

# ОПТИМАЛЬНОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

Е. Н. Десятирикова\*, В. Е. Белоусов\*\*

\*Воронежский государственный университет

\*\*Воронежский государственный архитектурно-строительный университет,

Поступила в редакцию 26.12.2011 г.

**Аннотация.** Рассматривается постановка задачи моделирования организационной структуры уникальных проектов. Искомая структура должна обеспечить реализацию проекта будучи оптимальной как по составу, количеству и свойствам (в общем случае) активных штатных единиц системы управления, так и по показателям эффективности системы управления в целом. Моделирование проводится на максимально абстрактном уровне в терминах теории информации.

**Ключевые слова:** активные системы управления, теория информации, иерархические структуры, агрегативно-декомпозиционный подход.

**Annotation.** We are considering information modeling of project's management structure. The structure under consideration should provide optimal project solution from management point of view and effectiveness of the system as a whole. Modeling is being carried out at maximum abstract level in terms of information theory.

**Keywords:** active control systems, information theory, hierarchical structure, aggregation-decomposition approach.

## ВВЕДЕНИЕ

Формальные процедуры оптимизации структуры управления проектом разработаны в данной статье в соответствии с агрегативно-декомпозиционным подходом из принципов открытого управления активными системами. Установлены специфические ограничения, определяющие допустимость выбранной структуры системы управления с учетом ресурсов системы управления и возможности преднамеренного искажения информации.

### 1. ФОРМАЛИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЕКТОМ

Система управления проектом должна обеспечивать выработку решения, корректирующего текущее состояние управляемой части сложной системы в желаемую область значений. Решение заключается в нахождении экстремума соответствующего аддитивного функционала от траектории процесса  $\Phi_t$  (некоторого критерия эффективности), описывающего поведение системы при заданных ограничениях, или, по крайней мере, его математического ожидания.

При этом возможны различные постановки задач управления. Одна из них состоит в мак-

симизации среднего долговременного дохода, другая формулируется в терминах максимизации переоцененного (дисконтированного) дохода с заданным коэффициентом переоценки. Практически подобные задачи решаются методом динамического программирования и его модификациями.

Формальное проектирование функциональной структуры системы управления проектом состоит в следующем [1]. В структуре организационной системы сложной системы (СС) можно выделить управляющую (СУ – система управления) и управляемую часть (ОУ – объект управления) (см. рис. 1). Состояние управляющей части определим вектором

$$I_Y(t) = (I_1(t), I_2(t), \dots, I_m(t))$$

а объекта управления – вектором

$$Y(t) = (Y_1(t), Y_2(t), \dots, Y_n(t))$$

Осуществляя некоторую операцию, управляемая система реализует соответствующий тип поведения, взаимодействуя со средой. Если совокупность состояний системы и среды определена как ситуация, то цели и задачи осуществляемых системой операций можно рассматривать как средства осуществления желаемых ситуаций и ликвидации нежелательных.

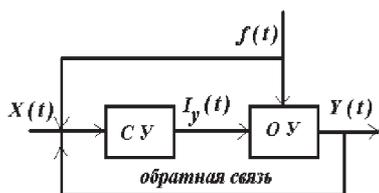


Рис. 1. Укрупненная схема управляемой системы.

В решении этих задач управляющая часть СС руководствуется глобальными внешними целями, содержащимися во входной информации  $X(t)$ . Содержательно поток  $X(t)$  состоит из информации о целях и задачах на уровне ближней и дальней среды, информации о текущем и прогнозном состоянии проблемы; критериях и оценках ее решения. На основании этой информации и алгоритмов ее преобразования система управления проектом формирует структуру дерева целей, состав целей и задач; производит ранжировку проблем по важности; вырабатывает решения.

При решении поставленных задач управляющая часть СС располагает некоторыми ресурсами, информация о которых представляется компонентами вектора  $I_y(t)$ . Это – люди, техника, финансы и т.п., распределяя их, можно влиять на состояние сложной системы, определяемое вектором фазовых координат  $Y(t)$ .

Стратегией управления является способ использования или распределения ресурсов. Если управление продолжается на интервале  $[t_0, t_1]$ , то имеем вектор-функцию

$$I_{Y[t_0, t_1]} = (I_{1[t_0, t_1]}, \dots, I_{m[t_0, t_1]}) \in H_1[I] \quad (1)$$

где  $H_1[I]$  – пространство, определенное ограничениями  $\Gamma_i^0$ . Среда также воздействует на состояние системы  $Y(t)$ . Это воздействие на интервале  $[t_0, t_1]$  представим в виде

$$f_{[t_0, t_1]} = (f_{1[t_0, t_1]}, \dots, f_{m[t_0, t_1]}) \in H_2[f] \quad (2)$$

где  $H_2[f]$  – ограниченное пространство возможных неконтролируемых внешних воздействий.

Состояние управляемой части сложной системы можно описать с помощью формального либо неформального оператора  $P$  и представить в виде

$$Y(t) = P(Y^0, t, I_{Y[t_0, t_1]}, f_{[t_0, t_1]}) \quad (3)$$

где  $Y^0 = Y(t_0)$  – начальное состояние системы.

Поскольку целью функционирования сложной системы является достижение некоторого

желаемого конечного состояния системы, то можно ввести критерий качества протекания операции

$$\Phi(Y_{[t_0, t_1]}, I_{Y[t_0, t_1]}, f_{[t_0, t_1]}) \quad (4)$$

и руководствоваться задачей оптимизации этого критерия:

$$Z = \underset{\substack{I \in H_1[I] \\ f \in H_2[f] \\ Y \in H_3[Y]}}{\text{extr}} [\Phi(Y_{[t_0, t_1]}, I_{Y[t_0, t_1]}, f_{[t_0, t_1]})] \quad (4)$$

Когда речь идет о процессах управления, реализуемых в СС, то критерий  $\Phi$ , оператор  $P$  и воздействия  $I_y(t)$ ,  $X(t)$ ,  $f(t)$  могут не иметь аналитического выражения.

Процесс управления сложной системой реализуется в виде циклического процесса. Цикл является замкнутым, т.е. процедура реализации процесса управления в управляющей части системы представляется структурой с обратной связью. Центральным звеном этого цикла управления является блок решения, который связан с формированием плана операции управления и его оптимизацией. Принцип управления с обратной связью обеспечивает эффективность функционирования механизмов действия элементов управляющей части сложной системы.

## 2. СТРУКТУРА АКТИВНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Вышесказанное позволяет рассматривать сложную систему как многосвязную систему с активными элементами, система управления которой прежде всего должна обеспечивать: высокое качество демпфирования больших возмущений, высокую живучесть и адаптивность.

Из теории управления известно, что необходимым условием при этом является наличие обратных связей в управляемых системах (реализующихся в виде информационных составляющих потока по основным показателям функционирования СС), позволяющих корректировать управляющие воздействия на основании текущих показателей состояния сложной многосвязной системы.

Различный характер взаимодействия подсистем сложной системы вполне может быть учтен при моделировании процессов управления ею посредством:

– типа подключения соответствующего звена в структурной схеме (согласное или встречное, параллельное или последовательное);

– знака обратной связи (положительная или отрицательная);

– формального закона осуществления управляющего воздействия на управляемые подсистемы СС со стороны подсистем управления и СУ в целом.

Например, при синтезе СУ сложной системой следует учитывать, что у отдельных элементов схемы могут быть «личные» цели, находящиеся в конфликте с глобальной целью системы. В этом случае подключения таких элементов в структурной схеме являются встречными, а соответствующие обратные связи положительными (см. рис. 2).

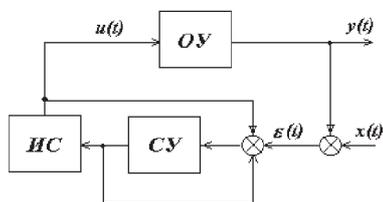


Рис. 2. Структурная схема управляемой системы с активными элементами

Исходя из предлагаемой на рис.2 структурной модели СУ, можно представить следующие возможности неблагоприятных (для достижения глобальной цели) реализаций преобразования информации элементами системы.

- Разрывы обратных связей у СУ и исполнительной подсистемы (ИС) интерпретируются как полное лишение СУ информации о состоянии управляемого объекта. В этом случае оптимальное управление системой невозможно в принципе.

- Передача в СУ дезинформации, имеющей противоположный характер по сравнению с истинной, эквивалентна изменению знака обратной связи в управляющей системе с отрицательного на положительный. Такая дезинформация вызывает лавинообразное ухудшение процесса управления.

- Наличие «личных» целей у СУ проявляется как «паразитирование» ее, когда СУ (или ЛПР) осуществляет избыточный отбор ресурса на свое жизнеобеспечение. Паразитирование исполнительной подсистемы проявляется как активное следование личной цели (не совпадающей, как минимум, с глобальной) и невозможность СУ воздействовать на исполнительную подсистему. И в том и в другом случае парази-

тирование интерпретируется как разрыв прямой связи СУ и исполнительной подсистемы.

### 3. ОБОБЩЕННАЯ СТРУКТУРА ПРОЦЕССА УПРАВЛЕНИЯ СЛОЖНЫМ ПРОЕКТОМ

Определение и реализация стратегий развития относятся к числу сложных, трудоемких и трудноформализуемых работ, актуальность которых не вызывает сомнений. Успех развития сложных систем определяется в большой степени тем, насколько данная открытая система приспособляется к макросреде, т.е. к внешнему окружению, с учетом текущего своего состояния и имеющихся внутренних возможностей.

Управление современными СС связано с такими особенностями, как слабое структурирование СУ и сложных объектов управления, а также с решением задач большой размерности. Формирование информации для задач большой размерности, не обладающих четкими структурными особенностями, является почти неразрешимой проблемой.

Можно выделить два основных подхода к решению задач большой размерности: прямые методы и методы, основанные на идеях декомпозиции. В первом случае для решения задач специального вида используются общие методы математического программирования (например, симплекс-метод для решения линейных задач).

Методы, принадлежащие ко второму классу, основаны на разложении исходной системы на подсистемы, для каждой из которых необходимо решать подзадачу меньшей размерности (по сравнению с исходной задачей). Так как подсистемы взаимосвязаны, то общее решение, как правило, нельзя получить в результате изолированного решения таких подзадач [2].

Обычно выделяют подсистемы первого и второго уровня таким образом, что подсистемы второго уровня определяют соответствующие изменения в подсистемах первого уровня. Учет связей, четкое выявление которых является обязательным при любом способе разбиения системы, может осуществляться в различных формах. Последние в основном определяются характером исходной задачи и методом выделения подсистем первого, второго и др. уровней.

Основная задача второго уровня состоит в координации функционирования элементов первого уровня с целью получения общего решения исходной задачи. Такой характер взаи-

модействования является типичным для крупных оргобразований. Можно идти дальше и выделить подсистемы третьего уровня, координирующие функционирование подсистем второго уровня и т.д. В результате будем иметь систему принятия решений, имеющую пирамидальную (иерархическую) структуру.

Таким образом, семантическое информационное дерево в иерархической структуре управления образует объемную структуру «атомами» которой являются тривиальные дуальные структуры. При этом каждое принятое в «низшей» (по отношению к рассматриваемому уровню управления) подсистеме СУ решение рассматривается текущей подсистемой СУ как ситуация с некоторым набором атрибутов-признаков с низших уровней.

Подобное стратифицированное («поуровневое») описание информационного семантического диалога в динамической системе большой размерности можно продолжить и далее (от ситуаций к обобщенным ситуациям-событиям и т.д.) постепенно выходя на макроуровень управления сложной системой. В соответствии с этим, принятие решения об управлении каждым подпроектом сложного проекта, находящегося в данном текущем состоянии, получается многослойным.

Стратифицированная информационная модель управления СУ предопределяет многослойность процесса принятия решения о текущем управлении любой сложной системой во всех подсистемах управления всех уровней СУ, участвующих в переработке информации от данной подсистемы (компонента СС) (см. рис.3).

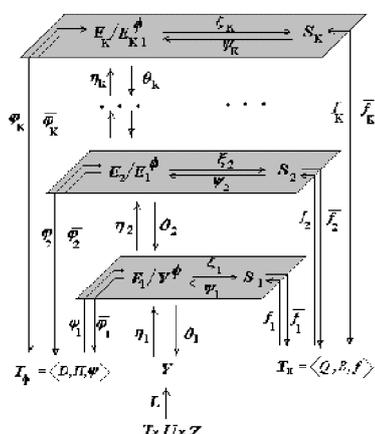


Рис. 3. Обобщенная математическая структура процесса управления в иерархической СУ

В соответствии с рис.3, принятие решения об управлении каждой активной подсистемой СС, находящейся в данном текущем состоянии, получается многослойным и представимо с помощью математической структуры многоуровневого функционально-семантического информирования [3], где:

- $E_i, S_i$  ( $i = 1 \div K$ ) – множества заданных и истинных текущих состояний активных подсистем управляемой СС на  $i$ -й страте описания (на  $i$ -м уровне управления);
- $E_i^\phi$  – фактор-множество  $E_i$ ;
- $T_{ii}$  – тезаурус, содержащий неформализованную информационную модель экономического объекта управления;
- $Q$  – множество знаний о СС, которым располагает орган управления системой;
- $B$  – множество вопросов, формулируемых при принятии решений;
- $f$  – отображение экспликации, ставящее каждому вопросу  $b \in B$  ответ из множества  $Q$ ;
- $T_\phi$  – тезаурус-классификатор;
- $\Pi$  – множество операций контроллинга, реализуемых для определения текущего состояния объекта;
- $\varphi$  – отображение сопоставления, ставящее в соответствие каждому результату контроллинговой операции  $\pi \in \Pi$  ответ в множестве  $Q$ ;
- $\theta_i, \xi_i, f_i, \psi_i, \eta_i, \varphi_i$  ( $i = 1 \div K$ ) – отображения факторизации, идентификации, мониторинга, оценивания, классифицирования и сопоставления на  $i$ -м слое принятия решения соответственно.

На первом слое (уровне описания системы) решение принимается по группам параметров из множества  $Y_1$ , на втором – по группам обобщенных параметров из множества  $E_1$ , на третьем – из множества  $E_2$  и т.д. Результаты переработки информации с выхода  $i$ -го слоя подаются на вход  $(i+1)$ -го.

Общим для всех слоев является реализация операций оценивания вида текущего состояния каждой подсистемы, так как данные с предыдущего слоя не могут быть верны в силу того, что на предыдущем слое уже принято к исполнению решение об изменении некоторой группы (за обеспечение которой отвечает данный слой). Причем одна подсистема управления системы управления проектом может управлять несколькими подсистемами сложного проекта.

Решение задачи рационального использования имеющихся в каждой конкретной ситу-

ации ресурсов СУ сводится к отысканию такой комбинаторной альтернативы (функции распределения работ по проекту по узлам схемы СУ):

$$W^* : a_{ji}^{(p)} \rightarrow \{1, 2, \dots, N\}, p = \overline{1, M}, \quad (6)$$

чтобы при заданных общих уровнях наличия ресурсов каждого вида обеспечить экстремум глобального (для системы управления в целом) сложного показателя [3]:

$$F(W^*) = \min_W \times \left\{ \sum_i \sum_j \sum_p [C(a_{ji}^{(p)}(W), w_{ijp}) + g_{ji}^{(p)} \cdot V(a_{ji}^{(p)}(W))] \right\}, \quad (7)$$

$$i = \overline{1, I}, j = \overline{1, N}, p = \overline{1, M},$$

Здесь:  $C(\cdot)$  – обобщенная стоимость организации выполнения работы  $a_{ji}^{(p)}$ ;  $g_{ji}^{(p)}$  – обобщенная стоимость передачи  $p$ -ой подсистеме функций управления с учетом квалификации  $k$  этой управляющей подсистемы;  $V(\cdot)$  – объем ресурса, необходимый для организации выполнения работы;  $a_{ji}^{(p)}$  – задача выполняемая в  $p$ -ом узле сети СУ при варианте  $W$  распределения работ;  $j$  – номер уровня в схеме иерархической СУ;  $p$  – номер подсистемы управления на данном уровне иерархической СУ;  $i$  – вариант группировки ведомых проектов при варианте  $W$  распределения работ по проекту в СУ;  $w_{ijp}$  – веса «личных» целей подсистем СУ в отношении глобальной цели проекта.

При этом должны выполняться специфические ограничения, определяющие допустимость выбранной структуры  $W$  распределения задач управления по подсистемам СУ СС :

$$\begin{aligned} a_{ji}^{(p)} &\in A^{(p)} \\ \lim_{r \rightarrow R} r_{ij} I_{ij} &= I_{ij} \\ k(a_{ij}^{(p)}) &\geq K^{(3)} \\ \sum_{i=1}^I w_{ijp} &= 1 \\ \sum_{i=1}^I v(a_{ji}^{(p)}) &\leq V_j^{(p)} \end{aligned} \quad (8)$$

Здесь  $r_{ij}$  – коэффициент, учитывающий возможность намеренного искажения информации  $I$  (функция штрафов) при информировании вышестоящих в иерархии СУ органов управления;  $k(a_{ij}^{(p)})$  – глубина переработки информации при решении задач управления;  $K^{(3)}$  – заданный уровень достоверности переработки информации;  $v(a_{ij}^{(p)})$  – расход ресурса определенного вида при выполнении процедуры нахождения управляющего решения  $a_{ij}^{(p)}$ ;

$V_j^{(p)}$  – ресурс  $p$ -го органа управления иерархической структуры СУ, выделяемый для управления  $i$ -ой подсистемой. Таким образом, сущность ограничений (8) в следующем.

- Первое из приведенных условий ограничивает круг задач управления, решаемых в СУ отдельными подсистемами управления.

- Следующие два условия задают требования к достоверности передачи и оптимальности переработки информации в многоуровневой СУ.

- Четвертое условие подразумевает стабильность структуры СУ, т.е. полноту выполнения всех задач управления средствами данной структуры СУ.

- И, наконец, последнее условие ограничивает количество задач управления, подлежащих выполнению в определенной подсистеме децентрализованной в заданной степени системе управления.

Решение задачи (6)–(7) определения оптимальной структуры СУ сложной системой состоит в следующем. Процесс управления  $P_{ij}$  на  $i$ -м слое  $j$ -ой подсистемой СУ можно декомпозировать на совокупность не связанных между собой элементарных процессов управления  $\{P_{ij}\}$  и процесс  $H_{ij}$ , осуществляющий взаимодействие между ними. При этом управление в иерархической СУ осуществляется через процессы  $H_{ij}$ . Формально процессы управления  $P_{ij} \subseteq P_j$  описываются в виде:

$$P_{ij} : Y_{i-1,j} \times C_{ij} \rightarrow Y_{ij} \quad (9)$$

$$H_{ij} : Y_{i-1,j} \times U_{ij} \rightarrow C_{ij} \quad (10)$$

$$i = 1 \div K, j = 1 \div N$$

Здесь  $P_{ij}$  – отображение процесса управления;  $H_{ij}$  – отображение процесса преобразования множества параметров  $Y_{i-1,j}$ ;  $Y_{ij}$  (в том числе и обобщенных) на выходе и входе алгоритма, описывающего подпроцесс управления  $P_{ij}$ ;  $U_{ij}$  – множество сигналов управления информированием, в том числе, задающих степень достоверности информирования (что необходимо в активных системах);  $C_{ij}$  – множество алгоритмов принятия решений в органе управления.

Декомпозиция позволяет представить общий процесс управления СС  $P$  в виде совокупности фаз  $P_j$  ( $j = 1 \div N$ ), выполняемых в нескольких органах управления СУ. Достоинством такой интерпретации является то, что имеется возможность управлять через элементы  $H_{ij}$  про-

цессами  $P_j$  ( $j = 1 \div N$ ), при последовательной реализации которых от фазы к фазе агрегируется общий процесс  $P$  управления СС. Тем самым предусматривается возможность осуществления многоуровневого распределенного управления отдельной подсистемой (компонентом СС) и произвольной их комбинацией.

Для задачи оптимального управления конкретной подсистемой сложной системы не обязательно обрабатывать в соответствующей подсистеме СУ все возможные параметры состояния системы одновременно. Некоторые из них могут не представлять интереса (не быть полезной информацией) для данной подсистемы СУ, а передаваться сразу на верхний уровень управления.

Обычно процессы, протекающие в системе отслеживаются по некоторой заданной группе управляемых параметров и описываются с помощью одного из атрибутов. Кроме того, стратифицированное (т.е. по стратам, или по уровням) моделирование СУ СС предполагает многоуровневую организацию совместной переработки групп параметров, т.е. процесс управления определенной подсистемой СС распределяется между разными уровнями иерархической системы управления. Очевидно, что на разных уровнях параметры могут перерабатываться с различными атрибутами.

Это означает, что для распределенного управления некоторой подсистемой СС несколькими органами управления многоуровневой СУ необходимо сформировать такое управляющее воздействие  $u \in U$ , которое позволит распределить подпроцессы (9) по подсистемам СУ, что равносильно проведению разреза граф-модели процесса информирования на части по числу задействованных подсистем СУ в решении задач управления. Разрез определяется как множество дуг, исключение которых из графа отделяет

некоторое множество вершин от остальной части вершин.

Проблема синтеза оптимальной структуры системы управления предполагает решение вопросов, связанных с распределением управленческих задач между отдельными подсистемами СУ. Такая задача в рамках изложенного подхода формулируется как процедура определения рационального «разреза» граф-модели СУ с последующим выбором управляющих воздействий для подпроцессов (10), формирующих сигналы  $C_{ij}$ .

В любом случае очевидно, что оптимизация структуры управления проектом с самых общих позиций должна проводиться в рамках информационного подхода. При этом информация является общесистемным ресурсом системы управления сложным проектом.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что решение задачи оптимизации структуры активной системы управления заключается в выборе ее конфигурации в форме последовательных подсистем с ветвящимися потоками ресурсов. Рациональное распределение круга задач управления при этом проводится с позиций информационного и агрегативно-декомпозиционного подходов, на основе обеспечения экстремума сложного стоимостного показателя и с учетом активного характера субъектов управления.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Новиков Д.А. Теория управления организационными системами. М.: Физматлит, 2007. – 584 с.
2. Райтер Р., Вальран Ж.С. Распределенное имитационное моделирование дискретно-событийных систем // ТИИЭР. – 1989, Т. 77, № 1. – С. 245–262.
3. Ловцов Д.А. Информационные показатели эффективности функционирования АСУ сложными динамическими объектами. // Автоматика и телемеханика. – 1994, № 12.

**Десятирикова Елена Николаевна** – д.э.н., проф., кафедры информационных систем, Воронежский государственный университет. Тел.(473)220-87-24, E-mail: science2000@ya.ru

**Desyatirikova Elena N.** – doctor of economy Sciences, Professor of the dept. of the Information Systems, Voronezh State University, Tel. (4732)208-724. E-mail: science2000@ya.ru

**Белоусов Вадим Евгеньевич** – к.т.н., заведующий кафедрой автоматизации технологических процессов, Воронежский государственный архитектурно-строительный университет. Тел. (473) 271-59-18, e-mail: Vigasu@rambler.ru

**Belousov Vadim Ev.** – Candidat of technical Sciences, head of Department of process automation, Voronezh State Architecture and Civil Engineering. Tel. (473) 271-59-18, e-mail: Vigasu@rambler.ru