисунок 18).

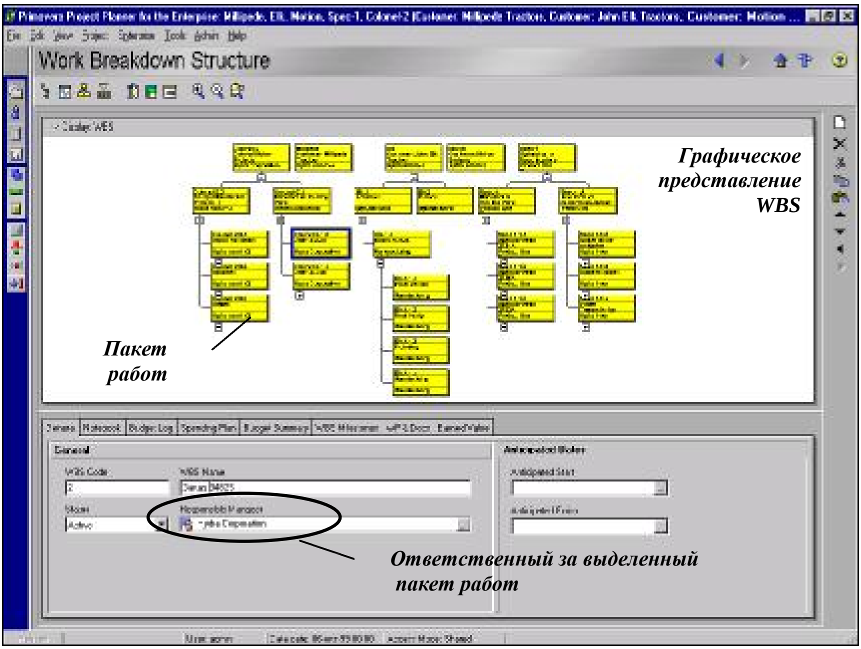


Рис. 18. Пример определения ответственных за пакеты работ.

Каждая ячейка позволяет оценить стоимость объема работ по пакету, относящемуся к ответственности определенного исполнителя. Такое представление позволяет достаточно быстро оценить стоимость проекта, проанализировать затраты по видам работ и участникам проекта, а также оценивать результаты реализации проекта и фактические затраты.

1.3. Разработка детального графика проекта. Ответственные за пакеты работ или соответствующие сотрудники плановых служб разрабатывают детальные графики по пакетам работ, согласовывая их между собой (см. рисунок 19).

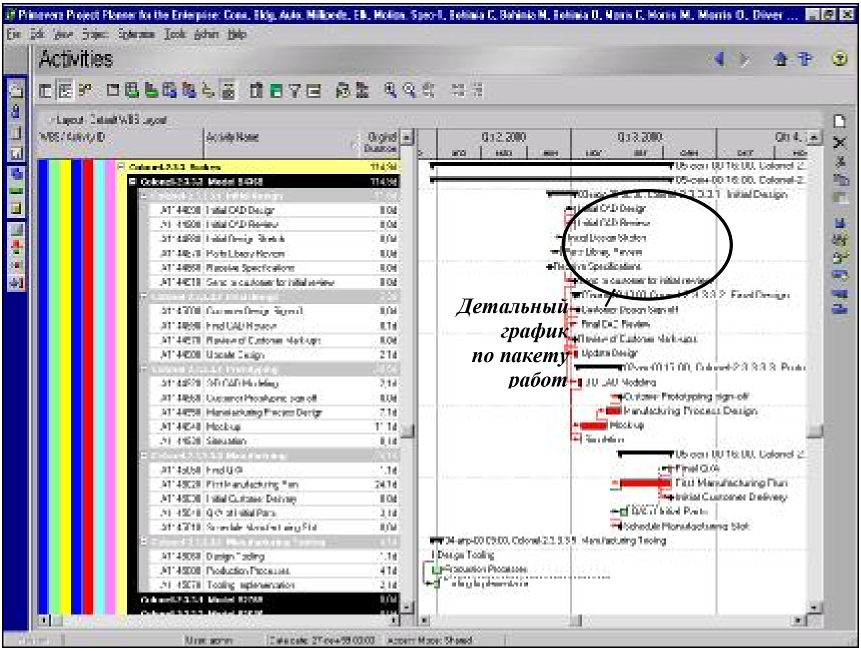


Рис. 19. Пример детального графика по пакетам работ

Это один из наиболее важных моментов, необходимых для внедрения методики освоенного объема. Результат планирования проекта должен отражать утвержденный объем работ, ограниченный временными рамками его выполнения. В терминологии методики освоенного объема стоимость этих запланированных работ и составит запланированный объем проекта. Когда предварительная работа над проектом закончится, и он перейдет в стадию реализации, фактически выполненные части запланированного объема работ будут переходить в разряд освоенного объема. Оба объема: запланированный и физически выполненный (освоенный объем) должны использовать одну и ту же систему измерения при оценке их выполнения (см. раздел 1.1).

Ресурсы с расценками и/или фиксированные затраты назначают работам, тем самым формируя бюджет проекта. Если разработать детальный сетевой график затруднительно, достаточно описать вехи выполнения пакета работ (WBS Milestone), оценить вес каждой из них и в дальнейшем оценивать выполнение пакета работ по достижению вех пакета (как показано на рисунке 20).

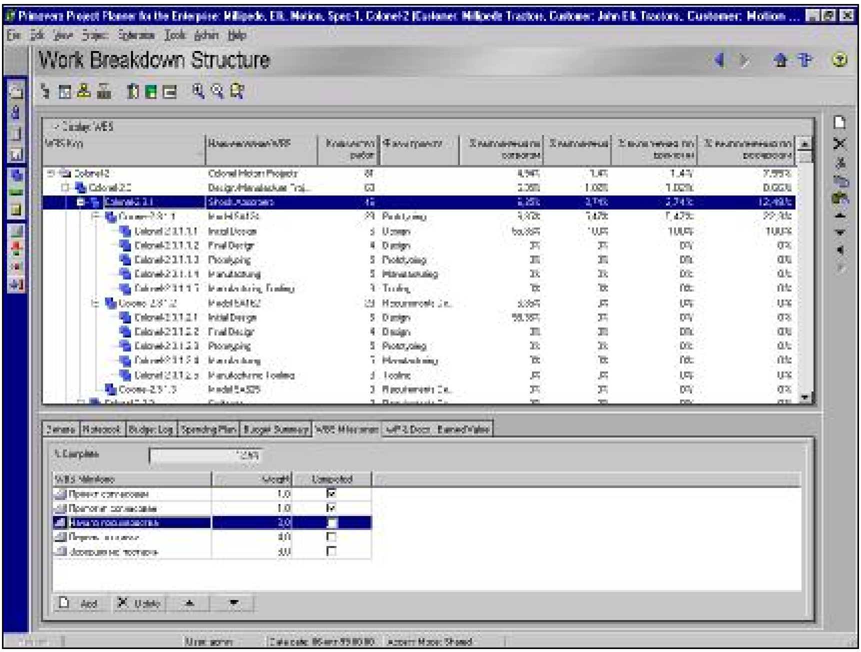


Рис. 20. Пример назначения вех для пакетов работ (WBS Milestone)

1.4. Оптимизация и согласование графика проекта. Поскольку обычно в проекте принимает участие большое количество участников, каждый из которых обладает собственными интересами, ресурсы ограничены, а также существуют ограничения по времени как на проект в целом, так и на отдельные его этапы, то первоначально разработанный график работ, как правило, требует оптимизации. Под оптимизацией в данном случае понимается перепланирование графика для максимального удовлетворения интересов всех участников проекта, а также существующих ограничений. Для этого используется механизм «Что-если», разработка и сравнение альтернативных вариантов и выбор наилучшего из них с использованием механизмов планирования, описанных в разделе 1.3. Такой план утверждается всеми участниками и является директивным при реализации проекта.

Подобные директивные графики должны содержать все зафиксированные САР-планы плюс управленческие резервы, которыми может распоряжаться руководитель проекта. В том случае, если этот резерв не передан под ответственность руководителя проекта, а контролируется вышестоящим руководителем, он должен быть исключен из директивного графика выполнения проекта.

В коммерческих проектах директивный график может включать также косвенные издержки, прибыль или даже налоги для адекватной привязки к выделенным фондам. Косвенные затраты, доход или управленческие резервы во внутренних проектах обычно не учитываются, поэтому в большинстве внутренних проектов стоимость директивного плана будет состоять исключительно из суммы САР-планов.

Таким образом, в директивном графике содержится следующая основная информация:

- 100% объема работ по проекту;
- стоимость проекта, график финансирования и расходования средств;
- структура затрат;
- детальный график работ с разбивкой по видам работ, участкам, исполнителям и т.д.

II. Контроль

Как показано на рисунке 15, после завершения фазы планирования начинается фаза контроля. Эта фаза состоит из следующих этапов: (2.1) сбор фактической информации, (2) сравнение фактического и директивного графиков, (3) оценка показателей освоенного объема и (4) перепланирование оставшихся работ. Особенностью данной фазы является то, что именно здесь в явном виде появляются показатели освоенного объема, подробно описанные в первой главе. Кроме того, в случае перепланирования оставшейся части работ, необходимо вернуться на стадию планирования для оптимизации и согласования, а также утверждения графика проекта, что есть суть оперативного управления проектом на стадии его реализации (см. ниже).

2.1. Сбор фактической информации. Информация о фактических датах начала и окончания для завершенных работ[1], дате фактического начала и проценте выполнения работы для выполняющихся работ, объеме использованных ресурсов и произведенных затратах позволяет оценить текущее положение дел по работам, пакетам работ или проекту в целом.

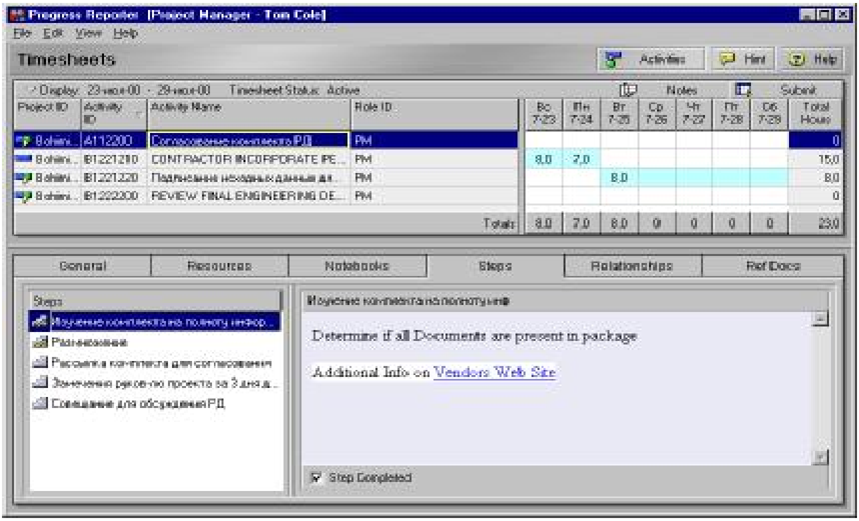


Рис. 21. Пример заполнения табеля. Вводятся фактически отработанные часы по каждой из работ, а также завершение шагов по работам. На основании информации о завершенных шагах определяется процент выполнения по работам.

[1] *Если по какому-либо из пакетов работ детальная информация о графике его выполнения отсутствует, то вводятся данные о достижении вех пакетов работ* (WBS Milestone) – *см. рисунок 20.*

На рисунке 21 представлен один из способов сбора фактической информации по проекту, использующих ведение табеля.

При этом процент выполнения может быть рассчитан на основании различных подходов, описанных в первой главе (см. рисунок 22).

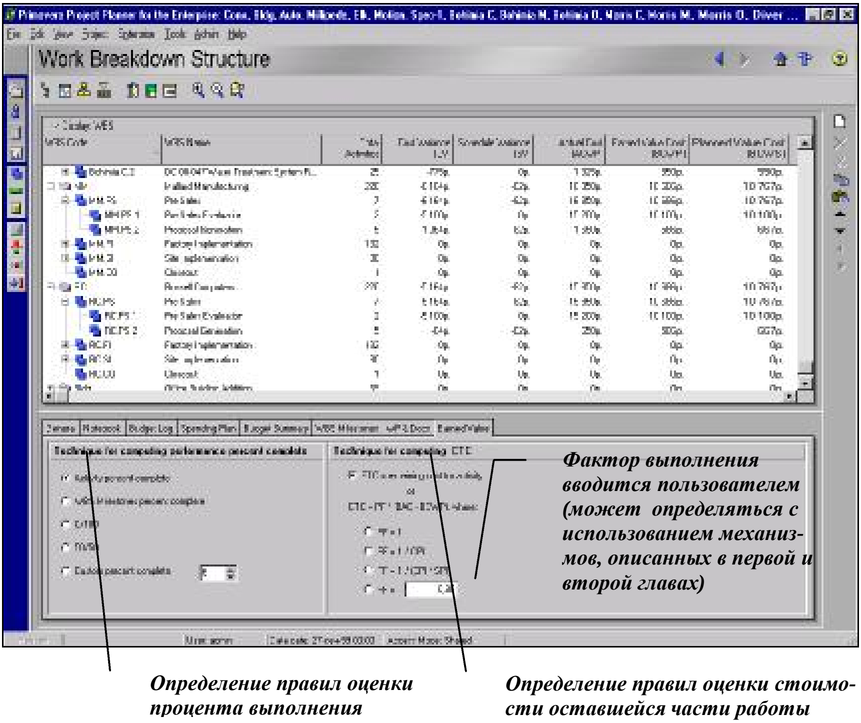


Рис. 22. Определение процента выполнения и способа расчета стоимости оставшейся части работы. Следует обратить внимание на то, что в случае расчета фактора выполнения (PF – Performance Factor) пользователем по собственной методике результат расчета может быть введен для каждого из пакетов работ.

2.2. Сравнение фактического и директивного графиков. В случае планирования и контроля проекта в рамках CAP-планов, появляется возможность определять соотношение между запланированными и выполненными работами. Разница между планируемым и выполненным объемом работ в методике освоенного объема называется *отклонением по графику*. Сравнение данных о текущем выполнении проекта с директивным (согласованным) графиком позволяет оценить соответствие фактической интенсивности выполнения работ по проекту запланированным показателям.

Отрицательный показатель отклонения по графику означает, что объем выполненных работ по проекту не соответствует объему запланированных работ, то есть проект отстает от согласованного графика работ. Необходимость ускорения выполнения работы, выполнение которой отстает от графика, должна определяться исходя из ее критичности для выполнения всего проекта. Если отстающая работа имеет существенное значение, или отставание от графика по ней может привести к срыву срока завершения всего проекта в целом, то немедленно должны быть предприняты усилия для наверстывания сроков (см. механизмы оперативного управления, описанные во второй главе).

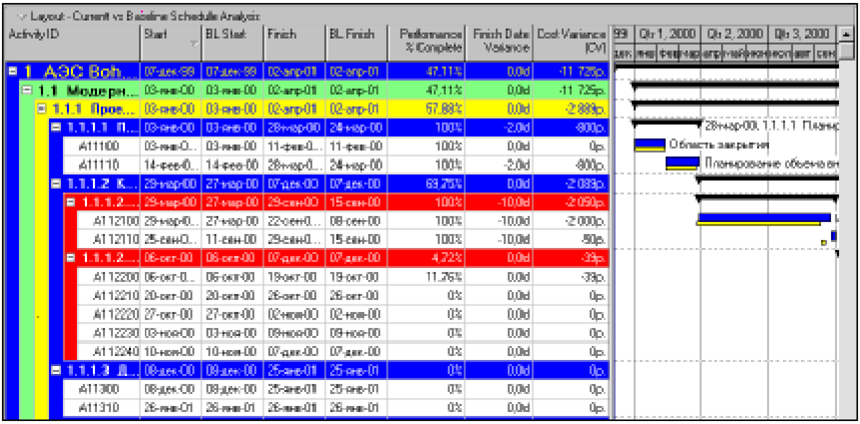
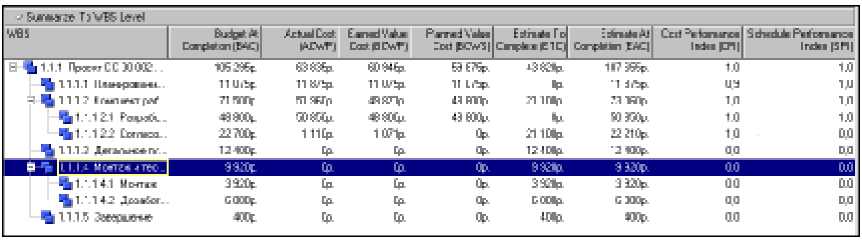


Рис. 23. Пример сравнения текущего и директивного графиков. В таблице для сравнения приведены данные по фактическому и плановому времени начала и окончания, процент выполнения по работе, отклонение по времени завершения и перерасход. На графической части темные линии соответствуют выполненным работам, светлые – соответствующим работам директивного графика.

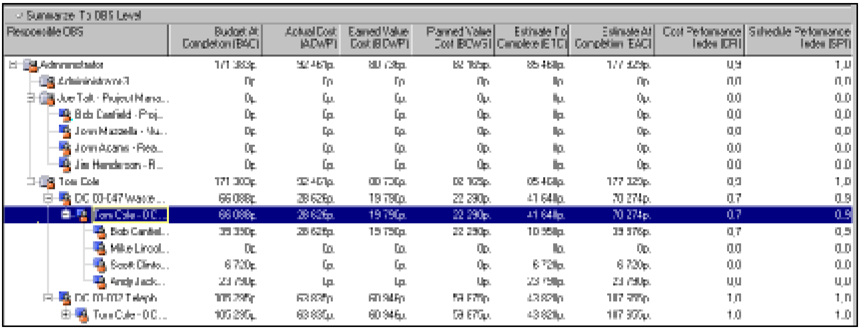
И наоборот, если показатель отклонения по графику при выполнении работ по данной задаче имеет положительное значение или отставание не несет большого риска для выполнения всего проекта в целом, то нет необходимости привлекать дополнительные ресурсы, чтобы ускорить выполнение этой задачи (см. также обсуждение во введении ко второй главе). Пример сравнения текущего и директивного графиков показан на рисунке 23.

2.3. Оценка показателей освоенного объема. После сравнения фактических и директивных показателей по проекту целесообразно рассчитать показатель освоения затрат, который определяется как отношение между стоимостью освоенного объема работ в процессе выполнения проекта и расходами, которые фактически пришлось понести для того, чтобы достичь этого результата (см. введение и первую главу). Разница между стоимостью выполненных работ и величиной фактических затрат (иногда удобнее использовать отношение этих величин – см. введение) составляет показатель освоения затрат. Если на проект в течение всего времени его реализации тратится больше, чем плановая стоимость выполненных работ, то суммарный перерасход перерасход по проекту неизбежен. Известно, что абсолютные перерасходы компенсировать невозможно. Перерасход, выраженный в процентных величинах, также говорит об ухудшении ситуации в проекте, если только руководитель проекта не предпримет активных действий для устранения непредвиденного роста затрат. Примеры форм для анализа (см. методики анализа во введении и первой главе) показателей освоенного объема приведены на рисунках 24-26.


Summarize To WBS Level

WBS	Budget At Completion (BAC)	Actual Cost (ACWP)	Earned Value Cost (BCWP)	Planned Value Cost (BCWS)	Estimate To Complete (ETC)	Estimate At Completion (EAC)	Cost Performance Index (CPI)	Schedule Performance Index (SPI)
1.1.1 Проект СС 30 002...	105 295р.	63 835р.	60 946р.	59 675р.	43 820р.	107 355р.	1,0	1,0
1.1.1.1 Планирование...	11 075р.	11 875р.	11 075р.	11 075р.	0р.	11 875р.	0,9	1,0
1.1.1.2 Комплект раб	71 800р.	51 960р.	49 870р.	48 800р.	21 100р.	73 160р.	1,0	1,0
1.1.1.2.1 Разраб...	48 800р.	50 850р.	48 800р.	48 800р.	0р.	50 350р.	1,0	1,0
1.1.1.2.2 Согласо...	22 700р.	1 110р.	1 071р.	0р.	21 100р.	22 210р.	1,0	0,0
1.1.1.3 Детальное п...	12 400р.	0р.	0р.	0р.	12 400р.	12 400р.	0,0	0,0
1.1.1.4 Монтаж и тес...	9 920р.	0р.	0р.	0р.	9 920р.	9 920р.	0,0	0,0
1.1.1.4.1 Монтаж	3 920р.	0р.	0р.	0р.	3 920р.	3 920р.	0,0	0,0
1.1.1.4.2 Доработ...	6 000р.	0р.	0р.	0р.	6 000р.	6 000р.	0,0	0,0
1.1.1.5 Завершение	400р.	0р.	0р.	0р.	400р.	400р.	0,0	0,0

Рис. 24. Пример табличной формы представления показателей освоенного объема по пакетам работ.



Responsible OBS	Budget At Completion (BAC)	Actual Cost (ACWP)	Earned Value Cost (BCWP)	Planned Value Cost (BCWS)	Estimate To Complete (ETC)	Estimate At Completion (EAC)	Cost Performance Index (CPI)	Schedule Performance Index (SPI)
Administrator	171 383р.	92 467р.	80 736р.	82 165р.	85 468р.	177 425р.	0,9	1,0
Administrator3	0р.	0р.	0р.	0р.	0р.	0р.	0,0	0,0
Joe Tolt - Project Mana...	0р.	0р.	0р.	0р.	0р.	0р.	0,0	0,0
Bob Canfield - Proj...	0р.	0р.	0р.	0р.	0р.	0р.	0,0	0,0
John Mazzella - Ma...	0р.	0р.	0р.	0р.	0р.	0р.	0,0	0,0
John Adams - Res...	0р.	0р.	0р.	0р.	0р.	0р.	0,0	0,0
Jim Henderson - R...	0р.	0р.	0р.	0р.	0р.	0р.	0,0	0,0
Tom Cole	171 383р.	92 467р.	80 736р.	82 165р.	85 468р.	177 425р.	0,9	1,0
DC 00-047 Wareh...	66 088р.	28 626р.	19 790р.	22 290р.	41 648р.	70 274р.	0,7	0,9
Tom Cole - DC...	66 088р.	28 626р.	19 790р.	22 290р.	41 648р.	70 274р.	0,7	0,9
Bob Canfiel...	35 350р.	28 626р.	19 790р.	22 290р.	10 958р.	39 576р.	0,7	0,9
Mike Lincol...	0р.	0р.	0р.	0р.	0р.	0р.	0,0	0,0
Scott Clinto...	6 720р.	0р.	0р.	0р.	6 720р.	6 720р.	0,0	0,0
Andy Jack...	23 798р.	0р.	0р.	0р.	23 798р.	23 798р.	0,0	0,0
DC 00-012 Teleph	105 295р.	63 835р.	60 946р.	59 875р.	43 828р.	107 395р.	1,0	1,0
Tom Cole - DC...	105 295р.	63 835р.	60 946р.	59 875р.	43 828р.	107 395р.	1,0	1,0

Рис. 25. Пример табличной формы представления показателей освоенного объема по ответственным за пакеты работ.

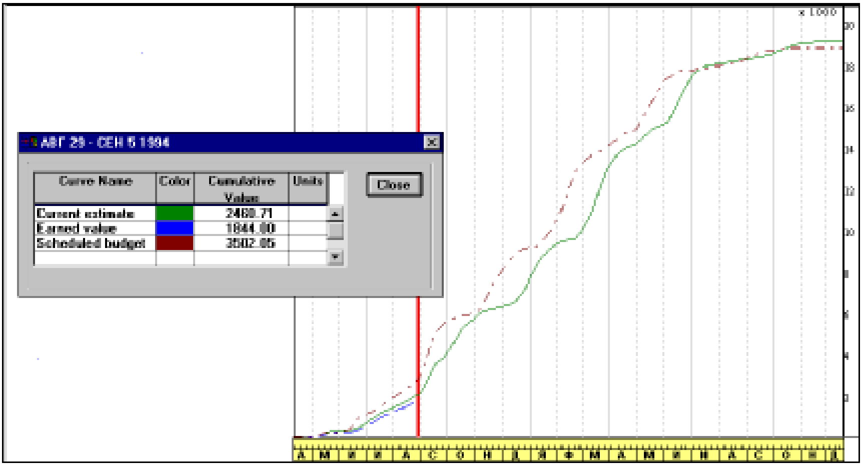


Рис. 26. Пример графической формы представления показателей освоенного объема.

2.4. Перепланирование оставшихся объемов работ. Периодически, необходимо пересчитывать стоимость проекта, основываясь на сравнении хода его выполнения с исходным планом. Один из наиболее полезных аспектов методики освоенного объема – ее способность прогнозировать стоимость проекта. На основании сравнения результатов выполнения проекта с планом руководитель проекта может точнее оценить общий объем финансирования, необходимый для завершения той или иной работы или проекта в целом (см. введение и раздел 1.3). В частности, в рамках существующих программных средств с учетом специфики различных пакетов работ к ним могут быть применены различные схемы пересчета стоимости оставшейся части работ (см. рисунок 22):

1. назначение стоимости оставшейся части работ «вручную» (по усмотрению пользователя);
2. вычисление разницы между плановым и фактическим объемом;
3. пересчет с использованием поправки на показатель освоения затрат (CPI);
4. пересчет с использованием поправки на показатели освоения затрат и выполнения графика работ (CPI и SPI);
5. пересчет с использование коэффициента, назначенного ответственным исполнителем.

Подобные расчеты обеспечивают реалистичную оценку затрат, необходимых для завершения работ, и являются чем-то вроде проверки умозрительных заключений, производимых обычно на основании принятия желаемого за действительное.

Какими бы ни были результаты, достигнутые в проекте к текущей дате (моменту принятия оперативных управленческих решений), в сущности, они являются пройденным этапом, т.е. "что упало, то пропало". Таким образом, любые улучшения выполнения проекта (см. механизмы управления, описанные во второй главе) должны быть связаны с будущими работами (задачами), которые находятся на отрезке времени между текущей датой и моментом завершения проекта. Методика освоенного объема позволяет руководителю проекта оценить выполнение проекта по затратам и графику на сегодняшний день. В том случае, если результаты на текущую дату далеки от ожидаемых, руководитель проекта может занять более активную позицию по отношению к оставшимся работам по проекту. Описанная методика дает руководителю проекта возможность оценивать объем выполненных работ и объем работ, которые осталось выполнить до завершения проекта для того, чтобы оставаться в рамках существующих ограничений.

III. Оперативное управление

Исходный директивный график выполнения проекта, согласованный до начала реализации проекта, будет функционировать настолько хорошо, насколько хорошо отслеживаются внесения всех предлагаемых изменений по мере его реализации. Любой базовый проект быстро придет в несоответствие, если вовремя не вносить изменения в утвержденный график путем добавления или исключения дополнительного объема работ, а также корректировки технологии. Как и на этапе планирования (см. рисунок 15), такое внесение изменений должно быть согласовано со всеми участниками проекта для обеспечения их скоординированных действий при реализации проекта. Механизмы управления, используемые в фазе оперативного управления, подробно описаны в разделе 1.3 и второй главе настоящей работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Авдеев Ю.А. Оперативное планирование в целевых программах. Одесса: Маяк, 1990. - 132 с.

2. Айвазян С.А., Мхитарян В.С. Прикладная статистика и основы эконометрики. М.: ЮНИТИ, 1998. – 1022 с.

3. Александров Н.И., Комков Н.И. Моделирование организации и управления решением научно-технических проблем. М.: Наука, 1988. – 216 с.

4. Алтаев В.Я., Бурков В.Н., Тейман А.И. Теория сетевого планирования и управления // Автоматика и Телемеханика. 1966. № 5.

5. Ансоф И. Стратегическое управление. М.: Экономика, 1989. - 519 с.

6. Ануфриев И.К., Бурков В.Н., Вилкова Н.И., Рапацкая С.Т. Модели и механизмы внутрифирменного управления. М.: ИПУ РАН, 1994. - 72 с.

7. Багриновский К.А. Основы согласования плановых решений. М.: Наука, 1977. - 303 с.

8. Баркалов С.А., Бурков В.Н., Гилязов Н.М. Методы агрегирования в управлении проектами. М.: ИПУ РАН, 1999. – 55 с.

9. Баркалов С.А., Бурков В.Н., Курочка П.Н., Образцов Н.Н. Задачи управления материально-техническим снабжением в рыночной экономике. М.: ИПУ РАН, 2000. – 58 с.

10. Бир С. Мозг фирмы. М.: Радио и связь, 1993. - 416 с.

11. Бобрышев Д.Н., Русинов Ф.М. Управление научно-техническими разработками в машиностроении. М.: Машиностроение, 1976. – 236 с.

12. Болтянский В.Г. Математические методы оптимального управления. М.: Наука, 1968. – 408 с.

13. Бурков В.Н. Распределение ресурсов как задача оптимального быстродействия // Автоматика и Телемеханика. 1966. № 7.

14. Бурков В.Н., Горгидзе И.А., Ловецкий С.Е. Прикладные задачи теории графов. Тбилиси: Мецниереба, 1974. - 234 с.

15. Бурков В.Н., Данев Б., Еналеев А.К. и др. Большие системы: моделирование организационных механизмов. М.: Наука, 1989. - 245 с.

16. Бурков В.Н., Еналеев А.К., Новиков Д.А. Механизмы стимулирования в вероятностных моделях социально-экономических систем // Автоматика и Телемеханика. 1993. № 11. С. 3 - 30.

17. Бурков В.Н., Еналеев А.К., Новиков Д.А. Механизмы функционирования социально-экономических систем с сообщением информации // Автоматика и Телемеханика. 1996. № 3. С. 3 - 25.

18. Бурков В.Н., Квон О.Ф., Цитович Л.А. Модели и методы мультипроектного управления. М.: ИПУ РАН, 1998. – 62 с.

19. Бурков В.Н., Кондратьев В.В. Механизмы функционирования организационных систем. М.: Наука, 1981. - 384 с.
20. Бурков В.Н., Ланда Б.Д., Ловецкий С.Е., Тейман А.И., Чернышев В.Н. Сетевые модели и задачи управления. М.: Советское радио, 1967. – 144 с.
21. Бурков В.Н., Новиков Д.А. Как управлять проектами. М.: Синтег, 1997. – 188 с.
22. Бурков В.Н., Новиков Д.А. Теория активных систем: состояние и перспективы. М.: СИНТЕГ, 1999. – 128 с.
23. Бурков В.Н. и др. Сетевые модели и задачи управления. Библиотека технической кибернетики. М.: Советское радио, 1967.
24. Бушуев С.Д., Колосова Е.В., Хулап Г.С., Цветков А.В. Методы и средства разрешения конфликтов при управлении сложными проектами / Материалы Международного симпозиума по управлению проектами. С.-Пб., 1995. С. 212 – 216.
25. Вагнер Г. Основы исследования операций. М.: Мир, 1972. Т. 1 – 4.
26. Васильев В.М., Зеленцов Л.Б. Автоматизация организационно-технологического планирования в строительном производстве. М.: Стройиздат, 1991. – 152 с.
27. Васильев Д.К., Карамзина Н.С., Колосова Е.В., Цветков А.В. Деловая игра как средство внедрения системы управления проектами / Материалы Международного симпозиума по управлению проектами в переходной экономике. Москва, 1999.
28. Васильев Д.К., Колосова Е.В., Хулап Г.С., Цветков А.В. Системы и механизмы реализации проектов: опыт внедрения / Материалы Международного симпозиума по управлению проектами в переходной экономике. Москва, 1997. Том 1. С. 683 – 687.
29. Васильев Д.К., Колосова Е.В., Цветков А.В. Процедуры управления проектами // Инвестиционный эксперт. 1998. № 3. С. 9 – 10.
30. Васкевич Д. Стратеги клиент/сервер. Руководство по выживанию для специалистов по реорганизации бизнеса. К.: «Диалектика», 1996. – 384 с.
31. Виханский О.С., Наумов А.И. Менеджмент: человек, стратегия, организация, процесс. М.: Изд-во МГУ, 1996. - 416 с.
32. Воронов А.А. Исследование операций и управление. М.: Наука, 1970. – 128 с.
33. Воропаев В.И., Любкин С.М., Голенко-Гинзбург Д. Модели принятия решений для обобщенных альтернативных стохастических сетей // Автоматика и Телемеханика. 1999. № 10. С. 144 – 152.
34. Воропаев В.И. Методические указания по декомпозиции объектов строительства на проектно-технологические модули. М.: ВНИИГМ, 1988. – 91 с.

35. Воропаев В.И. Модели и методы календарного планирования в автоматизированных системах управления строительством. М.: Стройиздат, 1974. – 232 с.

36. Воропаев В.И. Управление проектами в России. М.: Аланс, 1995.-225с.

37. Воропаев В.И., Шейнберг М.В. и др. Обобщенные сетевые модели. М.: ЦНИПИАС, 1971. – 118 с.

38. Гермейер Ю.Б. Игры с непротивоположными интересами. М.: Наука, 1976. - 327 с.

39. Голенко Д.И. Статистические методы сетевого планирования и управления. М.: Наука, 1968. – 400 с.

40. Горелик В.А., Кононенко А.Ф. Теоретико-игровые модели принятия решений в эколого-экономических системах. М.: Радио и связь, 1982. - 144 с.

41. Гриценко Н.Л., Зеленова А.В., Колосова Е.В., Цветков А.В. От сметы к проекту / Материалы Международного симпозиума по управлению проектами в переходной экономике. Москва, 1999.

42. Губко М.В. Задача теории контрактов для модели простого АЭ / «Управление в социально-экономических системах». Сборник трудов молодых ученых ИПУ РАН. М.: Фонд «Проблемы управления», 2000.

43. Губко М.В., Спрысков Д.С. Учет кооперативного взаимодействия активных элементов в механизмах распределения ресурса и активной экспертизы / «Управление в социально-экономических системах». Сборник трудов молодых ученых ИПУ РАН. М.: Фонд «Проблемы управления», 2000.

44. Зуховицкий С.И., Радчик И.А. Математические методы сетевого планирования. М.: Наука, 1965. – 296 с.

45. Иванилов Ю.П., Лотов А.В. Математические модели в экономике. М.: Наука, 1979. - 304 с.

46. Интриллигатор М. Математические методы оптимизации и экономическая теория. М.: Прогресс, 1975. - 606 с.

47. Кини Р.Л., Райфа Х. Принятие решений при многих критериях: предпочтения и замещения. М.: Радио и связь, 1981. – 560 с.

48. Клейнер Г.Б. Производственные функции: теория, методы, применение. М.: Финансы и статистика, 1986. - 238 с.

49. Клименко С.В., Крохин И.В., Кущ В.М., Лагутин Ю.Л. Электронные документы в корпоративных сетях. М.: Анкей, 1998. – 272 с.

50. Кокс Д., Хинкин Д. Теоретическая статистика. М.: Мир, 1978.- 558 с.

51. Колосова Е.В. Методика освоенного объема: проблемы идентификации моделей проектов / Материалы международной конференции SICPRO’2000. М.: ИПУ РАН, 2000.

52. Колосова Е.В. Показатели освоенного объема в оперативном управлении проектами / «Управление в социально-экономических системах». Сборник трудов молодых ученых ИПУ РАН. М.: Фонд «Проблемы управления», 2000.
53. Колосова Е.В., Цветков А.В. Информатизация корпоративного управления проектами / Материалы Международного симпозиума по управлению проектами в переходной экономике. Москва, 1999.
54. Колосова Е.В., Цветков А.В. Корпоративные системы управления проектами на базе программных продуктов Primavera. М.: Материалы конференции «Офисные Информационные Системы‘96», Центр Информационных Технологий, 1996.
55. Комков Н.И., Левин Б.И., Журдан Б.Е. Организация систем планирования и управления прикладными исследованиями и разработками. М.: Наука, 1986. – 233 с.
56. Кононенко А.Ф., Халезов А.Д., Чумаков В.В. Принятие решений в условиях неопределенности. М.: ВЦ АН СССР, 1991. – 211 с.
57. Куликов Ю.А. Оценка качества решений в управлении строительством. М.: Стройиздат, 1990. – 144 с.
58. Либерзон В.И. Основы управления проектами. М.: Нефтяник, 1997. - 150 с.
59. Ли Э.Б., Маркус Л. Основы теории оптимального управления. М.: Наука, 1972 – 576 с.
60. Литвак Б.Г. Экспертная информация: методы получения и анализа. М.: Радио и связь, 1982. – 184 с.
61. Литвак Б.Г. Экспертные оценки и принятие решений. М.: Патент, 1996. - 271 с.
62. Лотоцкий В.А. Идентификация структур и параметров систем управления // Измерения. Контроль. Автоматизация. 1991. № 3-4. С.30–38.
63. Маленво Э. Лекции по микроэкономическому анализу. М.: Наука, 1985. - 392 с.
64. Маркотенко Е.В. Поведение активного элемента в условиях простого конкурсного механизма распределения ресурса / «Управление в социально-экономических системах». Сборник трудов молодых ученых ИПУ РАН. М.: Фонд «Проблемы управления», 2000.
65. Менар К. Экономика организаций. М.: ИНФРА-М, 1996. - 160 с.
66. Месарович М., Мако Д., Такахара И. Теория иерархических многоуровневых систем. М.: Мир, 1973. - 344 с.
67. Мескон М., Альберт М., Хедоури Ф. Основы менеджмента. М.: Дело, 1998. - 800 с.
68. Мильнер Б.З., Евенко Л.И., Раппопорт В.С. Системный подход к организации управления. М.: Экономика, 1983. - 224 с.

69. Мир управления проектами / Под. ред. Х. Решке, и Х. Шелле. М.: Аланс, 1993. – 304 с.
70. Михалевич В.С., Волкович В.Л. Вычислительные методы исследования и проектирования сложных систем. М.: Наука, 1982. - 286 с.
71. Моисеев Н.Н. Элементы теории оптимальных систем. М.: Наука, 1974. - 526 с.
72. Моррис У. Наука об управлении: Байесовский подход. М.: Мир, 1971.
73. Мулен Э. Кооперативное принятие решений: аксиомы и модели. М.: Мир, 1991. - 464 с.
74. Новиков Д.А. Закономерности итеративного научения. М.: ИПУ РАН, 1998. – 96 с.
75. Новиков Д.А. Механизмы стимулирования в моделях активных систем с нечеткой неопределенностью. М.: ИПУ РАН, 1997. - 101 с.
76. Новиков Д.А. Механизмы функционирования многоуровневых организационных систем. М.: Фонд "Проблемы управления", 1999. - 150 с.
77. Новиков Д.А. Обобщенные решения задач стимулирования в активных системах. М.: ИПУ РАН, 1998. - 68 с.
78. Новиков Д.А., Петраков С.Н. Курс теории активных систем. М.: СИНТЕГ, 1999. – 108 с.
79. Новиков Д.А. Стимулирование в социально-экономических системах (базовые математические модели). М.: ИПУ РАН, 1998. - 216 с.
80. Ногин В.Д., Протодьяконов И.О., Евлампиев И.И. Основы теории оптимизации. М.: Высшая школа, 1986. – 384 с.
81. Орлов А.И. Устойчивость в социально-экономических моделях М.: Наука, 1979. - 218 с.
82. Орловский С.А. Проблемы принятия решений при нечеткой исходной информации. М.: Наука, 1981. - 206 с.
83. Оуэн Г. Теория игр. М.: Мир, 1971. - 230 с.
84. Перегудов Ф.И., Тарасенко Ф.П. Введение в системный анализ. М.: Высшая школа, 1989. - 367 с.
85. Петраков С.Н. Условия существования эквивалентных прямых механизмов для непрямых механизмов планирования общего вида / «Управление в социально-экономических системах». Сборник трудов молодых ученых ИПУ РАН. М.: Фонд «Проблемы управления», 2000.
86. Петросян Л.А., Зенкевич Н.А., Семина Е.А. Теория игр. М.: Высшая школа, 1998. - 304 с.
87. Поспелов Г.С., Ириков В.А., Курилов А.Е. Процедуры и алгоритмы формирования комплексных программ. М.: Наука, 1985. – 424 с.
88. Поспелов Г.С., Ириков В.А. Программно-целевое планирование и управление. М.: Советское радио, 1976. - 344 с.
89. Санталайнен Т. Управление по результатам. М.: Прогресс, 1988.-320с.

90. Толковый словарь по управлению проектами / Под ред. В.К. Иванец, А.И. Кочеткова, В.Д. Шапиро, Г.И. Шмаль. М.: ИНСАН, 1992.
91. Симионова Н.Е. Управление реформированием строительных организаций. М.: Синтег, 1998. – 224 с.
92. Технология и опыт вывода предприятия из критического и банкротного состояния в конкурентоспособное / Под. ред. В.А. Ирикова. Москва, 1996. – 232 с.
93. Управление проектами. Зарубежный опыт / Под. ред. В.Д. Шапиро. С.-Пб.: «ДваТрИ», 1993. – 443 с.
94. Управление проектами / Общая редакция – В.Д. Шапиро. С.-Пб.: «ДваТрИ», 1996. – 610 с.
95. Фольмут Х.Й. Инструменты контроллинга. М.: Финансы и статистика, 1998. – 288 с.
96. Форд Л., Фалкерсон Д. Потоки в сетях. М.: Мир, 1966. – 276 с.
97. Цыганов В.В. Адаптивные механизмы в отраслевом управлении М.: Наука, 1991. - 166 с.
98. Цыпкин Я.З. Основы информационной теории идентификации. М.: Наука, 1984. – 336 с.
99. Эйкхофф П. Основы идентификации систем управления. М.: Мир, 1975. – 688 с.
100. Эткинд Ю.Л. Организация и управление строительством. Свердловск: УГУ, 1991. – 312 с.
101. Янг С. Системное управление организацией. М.: Советское радио, 1982. - 456 с.
102. Abba W.F. Beyond communicating with earned value: managing integrated cost, schedule and technical performance / PMI Symposium. New Orleans, 1995. P. 2 – 6.
103. Abba W. Interview // Program Analyst. Office of the Under Secretary of Defense. Washington.
104. Arrow K.J. Social choice and individual values. Chicago: Univ. of Chicago, 1951. - 204 p.
105. Azariadis C. Implicit contracts and underemployment equilibria // Journal of Political Economy. 1975. N 6. P. 1183 - 1202.
106. Badiru A.B. Activity-resource assignment using critical resource diagramming // International Journal of Project Management. 1993. Vol. 24. N 3. P. 15 – 21.
107. Baily M. Wages and employment under uncertain demand // Review of Economic Studies. 1974. Vol. 41. N 125. P. 37 - 50.
108. Barr Z. Earned value analysis: a case study // PM Network. 1996. N 12. P. 31 – 37.

109. Bubshait K.A., Selen W.J. Project characteristics that influence the implementation of Project Management techniques: a survey // International Journal of Project Management. 1992. Vol. 23. N 2. P. 43 – 47.
110. Burkov V.N. Problems of optimal distribution of resources // Control and Cybernetics. 1972. Vol. 1. N. 1/2.
111. Buttle T. A Hitchhiker's guide to Project Management / PMI Symposium. Chicago, 1997. P. 89 – 97.
112. Christinsen D.S. A review of cost/schedule control systems criteria literature // International Journal of Project Management. 1994. Vol. 25. N 3. P. 32 – 39.
113. Christensen D.S. An analysis of costs overruns on defense acquisition contracts // International Journal of Project Management. 1993. Vol. 24. N 3. P. 43 – 48.
114. Christensen D.S. The estimate at complete problem: a review of three studies // International Journal of Project Management. 1993. Vol. 24. N 1. P. 37 – 42.
115. Coleman J.H. Using cumulative event curves on automotive programs / PMI Symposium. Pittsburgh, 1992. P. 101 – 107.
116. Connely A. Ad-hoc hierarchies for flat-flexible organizations / PMI Symposium. Pittsburgh, 1992. P. 329 – 335.
117. Cooper K.G. The rework cycle: benchmarks for the Project manager // International Journal of Project Management. 1993. Vol. 24. N 1. P. 17 – 22.
118. Cooper K.G. The rework cycle: why projects are mismanaged // PM Network. 1993. N 2. P. 5 – 7.
119. Dasgupta P., Hammond P., Maskin E. The implementation of social choice rules: some general results on incentive compatibility // Review of Economic Studies. 1979. Vol. 46. № 2. P. 185 - 216.
120. Devaux S.A. When the DIPP dips // International Journal of Project Management. 1992. Vol. 22. N 3. P. 45. – 49.
121. Fieldman R.E. Some thoughts on C/SCSC and current state of Project Management tools // PM Network. 1993. N 10. P. 6 – 8.
122. Fleming Q.W., Hoppelman J.M. Earned value Project Management. PMI, 1996. – 141 p.
123. Fleming Q.W., Hoppelman J.M. Forecasting the final costs and schedule results // PM Network. 1996. N 1. P. 13 – 18.
124. Fleming Q.W., Hoppelman J.M. Monitoring performance against the baseline // PM Network. 1995. N 9. P. 9 – 14.
125. Fleming Q.W., Hoppelman J.M. Taking step four with earned value: establish the Project baseline // PM Network. 1995. N 5. P. 26 – 29.
126. Fleming Q.W., Hoppelman J.M. Taking step one with earned value: scope the Project // PM Network. 1994. N 5. P. 22 – 24.

127. Fleming Q.W., Hoppelman J.M. Taking step two with earned value: plan and schedule the Project // PM Network. 1994. N 9. P. 35 – 37.
128. Fleming Q.W., Hoppelman J.M. Taking step three with earned value: estimate and budget resources // PM Network. 1995. N 1. P. 39 – 41.
129. Fleming Q.W., Hoppelman J.M. The earned value body of knowledge // PM Network. 1996. N 5. P. 11 – 16.
130. Fleming Q.W., Hoppelman J.M. The earned value concept - back to basis // PM Network. 1994. N 1. P. 27 – 29.
131. Gilyutin I. Using Project Management in a nonlinear environment // International Journal of Project Management. 1993. Vol. 24. N 4. P. 20 – 26.
132. Globerson S. Effective Management of Project process / PMI Symposium. New Orleans, 1995. P. 381 - 387.
133. Grossman S., Hart O. An analysis of the principal-agent problem // Econometrica. 1983. Vol. 51. N 1. P. 7 - 45.
134. Groves T., Radner R. The allocation of resources in a team // Journal of Economic Theory. 1972. Vol. 4. N 2. P. 415 - 441.
135. Hart O.D., Holmstrom B. Theory of contracts // Advances in economic theory. 5th world congress. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1987. P. 71 - 155.
136. Hart O.D. Optimal labor contracts under asymmetric information: an introduction // Review of Economic Studies. 1983. Vol. 50. N 1. P. 3 - 35.
137. Hatfield M.A. Managing to the corner cube: three-dimensional Management in a three-dimensional world // International Journal of Project Management. 1995. Vol. 26. N 1. P. 13 – 20.
138. Hurwicz L. On informationally decentralized systems / Decision and organization. Amsterdam: North-Holland Press, 1972. P. 297 - 336.
139. Hatfield M.A. The case for earned value // PM Network. 1996. N 12. P. 25 – 27.
140. Ingram T. Client/Server: Imaging and earned value: a success story / PM Network. 1995. N 12. P. 21 – 25.
141. Marchak J., Radner R. Economic theory of teams. New Haven - London: Yale Univ. Press, 1976. - 345 p.
142. Matsuura N., Yonts M.G. Monitoring and rewarding multiple projects using a weighted performance index in a performance-based contract / PMI Symposium. Chicago, 1997. P. 142 – 146.
143. Myerson R.B. Game theory: analysis of conflict. London: Harvard Univ. Press, 1991. - 568 p.
144. Myerson R.B. Optimal coordination mechanisms in generalized principal-agent problems // Journal of Mathematical Economy. 1982. Vol.10. №1. P. 67 - 81.

145. Newell M. Estimating techniques that will revolutionize your projects / PMI Symposium. Boston, 1996. P. 1 – 5.
146. Peters T.J., Watermann R.H. In search of excellence. NY: H&R, 1982. - 360 p.
147. Primavera Project Planner: Manual Guide.
148. Project Management software survey // PM Network. 1996. N 9. P. 27–40.
149. Robinson P.B. The performance measurement baseline – a statistical view // PM Network. 1997. N 6. P. 47 – 52.
150. Simon H. Administrative behavior. N.Y.: Frece Press, 1976. - 364 p.
151. Singh A. A taxonomy of practical Project cost forecasting techniques / PMI Symposium. Chicago, 1997. P. 198 – 204.
152. Singh A. Earned value analysis interface with line of balance / PMI Symposium. Chicago, 1997. P. 193 – 197.
153. Singletary N. What's the value of earned value // PM Network. 1996. № 12. P. 28 – 30.
154. Tabtabai H.M. Forecasting Project completion date using judgmental analysis / PMI Symposium. Pittsburgh, 1992. P. 436 – 440.
155. Tabtabai H.M. Modeling knowledge and experience to predict Project performance / PMI Symposium. Boston, 1996. P. 1 – 4.
156. Taylor F.W. The principles of scientific Management / Vroom V.H. Industrial social psychology / The Handbook of Social Psychology. Vol. 5. N.Y.: Addison-Wesley, 1969. P. 200 - 208.
157. Thambhain H.J. Best practices for controlling technology-based projects according to plan / PMI Symposium. New Orleans, 1995. P. 550 – 559.
158. Wilkens T.T. An effective model for applying earned value to any Project / PMI Symposium. Vancouver, 1994. P. 170 – 177.
159. Wilkens T.T. Are you being mislead by your progress Gantt's chart // PM Network. 1997. N 8. P. 42 – 45.
160. Wilkens T.T. Earned value: clear and simple / PMI Symposium. Chicago, 1997. P. 54 – 60.
161. Wilkens T.T. Earned value: sounds basic for revenue recognition // PM Network. 1991. N 11. P. 28 – 32.