

ПРОБЛЕМЫ КОМПЛЕКСИРОВАНИЯ И ДЕКОМПОЗИЦИИ МЕХАНИЗМОВ УПРАВЛЕНИЯ ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ¹

В.Н. Бурков, Н.А. Коргин, Д.А. Новиков

Обсуждены теоретические проблемы, возникающие при исследовании комплексов механизмов управления организационно-техническими системами. Предложены расширения классификации организационно-технических систем, возникающие при переходе от рассмотрения отдельных механизмов управления к комплексным. Подробно рассмотрены две ключевые проблемы — оценка эффективности и неманипулируемости комплексного механизма и возможность их декомпозиции для оценки на уровне отдельных элементарных механизмов.

Ключевые слова: теория управления, организационно-техническая система, системный анализ, неманипулируемость.

ВВЕДЕНИЕ

Теория игр всегда служила источником новых задач для исследования операций и дискретной математики [1, 2], будь то, например, вопрос о сложности вычисления равновесия Нэша [3, 4] или порождаемая иерархической игрой Γ_1 задача на связанный экстремум [5], и многие другие, в том числе, еще нерешенные, проблемы. Научные направления, систематически исследующие математические модели взаимодействия многих рациональных агентов в условиях асимметричной информации и нетривиального регламента их взаимодействия, — *теория механизмов* (mechanism design) и *теория активных систем* [6–11] — позволили разработать конструктивные методы анализа и синтеза механизмов управления (правил принятия решения выделенным игроком — центром) для широкого класса ситуаций. Этим математическим аппаратом исследователи пользуются в ряде важных прикладных дисциплин — теории аукционов и теории контрактов, а также теории общественного выбора, политологии и др.

Базовый принцип открытого управления (принцип выявления, revelation principle), позволяю-

щий превратить синтез механизма из задачи на связанный экстремум в задачу оптимизации с ограничениями типа неравенств, был разработан в 1970-е гг. практически одновременно в СССР (В.Н. Бурков и его научная школа [18] и за рубежом (R. Myerson [12, 13] и др.). За последние годы в рамках этого научного направления был разработан комплекс оптимальных базовых механизмов управления для всех этапов управленческого цикла организации [10]. Каждый из этих механизмов оптимален — максимизирует выигрыш центра — и при этом обладает свойством неманипулируемости — невыгодности искажения сообщаемой информации для остальных игроков, агентов.

В практике организационного управления механизмы почти всегда применяются совместно, и важный открытый вопрос теории состоит в возможности сохранения положительных качеств механизмов при их комбинировании/«комплексировании». Поэтому актуальна задача выявления общих условий, которым должны удовлетворять механизмы управления, устойчивые к комплексированию. Удовлетворяющие этим условиям частные механизмы можно использовать как «кирпичики» при построении комплексного механизма управления, что позволит вывести теорию на качественно новый уровень и кардинально упростить применение ее результатов на практике.

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 16-19-10609).

С другой стороны, современный менеджмент предлагает для решения проблем организации набор «лучших практик» — хорошо показавших себя в отдельных случаях управленческих находок. Отбор «лучших практик», для конкретной организации, их адаптация и внедрение происходят неформально на основе интуиции и опыта руководителя и/или консультанта. Теоретические наработки, в которых применяются строгие формальные методы математической теории принятия решений, существуют лишь для решения отдельных базовых задач организационного управления, будь то распределение делимого или неделимого ресурса, выработка коллективного решения, снижение сроков реализации проекта или составления плана производств. Однако в практике организационного управления механизмы нужно применять совместно, и открытым вопросом теории остается возможность сохранения положительных качеств оптимальных механизмов управления при их комплексировании. Например, сохраняется ли оптимальность и неманипулируемость механизмов оптимального распределения ресурса и стимулирования при их последовательном применении в рамках одного бизнес-процесса? Общие условия на механизмы управления, устойчивые к комплексированию, в форме дополнительных ограничений на задачу синтеза базового механизма должны позволить использовать получаемые оптимальные базовые механизмы как «кирпичики» при построении комплексного механизма управления, избавляя разработчика от риска потери хороших свойств механизма и от необходимости трудоемкого анализа комплексного механизма управления.

«Двойственной» к проблеме комплексирования является проблема *декомпозиции механизмов управления* — возможности представления некоторого механизма в виде совокупности нескольких взаимосвязанных более простых механизмов. Основания декомпозиции могут быть или иерархические уровни системы, или периоды времени и др. Вопросы о наследовании свойств в процессе декомпозиции возникают те же, что и в случае комплексирования. Далее основное внимание уделяется комплексированию.

Изложение материала настоящей работы, посвященной постановке задачи комплексирования механизмов управления организационно-техническими системами, имеет следующую структуру. Сначала приводится общее описание механизмов управления (§ 1) и задачи их комплексирования (§ 2). Затем проблема комплексирования анализируется с теоретико-игровой точки зрения (§ 3), после чего рассматриваются два типовых способа — параллельного и последовательного — комплексирования (§ 4 и 5 соответственно). Обсуждению проблем манипулируемости комплексных меха-

низмов посвящен § 6. В заключении представлены основные результаты и указаны перспективы дальнейших исследований.

1. ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ И КОМПЛЕКСНЫЕ МЕХАНИЗМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Общее определение *механизма* в Словаре русского языка С.И. Ожегова — «система, устройство, определяющее порядок какого-либо вида деятельности». Применительно к организационным системам *механизм функционирования* — это совокупность правил, законов и процедур, регламентирующих взаимодействие участников системы; *механизм управления* — совокупность процедур принятия управленческих решений [10].

Рассмотрим *базовую модель* организационной или организационно-технической системы (ОТС), состоящей из управляющего органа — *центра* (Ц) — и управляемого субъекта/объекта — *агента* (А) — рис. 1 [8, 10, 11, 14]. Имеются: на входе — *управляющее воздействие*, на выходе — *действие* управляемого субъекта (*состояние* управляемой системы). Обратная связь обеспечивает центр информацией о состоянии управляемой системы. В данном случае механизм управления совпадает с управлением (в общем случае механизм управления — отображение множества действий агента во множество действий центра — см. далее и работы [11, 15]).

Пусть состояние агента определяется его действием $u \in A$, принадлежащим множеству допустимых действий A . Допустим, управление $u \in U$, где U — множество допустимых управлений U . Пусть также задан *критерий эффективности функционирования системы* $\Phi(u, y): A \times U \rightarrow R^1$, который зависит от переменных, описывающих эту систему, т. е. от управления и от состояния системы.

Предположим, что известна реакция управляемого субъекта на то или иное управление. Простейший вид такой реакции — когда состояние субъекта является известной функцией от управления: $y = G(u)$, где $G(\cdot)$ — модель активного управляемого субъекта (или объекта управления в случае,



Рис. 1. Базовая модель организационной системы

когда объектом управления служит пассивная техническая система), которая описывает его реакцию на управляющее воздействие. Если подставить $G(\cdot)$ в критерий эффективности функционирования, то получим функционал $K(u) = \Phi(u, G(u))$, который будет зависеть только от управления. Этот функционал называется *эффективностью управления*.

Задача управления заключается в поиске оптимального управления, т. е. допустимого управления $u \in U$, обладающего максимальной эффективностью: $K(u) \rightarrow \max_{u \in U}$. Максимальная эффективность вычисляется как $K^* = \max_{u \in U} \Phi(u, G(u))$.

Отметим, что приведенная постановка простейшая — в общем случае механизм управления включает в себя этапы сообщения информации (здесь возникают задачи обеспечения *неманипулируемости* — выгоды для агентов сообщения достоверной информации), планирования (здесь возникают задачи обеспечения *согласованности* управлений — выгоды для агентов выполнения планов) и реализации [6, 8—10].

Элементарным (или *базовым*) *механизмом* назовем механизм, не включающий в себя другие механизмы (не допускающий дальнейшей декомпозиции в рамках принятой степени детализации). *Комплексный механизм* — механизм, включающий в себя один или несколько элементарных или других комплексных механизмов. Соответственно, *комплексирование* — процесс построения комплексного механизма, *декомпозиция* — выделение для некоторого комплексного механизма более простых его составляющих. В процессах комплексирования/декомпозиции одними из ключевых являются вопросы *полноты* набора элементарных механизмов — обеспечивает ли их совокупность возможность построения любого комплексного механизма из заданного множества, и их *минимальности* — каков минимальный полный набор элементарных механизмов.

Простейшая (*базовая*) *модель* ОТС включает в себя один управляемый субъект — *агент* — и один управляющий орган — *центр*, которые принимают решения однократно и в условиях полной информированности.

Перечислим *расширения базовой модели* [11].

1. *Динамические ОТС* (в которых участники принимают решения многократно — расширение по предмету управления «порядок функционирования»).

2. *Многоэлементные ОТС* (в которых имеется несколько агентов, принимающих решения одновременно и независимо, — расширение по предмету управления «состав»).

3. *Многоуровневые ОТС* (имеющие трех- и более уровневую иерархическую структуру — расширение по предмету управления «структура»).

4. *ОТС с распределенным контролем* (в которых имеется несколько центров, управляющих одними и теми же агентами — расширение по предмету управления «структура»).

5. *ОТС с неопределенностью* (в которых участники не полностью информированы о существенных параметрах — расширение по предмету управления «информированность»).

6. *ОТС с ограничениями совместной деятельности* (в которых существуют глобальные ограничения на совместный выбор агентами своих действий — расширение по предмету управления «множества допустимых стратегий»).

7. *ОТС с сообщением информации* (в которых одно из действий агентов заключается в сообщении информации друг другу и/или центру — расширение по предмету управления «множества допустимых стратегий»).

Таким образом, если в базовой модели используется некоторый элементарный механизм, то переход к тому или иному из первых четырех расширений базовой модели (каждое из которых может рассматриваться как совокупность взаимосвязанных базовых моделей) порождает *проблему комплексирования* элементарных механизмов — построения нового комплексного механизма, представляемого в виде совокупности взаимосвязанных элементарных механизмов.

Еще одним расширением модели представляется целесообразным считать рассмотрение комплексного механизма, декомпозируемого на набор базовых — *ОТС с комплексным механизмом*. Однако, в отличие от перечисленных выше расширений, данное расширение не может применяться к базовой модели ОТС, его применение целесообразно рассматривать с одним из первых четырех расширений базовой модели (каждое из которых может рассматриваться как совокупность взаимосвязанных базовых моделей. В смысле увеличения числа агентов и числа механизмов для систематизации результатов современной теории управления организационными системами целесообразно рассматривать классификацию, представленную в таблице.

В случае многоэлементных ОТС, в которых агенты принимают решения одновременно, имеет смысл условно говорить о *параллельном комплексировании*. В случае динамических ОТС, многоуровневых ОТС или ОТС с распределенным контролем — о *последовательном комплексировании*, где последовательность «соединения» элементарных механизмов определяется соответственно временем и порядком принятия решений участниками ОТС. Формальные модели параллельного



и последовательного комплексирования рассматриваются далее. В общем случае можно говорить о *сетевом комплексировании*, при котором каузальная последовательность «взаимодействия» механизмов описывается сетью, а такты времени соответствуют *фронту* в сети. Принимая во внимание постулат о том, что одновременное взаимодействие одного центра с одним агентом по нескольким механизмам невозможно, можно указать, что расширения 1.1, 2.2 и 3.2 допускают только последовательное комплексирование, в то время как исключительно параллельное комплексирование возможно в расширениях 2.1 и 3.1. При этом в расширениях 2.1., 2.3., 3.1 и 3.3 возможно сетевое комплексирование.

Кроме того, важным признаком классификации следует считать степень взаимосвязанности базовых механизмов, входящих в комплексный. По аналогии с классификацией отдельной базовой задачи управления — задачи стимулирования [9] введем понятие сильной и слабой связанности между базовыми механизмами управления и несвязанности.

Будем называть два механизма управления *слабосвязанными*, если решение, принимаемое в рам-

ках одного механизма управления, влияет лишь на ограничения, накладываемые на действия агентов в другом механизме, и наоборот. Например, решение, принимаемое в рамках механизма распределения ресурсов [10], влияет лишь на то, какой размер вознаграждения доступен центру для вознаграждения отдельного агента при решении задачи стимулирования [10].

Будем называть два механизма *сильносвязанными* в том случае, если решение, принимаемое в рамках одного из механизмов, влияет на параметры другого механизма. Например, решение, которое принимается в рамках механизма активной экспертизы [10] при оценивании важности отдельного проекта, влияет на вес данного проекта при распределении ресурсов между несколькими проектами на основе приоритетного механизма распределения ресурсов [10].

Соответственно, *несвязанными* будут считаться механизмы, принятие решений в рамках которых никак не взаимосвязанно.

В случае комплексных механизмов основная задача состоит в оценке их эффективности (в том числе в сравнении с эффективностями соответствующих элементарных механизмов) и выборе спо-

Расширения квалификации для комплексных механизмов

Состав ОТС	Комплекс механизмов
Один центр, один агент	1.1. <i>Динамические ОТС с одним агентом и комплексным механизмом.</i> Центр с одним агентом реализует сложное взаимодействие, что можно рассматривать как динамическую ОТС, в которой на разных этапах центр и агент взаимодействуют в рамках разных механизмов управления
Один центр, несколько агентов	2.1. <i>Многоэлементные ОТС с комплексным механизмом, декомпозируемым по агентам.</i> Центр взаимодействует в рамках каждого базового механизма или «подкомплекса» механизмов, из которых составлен комплекс, только с одним агентом (или непересекающимися подмножествами агентов), в ОТС образуется «цепочка» подсистем
	2.2. <i>Многоэлементные ОТС с комплексным механизмом, декомпозируемым по механизмам.</i> Центр реализует одинаковое сложное взаимодействие с каждым из агентов. Сохраняется «классическая» веерная структура ОТС
	2.3. <i>Многоэлементные ОТС с комплексным механизмом.</i> Сложная структура пересечений подмножеств агентов для каждого из базовых механизмов
	3.1. <i>Многоуровневые ОТС с комплексным механизмом.</i> При рассмотрении базовых механизмов, входящих в комплексный, наблюдается «делегирование» полномочий: в рамках отдельных базовых механизмов отдельные агенты становятся центрами промежуточного уровня и им выделяются свои подчиненные из подмножества агентов. При этом на разных уровнях иерархии возможны разные ситуации из других разделов данной классификации
Несколько центров, один агент	4.1. <i>ОТС с распределенным контролем и с комплексным механизмом, декомпозируемым по центрам.</i> В рамках каждого базового механизма с агентом взаимодействует один центр или непересекающееся подмножество центров
	4.2. <i>ОТС с распределенным контролем и с комплексным механизмом, декомпозируемым по механизмам</i> Все центры реализует одинаковое сложное взаимодействие с каждым из агентов. Сохраняется «классическая» веерная структура ОС
	4.3. <i>ОТС с распределенным контролем и с комплексным механизмом.</i> Сложная структура пересечений подмножеств центров для каждого из базовых механизмов

совов комплексирования, позволяющих синтезировать комплексный механизм максимальной эффективности. Также для комплексных механизмов требуются решения ряд общих проблем:

- допустимость (удовлетворение системе ограничений);
- непротиворечивость (достаточность информации, «согласованность» последовательных входов и выходов, ацикличность процедур принятия решений);
- полнота и минимальность (см. выше);
- операциональность (возможность решения для комплексного механизма задачи синтеза, желательного — аналитического);
- наследование (устойчивость) свойств механизмов (эффективность, неманипулируемость, согласованность и др.) по отношению к комплексированию/декомпозиции.

2. ОБЩЕЕ ОПИСАНИЕ ЗАДАЧИ КОМПЛЕКСИРОВАНИЯ МЕХАНИЗМОВ УПРАВЛЕНИЯ

Традиционно в теории управления социально-экономическими системами рассматривается система вложенных задач управления (решения более «частных» задач используются при решении более «общих»). На сегодня существуют два общих подхода к описанию модели ОТС, постановке и решению задач управления — «снизу вверх» и «сверху вниз» [11].

При первом подходе («снизу вверх») сначала решают частные задачи, а затем общие, используя полученные решения частных задач. Например, частной задачей может быть разработка системы мотивации. Если она решена для любого состава участников ОТС, то можно ставить задачу оптимизации состава — выбора такого состава, эффективность которого (при соответствующей оптимальной мотивации) максимальна. Достоинство такого подхода состоит в его конструктивности, недостаток — в высокой сложности, так как число вариантов решения задачи верхнего уровня может быть очень велико, а для каждого такого варианта необходимо решить соответствующий набор частных подзадач.

Бороться с этим недостатком можно с помощью второго подхода («сверху вниз»), в рамках которого сначала решают задачи верхнего уровня, а полученные решения используют в качестве ограничений для решения более частных задач. Однако общих рецептов в рамках второго подхода на сегодня не получено.

Приведем, следуя работе [16], постановку задачи синтеза оптимального комплекса механизмов управления ОТС. Пусть ОТС описывается набором (вектором) множества $L = \{1, 2, \dots, l\}$ переменных:

$y = (y_1, y_2, \dots, y_l) \in A' = \prod_{i \in L} A_i$, где $y_i \in A_i$, $i \in L$, и существуют глобальные ограничения A^* на комбинации переменных: $y \in A' \cap A^*$.

Под механизмом $u(\cdot) \in \Xi$ будем понимать отображение множества $M_u \subseteq L$ значений управляемых переменных во множество $K_u \subseteq L$ значений управляющих переменных, т. е. $u: A_{M_u} \rightarrow A_{K_u}$, где

$$A_{M_u} = \prod_{i \in M_u} A_i, \quad A_{K_u} = \prod_{i \in K_u} A_i.$$

Будем считать, что множество Ξ допустимых механизмов таково, что для любого механизма $u(\cdot) \in \Xi$ выполнены глобальные ограничения, т. е.

$$\Xi = \{u(\cdot) | \forall (y_{M_u}, y_{K_u}) : y_{K_u} = u(y_{M_u}) \rightarrow (y_{M_u}, y_{K_u}) \in \text{Proj}_{M_u \cup K_u}(A^*)\}, \quad (1)$$

где $y_{M_u} = (y_j)_{j \in M_u}$, $y_{K_u} = (y_j)_{j \in K_u}$, $\text{Proj}_{M_u \cup K_u}(A^*)$ — проекция множества A^* на множество $M_u \cup K_u$.

Введем $\Sigma \subseteq \Xi$ — подмножество множества допустимых механизмов, $\Sigma \in 2^\Xi$ — множеству всех подмножеств множества Ξ . Обозначим Q_Σ — множество всевозможных последовательностей элементов множества, q_Σ — произвольный элемент множества Q_Σ .

Множество Σ механизмов назовем *непротиворечивым*, если

$$\forall q_\Sigma \in Q_\Sigma: \exists (u, \dots, v) \in q_\Sigma: M_u \cap K_v \neq \emptyset. \quad (2)$$

Свойство непротиворечивости означает, что для данного набора механизмов не существует их последовательности, для которой нашлась бы переменная, которая была бы одновременно управляемой для первого механизма в этой последовательности и управляющей — для последнего. Отметим, что в случае последовательного (например, повторяющегося во времени) применения комплекса механизмов свойство (2) может нарушаться.

Непротиворечивость множества механизмов порождает в ОТС иерархию: множество параметров ОТС может быть упорядочено — на нижнем уровне находятся параметры из множества $L_1 = L \setminus \bigcup_{u \in \Sigma} K_u$, на следующем уровне — параметры, которые являются управляющими по отношению к параметрам нижнего уровня, но управляемыми для параметров, находящихся на более высоких уровнях иерархии, и т. д. (см. также теоретико-игровые модели синтеза иерархических структур в работе [15]).

Поставим в соответствие i -му параметру ОТС активного агента, обладающего целевой функцией $f_i: A \rightarrow \mathfrak{R}^1$, $i \in L_1$.



Предположим, что при заданном комплексе механизмов Σ агенты из множества L_1 будут стремиться выбирать равновесные по Нэшу стратегии (полностью по аналогии рассматриваются случаи использования других концепций решения игры агентов — гарантирующих стратегий, равновесий Байеса — Нэша и т. п.). Обозначим соответствующее множество равновесий Нэша как

$$E^N(\Sigma) = \{y_{L1} \in A_{L1} \mid \forall i \in L_1 \forall y_i \in A_i f_i(y_{L1}, u(y_{L1})) \geq f_i(y_{L1} | y_i, u(y_{L1} | y_i))\},$$

где $u(y_{L1})$ — действия, выбираемые агентами из множества $\bigcup_{u \in \Sigma} K_u$ (эти действия при заданном комплексе механизмов определяются действиями, выбираемыми агентами из множества L_1).

Пусть на множестве A' состояний системы задан функционал $\Phi(\cdot): A' \rightarrow \mathbb{R}^1$, характеризующий эффективность ее функционирования. Задача *синтеза оптимального комплекса механизмов* может формулироваться таким образом:

$$\min_{y_{L1} \in E^N(\Sigma)} \Phi(y_{L1}, u(y_{L1})) \rightarrow \max_{\Sigma \in 2^{\bar{\Sigma}}, (1), (2)}, \quad (3)$$

т. е. требуется найти непротиворечивый и удовлетворяющий глобальным ограничениям (условия (2) и (1) соответственно) комплекс механизмов, обладающий максимальной гарантированной эффективностью.

Отметим, что при формулировке задачи (3) мы не учитывали явным образом интересы агентов из множества $\bigcup_{u \in \Sigma} K_u$. Если предположить, что каждый из них может самостоятельно выбирать определенные механизмы управления, то получим задачу, аналогичную задаче *структурного синтеза*, описанной в работе [15].

Ситуация также осложняется тем фактом, что решение задачи синтеза отдельного механизма управления (и эффективность этого решения!), как правило, не устойчиво по параметрам модели [17, 18], что накладывает существенные ограничения на возможности применения методов первого и более всяких порядков при оптимизации «вложенных» механизмов.

На сегодня общие методы решения задачи (3) или задачи структурного синтеза неизвестны. Поэтому на практике при синтезе комплекса механизмов либо решают задачу последовательного синтеза, либо согласовывают в рамках той или иной метамодели отдельные оптимальные механизмы управления.

Применение подходов управления проектами и календарно-сетевое планирования, в частности, методов сетевого программирования [19], может оказаться продуктивным при исследовании комп-

лексных механизмов. Действительно, функционирование системы при заданном комплексном механизме можно представлять в виде сети без контуров, вершины которой соответствуют центрам преобразования информации или центрам производства, а дуги выражают информационные или технологические связи. Такое представление близко к описанию функционирования как бизнес-процесса с тем отличием, что в ряде вершин (активных вершин) решения принимает агент, имеющий свои интересы. Учитывая, что функционирование системы, как правило, разбивается на периоды, каждый период можно рассматривать как проект. Для оценки эффективности комплексного механизма необходимо получить оценку потенциала системы (максимальное значение целевой функции при полной информированности и выполнении всех планов). Сравнение оценки при заданной системе механизмов и принятых моделях поведения агентов с оценкой потенциала позволяет оценить эффективность комплексного механизма. Меняя отдельные блоки комплексного механизма, можно решать задачу оптимизации.

3. ИГРЫ И СТРУКТУРЫ

Как отмечалось в § 2 и в работах [11, 15], последовательность выбора действий участниками ОТС (порядок функционирования) тесно связана со структурой системы. Опишем кратко, следуя работе [11], эту взаимосвязь, переходя индуктивно от простых к более сложным моделям.

Базовой моделью принятия решений можно считать ситуацию принятия решений одним агентом в условиях полной информированности — см рис. 2, а. При этом считается выполненной так называемая *гипотеза рационального поведения* (ГРП) [8, 11], в соответствии с которой агент выбирает допустимое действие, максимизирующее его целевую функцию. Следующий этап «усложнения»

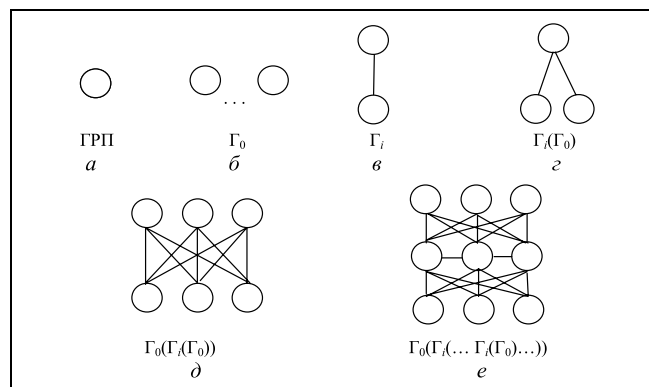


Рис. 2. Игры и структуры ($i = 1, 2, 3$) [20]: а, б, в, з, д и е — см. в тексте

состоит во взаимодействии нескольких агентов, действующих в соответствии с ГРП — *игра*, в которой агенты выбирают свои действия однократно, одновременно и независимо, т. е. игра Γ_0 в нормальной форме — см. рис. 2, б. На следующем этапе осуществляется переход к иерархическим играм Γ_i , где $i = 1, 2$ или 3 [11], в которых последовательность ходов фиксирована — первым делает ход центр, а затем — агент. Можно усложнять модель и дальше, переходя к все более сложным играм.

Например, если имеется структура «один центр — несколько агентов» (рис. 2, з), то взаимодействие агентов, находящихся на одном уровне, можно описывать игрой Γ_0 ; взаимодействие «центр — агент» описывается игрой Γ_i . Тогда такую структуру можно представить игрой Γ_i , определенной на игре Γ_0 , условно обозначив ее $\Gamma_i(\Gamma_0)$.

Далее, пусть имеется несколько (центров) и несколько агентов (рис. 2, д). На нижнем уровне агенты разыгрывают игру Γ_0 . «Над ними» центры разыгрывают иерархическую игру Γ_i , но центры, в свою очередь, разыгрывают на своем уровне игру Γ_0 . Итак, получили игру $\Gamma_0(\Gamma_i(\Gamma_0))$.

Если взять более сложную структуру (например, рис. 2, е), то ей будет соответствовать иерархическая игра между уровнями, и «обычная» игра в нормальной форме на каждом из уровней: $\Gamma_0(\Gamma_i(\dots\Gamma_i(\Gamma_0)\dots))$.

Основная идея «комплексирования игр» заключается в том, чтобы *декомпозировать* сложную организационную структуру (сложную игру) на набор более простых и воспользоваться результатами исследования последних. Это возможно, так как между играми и структурами существует глубокая связь — момент принятия субъектом решений определяет его «место» в организационной иерархии (см. подробности в работе [15]).

4. ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ КОМПЛЕКСИРОВАНИЕ

Рассмотрим проблему параллельного комплексирования на примере построения комплексного механизма из двух элементарных механизмов при переходе от двух структур (см. рис. 2, в) с одним и тем же центром к структуре, представленной на рис. 2, з.

Эффективности первого и второго элементарных механизмов обозначим соответственно

$$K_1^* = \max_{u_1 \in U_1} \Phi_1(u_1, G_1(u_1))$$

$$\text{и } K_2^* = \max_{u_2 \in U_2} \Phi_2(u_2, G_2(u_2)). \quad (4)$$

Обозначим $(y_1, y_2) = \hat{G}(u_1, u_2)$, тогда эффективность комплексного механизма определяется аналогично:

$$K^* = \max_{(u_1, u_2) \in U} \Phi(u_1, u_2, \hat{G}(u_1, u_2)). \quad (5)$$

Ключевым при комплексировании является вопрос о том, как соотносятся эффективности K^* и (K_1^*, K_2^*) ? Ответить на него невозможно, не получив ответы на следующие вопросы — как соотносятся:

— критерии эффективности $\Phi(\cdot)$ и $(\Phi_1(\cdot), \Phi_2(\cdot))$; возможные варианты — критерий $\Phi(\cdot)$ монотонен по критериям $\Phi_1(\cdot)$ и $\Phi_2(\cdot)$ или совпадает с последним в цепочке критерием;

— множества допустимых управлений U и (U_1, U_2) ; возможные варианты — управления независимы ($U = U_1 \times U_2$), или существуют ресурсные ограничения ($0 \leq u_1 \leq C_1, 0 \leq u_2 \leq C_2 \rightarrow 0 \leq u \leq C_1 + C_2$), или управление в комплексном механизме должно быть унифицированным, т. е. одинаковым для всех агентов ($u = (v, v)$), и т. д.;

— модели поведения агентов $\hat{G}(\cdot)$ и $(G_1(\cdot)$ и $G_2(\cdot))$; возможные варианты — агенты независимы ($\hat{G}(u_1, u_2) = (G_1(u_1), G_2(u_2))$) или зависимы.

Если критерий эффективности аддитивен, существуют ресурсные ограничения на управление, а агенты независимы, то, очевидно,

$$K^* \geq K_1^* + K_2^*. \quad (6)$$

Величина $\Delta = K^* - (K_1^* + K_2^*)$ может быть условно названа *ценой комплексирования*.

Пример 1. Рассмотрим приведенную в работе [11] модель стимулирования в ОТС со слабо связанными агентами. Пусть $N = \{1, 2, \dots, n\}$ — множество агентов, $y_i \geq 0$ — действие i -го агента, $c_i(y_i)$ — затраты i -го агента (монотонно возрастающая выпуклая функция), $i \in N$. Если $u_i(y_i)$ — система стимулирования, используемая центром, то целевая функция агента $f_i(u_i, y_i) = u_i(y_i) - c_i(y_i)$, а модель поведения агента имеет вид:

$$G_i(u_i, y_i) = \arg \max_{y_i \geq 0} f_i(u_i, y_i).$$

Пусть размеры индивидуальных вознаграждений агентов ограничены заданными значениями $\{C_i\}_{i \in N}$, т. е. $\forall y_i \geq 0 \ u_i(y_i) \leq C_i, i \in N$. Оптимальной является система стимулирования i -го агента [11]:

$$u_i(x_i, y_i) = \begin{cases} c_i(x_i), & y_i \geq x_i, \\ 0, & y_i < x_i, \end{cases}$$

где $x_i \in [0; c_i^{-1}(C_i)]$ — план i -го агента, при этом $G_i(u_i(x_i, y_i)) = x_i, i \in N$.



Предположим, что центр получает монотонно возрастающий линейный или вогнутый доход $H_i(y_i)$ от деятельности i -го агента, т. е. целевая функция центра $\Phi_i(u_i(x_p, y_i), y_i) = H_i(y_i) - u_i(x_p, y_i)$. Подставляя $G_i(u_i(x_p, y_i)) = x_p$, получим $\Phi_i(u_i(x_p, y_i), y_i) = H_i(x_i) - c_i(x_i)$. Следовательно,

$$K_i^*(C_i) = \max_{x_i \in [0; c_i^{-1}(C_i)]} [H_i(x_i) - c_i(x_i)], \quad i \in N. \quad (7)$$

Рассмотрим теперь комплексный механизм, в котором центр управляет n агентами, используя для каждого из них систему стимулирования (4). Предположим, что фонд заработной платы (ФЗП) ограничен значением R , т. е.

$$\sum_{i \in N} C_i \leq R,$$

и центр имеет целевую функцию, аддитивную по критериям одноэлементных задач: $\Phi(u, y) = \sum_{i \in N} [H_i(y_i) - u_i(x_p, y_i)]$, где $y = (y_1, y_2, \dots, y_n)$ — вектор действий агентов, $y \in A' = \prod_{i \in N} A_i$, $u = (u_1, u_2, \dots, u_n)$ — вектор управлений. Тогда

$$K^*(R) = \max_{\{x_i \in [0; c_i^{-1}(C_i)], \sum_{i \in N} C_i \leq R\}} \sum_{i \in N} H_i(x_i) - R. \quad (8)$$

Легко видеть, что эффективности (7) и (8) удовлетворяют условию (6), т. е. $\forall \{C_i \geq 0\}_{i \in N} \mid \sum_{i \in N} C_i \leq R$ выполнено

$K^* \geq \sum_{i \in N} K_i^*(C_i)$, следовательно, цена комплексирования неотрицательна.

Если ФЗП является переменной величиной, то его оптимальное значение R^* может быть найдено как решение следующей задачи: $R^* = \arg \max_{R \geq 0} K^*(R)$. Отметим, что поиск оптимального размера ФЗП может рассматриваться уже как задача последовательного комплексирования. ♦

Завершив рассмотрение примера, отметим, что при декомпозиции механизмов сформулированные выше вопросы звучат и решаются обычно несколько проще. Например, пусть имеется комплексный механизм с эффективностью (5). Тогда при параллельной декомпозиции можно определять эффективности первого и второго частных механизмов через критерий комплексного механизма:

$$K_1^*(u_2) = \max_{u_1 \in U_1} \Phi(u_1, u_2, \text{Proj}_1(\hat{G}(u_1, u_2)))$$

$$\text{и } K_2^*(u_1) = \max_{u_2 \in U_2} \Phi(u_1, u_2, \text{Proj}_2(\hat{G}(u_1, u_2))),$$

считая, например, что $U_1 = \text{Proj}_1(U)$, $U_2 = \text{Proj}_2(U)$, но помня, что покоординатная оптимизация может привести к недопустимому решению как по состоянию агентов, так и по управлению (так как может быть $\hat{G}(u_1, u_2) \neq (G_1(u_1), G_2(u_2))$) и/или $U \neq \text{Proj}_1(U) \times \text{Proj}_2(U)$).

Кроме того, эффективным инструментом параллельной декомпозиции могут быть результаты типа *теорем о декомпозиции игры агентов* в многоэлементных системах [11]. Действительно, если удастся построить оптимальный механизм управления, в котором у каждого агента имеется доминантная стратегия, то можно условно считать, что агенты принимают решения независимо и соответственно анализировать механизмы управления каждым из агентов. Можно выдвинуть гипотезу, что подобный подход может оказаться полезным и при исследовании проблем манипулируемости (см. далее).

5. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ КОМПЛЕКСИРОВАНИЕ

Рассмотрим проблему последовательного комплексирования на примере построения комплексного механизма из двух элементарных механизмов. При последовательном комплексировании эффективность первого механизма определяется, как и в выражении (4), т. е. $K_1^* = \max_{u_1 \in U_1} \Phi_1(u_1, G_1(u_1))$, а эффективность второго механизма, а также множество соответствующих допустимых управлений и модель поведения второго агента, в общем случае зависит от управления, использованного в первом механизме

$$K_2^*(u_1) = \max_{u_2 \in U_2(u_1)} \Phi_2(u_2, G_2(u_1, u_2)). \quad (9)$$

Эффективность комплексного механизма определим как

$$K^* = \max_{(u_1, u_2) \in U} \Phi(u_1, u_2, \hat{G}_1(u_1), \hat{G}_2(u_1, u_2)). \quad (10)$$

Соотношение эффективностей K^* и $(K_1^*, K_2^*(u_1))$, как и при параллельном комплексировании, в рассматриваемом случае зависит от того, как соотносятся соответствующие критерии эффективности, множества допустимых управлений и модели поведения агентов (см. выше). Что касается эффективности как при последовательной декомпозиции, так и при последовательном комплексировании, естественным представляется считать критерием терминальное значение эффективности, т. е. соответствующее последнему шагу («моменту времени») — см. выражения (9) и (10). В прикладных «экономических» задачах управления критерием эффективности элементарного механизма управления, соответствующего некоторому этапу последовательности, может быть та «добавленная стоимость» (в терминах терминального критерия), которая создается на данном этапе.

В случае аддитивных критериев эффективности (вариант, соответствующий переходу от статичес-

кой к динамической модели ОТС) получаем, что выражение (10) принимает вид:

$$K^* = \max_{u_1 \in U_1} \max_{u_2 \in U_2(u_1)} \{\Phi_1(u_1, G_1(u_1)) + \Phi_2(u_2, G_2(u_1, u_2))\}.$$

Получаем аналог принципа оптимальности Беллмана:

$$K^* = K_1^* + \max_{u_1 \in U_1} K_2^*(u_1).$$

Очевидно, что $\forall u_1 \in U_1 K^* \geq K_1^* + K_2^*(u_1)$.

6. ПРОБЛЕМА НЕМАНИПУЛИРУЕМОСТИ КОМПЛЕКСНЫХ МЕХАНИЗМОВ

В § 4 и 5 мы рассматривали соотношение эффективности элементарных и соответствующих комплексных механизмов. Аналогичные вопросы можно задать и касательно свойства неманипулируемости:

1) будет ли неманипулируемым комплексный механизм, построенный из совокупности неманипулируемых механизмов?

2) для отдельных задач управления показано, что их эффективное решение достаточно искать в классе неманипулируемых механизмов, если комплексная задача управления состоит из подобных «элементарных» задач, то достаточно ли ее решение искать в классе механизмов, «собранных» из неманипулируемых элементарных механизмов?

Ключ к ответу на вопросы, связанные с неманипулируемостью, кроется в том, насколько сильно может быть декомпозирована комплексная задача управления в следующих аспектах. Прежде всего, насколько сильна связь между базовыми механизмами, входящими в комплексный. Далее, насколько взаимосвязаны интересы агентов в рамках отдельных механизмов, как и как это формализуется в форме целевых функций агентов. Суть в том, что проблему манипулируемости для комплексного механизма можно рассматривать как проблему манипулируемости для задачи планирования в многомерном пространстве — для каждого из механизмов планирование осуществляется в своем подпространстве параметров. А для данного класса задач показано (см., например, [21, 22]), что неманипулируемые механизмы существуют, если интересы агентов формализуются многомерно-однопиковыми предпочтениями, в которых наилучшее значение по любому из планируемых параметров [23] не зависит от значений других планируемых параметров. При этом неманипулируемые механизмы не должны быть сильно связанными. Ответ на то, достаточно ли искать эффективное решение в классе неманипулируемых механизмов положителен лишь для ситуаций, когда

каждый из агентов заинтересован не более, чем в одном параметре планирования [22, 24].

Поэтому положительный ответ на первый вопрос, по всей видимости, может быть получен в случае слабой связанности элементарных механизмов, входящих в комплексный, или когда комплексный механизм декомпозируем по агентам (расширение 2.1), на второй вопрос — когда комплексный механизм декомпозируем по агентам.

Наконец, комплементарным вопросу неманипулируемости является вопрос эквивалентности механизмов [9], который для комплексных механизмов может быть сформулирован следующим образом. Пусть имеется двухуровневая ОТС с некоторым механизмом планирования. Вопрос заключается в том, существуют ли трехуровневая ОТС (с тем же составом агентов) и механизм планирования (комплексный) в ней такие, чтобы равновесные сообщения и назначаемые планы в этих ОТС были одинаковы. Эту задачу называют *задачей идеального агрегирования в механизмах планирования* — см. [25].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Отсутствие общих методов аналитического решения задачи синтеза оптимального комплекса механизмов управления организационными системами приводит к необходимости систематизации и выделения соответствующих частных случаев. Возможные основания для этого приведены в настоящей работе.

Глобальная задача заключается в выявлении максимально общих условий, которым должны удовлетворять механизмы управления, устойчивые к комплексированию. Такие условия можно сравнить с условиями декомпозиции задач оптимизации, позволяющими свести решение одной сложной задачи к решению набора более простых (подобные подходы развиваются достаточно давно в рамках теории оптимизации [26—30], теории согласования иерархических решений [6, 14, 31, 32], иерархическом моделировании [20, 32] и др., а в настоящее время особенно интенсивно в рамках распределенной оптимизации [34, 35] и др. — см. обзоры в работах [20, 36].

Действительно, проблема выявления ограничений, порождаемых комплексированием, сродни декомпозиции решения оптимизационной задачи (в целях распараллеливания), а также задаче об идеальном агрегировании, однако здесь объединяемые «куски» (механизмы) существенно разнородны, а связи между отдельными механизмами включают не только общий критерий оптимальности, но и «технологические» связи через общие переменные, фиксируемые одним механизмом, а



используемые другим, ограничения на общие ресурсы и др.

Перспективным представляется создание теории для анализа и синтеза комплексных механизмов организационного управления на базе разрабатываемых теоретико-игровых и оптимизационных моделей и методов. Наличие библиотеки базовых механизмов управления и правил их эффективного комплексирования позволит кардинально упростить построение комплексных механизмов организационного управления и существенно приблизить теорию механизмов управления к нуждам современного менеджмента. С практической точки зрения, соответствующие теоретические результаты могут стать основой прикладной методики комплексного реинжиниринга механизмов управления производственных и коммерческих компаний, органов местной и государственной власти и т. д.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Fudenberg D., Tirole J.* Game Theory. — Cambridge: MIT Press, 1995. — 579 с.
2. *Myerson R.* Game Theory: Analysis of Conflict. — London: Harvard Univ. Press, 1991. — 568 p.
3. *Algorithmic Game Theory* / Ed. N. Nisan, T. Roughgarden, E. Tardos, and V. Vazirani). — N.-Y.: Cambridge University Press, 2009. — 776 p.
4. *Mansour Y.* Computational Game Theory. — Tel Aviv: Tel Aviv University, 2003. — 150 p.
5. *Germeier Yu.* Non-antagonistic Games. — Dordrecht, Boston: D. Reidel Pub. Co., 1986. — 331 p.
6. *Бурков В.Н., Кондратьев В.В.* Механизмы функционирования организационных систем. — М.: Наука, 1981. — 384 с.
7. *Bolton P., Dewatripont M.* Contract Theory. — Cambridge: MIT Press, 2005. — 740 p.
8. *Бурков В.Н.* Основы математической теории активных систем. — М.: Наука, 1977. — 255 с.
9. *Burkov V., Goubko M., Korgin N., Novikov D.* Introduction to Theory of Control in Organizations. — N.-Y.: CRC Press, 2015. — 352 p.
10. *Mechanism Design and Management: Mathematical Methods for Smart Organizations* / Ed. prof. D. Novikov. — N.-Y.: Nova Science Publishers, 2013. — 163 p.
11. *Novikov D.* Theory of Control in Organizations. — N.-Y.: Nova Science Publishers, 2013. — 341 p.
12. *Myerson R.* Incentive Compatibility and the Bargaining Problem // *Econometrica*. 1979. — Vol. 47, N 1. — P. 61–74.
13. *Myerson R.* Optimal Coordination Mechanisms in Generalized Principal-Agent Problems // *Journal of Mathematical Economics*. — 1982. — Vol. 10, N 1. — P. 67–81.
14. *Ашимов А.А., Бурков В.Н., Джапаров Б.А., Кондратьев В.В.* Согласованное управление активными производственными системами. — М.: Наука, 1986. — 248 с.
15. *Новиков Д.А.* Сетевые структуры и организационные системы. — М.: ИПУ РАН, 2003. — 102 с.
16. *Новиков Д.А., Иващенко А.А.* Модели и методы организационного управления инновационным развитием фирмы. — М.: КомКнига, 2006. — 332 с.
17. *Novikov D.A.* Management of Active Systems: Stability or Efficiency // *Systems Science*. — 2001. — Vol. 26, N 2. — P. 85–93.
18. *Novikov D.A.* Stability of Solutions and Adequacy of the Determinate Incentive Models in Active Systems // *Automation and Remote Control*. — 1999. — Vol. 60, N 7. — P. 999–1004.
19. *Burkov V.N., Burkova I.V.* Network programming technique in project management problems // *Automation and Remote Control*. — 2012. — Vol. 73, N 7. — P. 1242–1255.
20. *Novikov D.* Hierarchical Models in Modern Control Theory / Challenges in Automation, Robotics and Measurement Techniques. — Heidelberg: Springer, 2016. — P. 3–12.
21. *Bondarik V.N., Korgin N.A.* Resource allocation mechanisms based on strategy-proof symmetrical anonymous voting procedures with delegation // *Automation and Remote Control*. — 2013. — Vol. 74, N 9. — P. 1557–1566.
22. *Korgin N.A.* Representing a sequential allotment rule in the form of a strategy-proof mechanism of multicriteria active expertise // *Automation and Remote Control*. — 2014. — Vol. 75, N 5. — P. 983–995.
23. *Barberá S.* Strategyproof Social Choice // *Handbook of social choice and welfare*. — 2011. — Vol. 2. — P. 731–831.
24. *Moulin H.* One dimensional mechanism design // *Web and Internet Economics: 11th International Conference, WINE 2015, Amsterdam, The Netherlands, December 9–12, 2015, Proceedings*. — Springer, 2015. — Vol. 9470. — P. 436.
25. *Новиков Д.А.* Механизмы функционирования многоуровневых организационных систем. — М.: Фонд «Проблемы управления», 1999. — 50 с.
26. *Павловский Ю.Н., Смирнова Т.Г.* Проблема декомпозиции в математическом моделировании. — М.: ФАЗИС, 1998. — 266 с.
27. *Первозванский А.А., Гайцгори В.Г.* Декомпозиция, агрегирование и приближенная оптимизация. — М.: Физматлит, 1979. — 344 с.
28. *Цурков В.И.* Декомпозиция в задачах большой размерности. — М.: Физматлит, 1981. — 352 с.
29. *Lasdon L.* Optimization Theory for Large Systems. — N.-Y.: MacMillan, 1970. — 523 p.
30. *Nesterov Yu.* Introductory Lectures on Convex Optimization: a Basic Course. — Heidelberg: Springer, 2014. — 236 p.
31. *Ватель И.А., Ерешко Ф.И.* Математика конфликта и сотрудничества. — М.: Знание, 1973. — 64 с.
32. *Горелик В.А., Горелов М.А., Кононенко А.Ф.* Анализ конфликтных ситуаций в системах управления. — М.: Радио и связь, 1991. — 288 с.
33. *Месарович М., Мако Д., Такахара И.* Теория иерархических многоуровневых систем. — М.: Мир, 1973. — 344 с.
34. *Boyd S., Parikh N., Chu E., et al.* Distributed Optimization and Statistical Learning via the Alternating Direction Method of Multipliers // *Foundations and Trends in Machine Learning*. — 2011. — N 3 (1). — P. 1–122.
35. *Ren W., Yongcan C.* Distributed Coordination of Multi-agent Networks. — London: Springer, 2011. — 307 p.
36. *Novikov D.* Cybernetics: from Past to Future. — Heidelberg: Springer, 2016. — 107 p.

Статья представлена к публикации руководителем РРС А.А. Ворониным.

Бурков Владимир Николаевич — д-р техн. наук, зав. лабораторией, Институт проблем управления РАН им. В.А. Трапезникова, г. Москва, ✉ vlab17@bk.ru,

Коргин Николай Андреевич — д-р техн. наук, вед. науч. сотрудник, Институт проблем управления РАН им. В.А. Трапезникова, г. Москва; профессор, Московский физико-технический институт (государственный университет), ✉ nkorgin@ipu.ru,

Новиков Дмитрий Александрович — чл.-корр. РАН, зам. директора, Институт проблем управления РАН им. В.А. Трапезникова, г. Москва; зав. кафедрой, Московский физико-технический институт (государственный университет), ✉ novikov@ipu.ru.