

© 2022 г. **Ф.И. ЕРЕШКО**, д-р техн. наук (fereshko@yandex.ru)
(Вычислительный центр им. А.А. Дородницына РАН Федерального
исследовательского центра “Информатика и управление” РАН, Москва),
А.Ю. МУШКОВ, д-р экон. наук (moushkoff@mail.ru)
(ФГУП “ВНИИ” Центр”, Москва),
Н.И. ТУРКО, д-р воен. наук (n.i.turko@rostec.ru)
(Госкорпорация “Ростех”, Академия военных наук, Москва),
А.Д. ЦВИРКУН, д-р техн. наук (tsvirkun@ipu.ru)
(Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва)

УПРАВЛЕНИЕ В КРУПНОМАСШТАБНЫХ ПРОЕКТАХ МНОГОУКЛАДНОЙ ЭКОНОМИКИ

Работа продолжает исследования авторов по управлению промышленно-инфраструктурными системами в соответствии с мировым трендом по цифровизации экономики. Приводятся описание исходных фундаментальных оснований проводимых разработок и обзор отечественного опыта по использованию в управлении систем математических моделей, информационно-коммуникационных технологий и больших объемов информации. Рассматриваются вопросы централизации и децентрализации управления в сложных системах. Приводятся теоретические конструкции принятия решений для анализа перспектив развития партнерства государства и бизнеса в рамках заданных правовых норм. Приведен блок концептуальных моделей, соответствующих уровню планирования крупномасштабных организационных систем, рассматриваются вопросы подготовки данных и разработки алгоритмического обеспечения, сочетания макро- и микроописания экономических систем.

Ключевые слова: системный анализ, принятие решений, теория игр, директивное управление, экономический механизм, федеральный закон, концептуальные модели, согласование интересов государства и бизнеса, информационное обеспечение.

DOI: 10.31857/S0005231022050087, **EDN:** АВТТРН

1. Введение

Исследование направлено на разработку теоретико-методических проблем инструментального обеспечения для принятия решений в социально-экономических системах, в которых сочетаются директивное управление и рыночные механизмы, централизация и децентрализация.

Основной постулат работы — системные исследования должны базироваться на математическом моделировании. Вдохновляющим примером для авторов служил опыт [1] по открытию и расчету эффекта “ядерной зимы”

на основе построения моделей движения воздушных масс над земной и водной поверхностью. Расчеты показали, что разрушение столиц северного полушария ядерными взрывами погрузит полушарие на 25–50 лет в минусовые температуры, жизнь на территории будет уничтожена. Данный вычислительно-аналитический результат остановил мировую гонку ядерных вооружений и препятствует ее началу, став общемировым императивом сдерживания.

В настоящее время основной тренд в экономическом развитии определяется оцифровкой технологий и систем управления. Эти условия предопределяют особый подход к стратегическому планированию крупномасштабных систем.

Крупномасштабные системы — класс сложных (больших) систем, характеризующихся комплексным (межотраслевым, межрегиональным) взаимодействием элементов, распределенных на значительной территории, требующих для развития существенных затрат ресурсов и времени [2].

Авторы придерживаются определений и понятий, предложенных, в частности, ими в оригинальных публикациях [1–5] и вошедших в общий лексикон задач проектирования и управления.

В целом крупномасштабные комплексы обладают следующими свойствами:

- динамичность: системы непрерывно развиваются, поступают сырьевые ресурсы, идет рост знаний, осуществляются технологические операции, трансформируются основные фонды, происходит амортизация, не прерываются транспортные потоки и т.д.;
- наличие неопределенных и неконтролируемых факторов: многие параметры систем крупномасштабных комплексов носят неопределенный или неконтролируемый характер, что требует учета рисков. Это связано, с одной стороны, с неопределенностью в развитии технологий, а с другой — с учетом особенностей поведения различных составных частей системы, имеющих иногда свои собственные, отличные от целей системы, подцели и задачи;
- многокритериальность: сложная хозяйственная система, кроме задачи выполнения заданных ограничений, имеет обычно еще целый набор формально и неформально заданных целей, четко и нечетко сформулированных критериев функционирования и развития;
- иерархичность: сложная система крупномасштабных комплексов структурно состоит из набора иерархически соподчиненных систем по территориальному и объектно-отраслевому признаку.

Объекты, принадлежащие каждому структурному уровню, могут рассматриваться и как системы, образованные из подсистем (объекты более низких уровней), и как подсистемы, входящие в состав некоторой системы (объект более высокого уровня).

Для иерархических систем характерны три важных свойства.

1. Каждый уровень иерархии имеет свой собственный язык, свою систему концепций или принципов.

2. На каждом уровне иерархии происходит обобщение свойств объектов более низких уровней. Закономерности, обнаруженные и описанные для последних, могут быть включены в объясняющую (функциональную) схему, обретая при этом связь с объектом высшего уровня. Таким образом, описание на уровне i способствует объяснению (пониманию) явлений, имеющих место на уровне $i + 1$.

3. Взаимосвязи между уровнями не симметричны. Для нормального функционирования объектов высшего уровня необходимо, чтобы успешно “работали” объекты более низкого уровня, но не наоборот.

В экономических системах верхние уровни располагают приоритетом в действиях, но не располагают полной информацией о нижних уровнях.

Иерархическая структура крупномасштабных комплексов свойственна самым разнообразным системам — коммерческим предприятиям, комплексам вычислительных программ, социальному устройству, электронному оборудованию и т.п.

Разработка различных процедур согласования интересов и взаимодействий в иерархических системах ведется начиная с 60-х гг. XX в. в рамках таких разделов теории управления социально-экономическими системами как: теория активных систем, информационная теория иерархических систем, теория игр с противоположными интересами, теория контрактов, теория коллективного выбора, теория команд и т.д.

В частности, в информационной теории иерархических систем, созданной трудами отечественной школы [6], основное внимание уделяется двум важнейшим атрибутам иерархии: приоритету в действиях центра, информированности центра и нижних звеньев иерархии.

Впечатляющий прогресс в развитии систем управления в технической сфере был порожден значительными успехами естественнонаучных дисциплин, выработавших методологию познания на основе идеи моделирования. Была создана технология построения моделей управляемых процессов, их анализа, выработки на этом основании стратегий управления и процедур адаптации полученного результата к практическим потребностям.

Подобные технологии разработаны и в системах управления экономическими процессами. И так же, как и в технических системах, развитие представлений и успех базировались на развитии моделей управляемых процессов и методов их исследования, начиная от простейших экономических таблиц физиократов (Ф. Кенэ, 1758 г.) и моделей “невидимой руки”, которая устанавливает равновесие спроса и предложения в стихийной экономике (А. Смит) до моделей межотраслевого баланса (В. Леонтьев), моделей государственного регулирования (Дж.М. Кейнс), технократических обоснований (Дж.К. Гелбрейт) и моделей рынка с совершенной конкуренцией (К. Эрроу),

основанных на теоремах о существовании неподвижных точек точечно-множественных отображений.

Большим продвижением в моделировании экономических процессов явилась теория линейных производственных процессов Канторовича–Купманса, которая совершенно и вполне инкорпорируется в процессы цифровизации, поскольку базируется на нормативной цифровой информации.

Согласно данному мнению, принятие решений в экономике будет базироваться на вычислительных платформах, отражающих отдельные функциональные отрасли, что близко к идеям А.И. Китова и В.М. Глушкова о создании общегосударственной автоматизированной системы управления экономикой (ОГАС) [7].

Основной тезис, который декларируется в настоящей статье, состоит в том, что исходным каркасом платформ являются модели взаимодействия активных элементов и к решению задач принятия согласованных решений необходимо привлечение теоретических конструкций механизмов управления.

Общая теория управления в настоящее время располагает мощными формальными средствами: модельным инструментарием, математическим аппаратом, вычислительными средствами, собственной методологией, составляющими которой выступают теория принятия решений, исследования операций, управления динамическими системами, теория игр, системный анализ. Данная методология будет востребована и составит основное содержание цифровых платформ.

Цифровая модель предприятия описывает развитие производства, динамику материальных (продукция, производственные фонды) и финансовых потоков (инвестиции, активы, обязательства, собственный капитал), содержит входящие и исходящие переменные, учитывает технологические связи, систему управления и экономические цели производства [8].

2. Опыт разработки крупномасштабных систем

Как и в предыдущих публикациях авторов, основной интерес статьи проявлен к крупномасштабным проектам [2, 9]. Типичные примеры крупномасштабных систем: топливно-энергетический комплекс и отдельные его отрасли, транспортные, аграрно-промышленные, оборонно-промышленные, территориально-промышленные, региональные и отраслевые системы, холдинги, концерны, финансово-промышленные группы, транснациональные корпорации, распределенные системы передачи и обработки информации и другие комплексы.

Излагаемые модели и методы планирования развития структуры крупномасштабных систем родились благодаря исследованиям, проведенным в Институте проблем управления РАН в области синтеза структур топливно-энергетических, отраслевых и региональных производственно-транспортных систем [3].

Основные особенности крупномасштабных систем.

Значительные затраты ресурсов и времени на развитие систем, заблаговременность инвестиционных мероприятий может составлять несколько лет.

Размытость границ (в процессе развития состав элементов системы и характер их взаимосвязи между собой и с внешней средой существенно изменяются; территория, охватываемая системой, может расширяться от региональных до глобальных масштабов).

Тесная взаимосвязь с другими крупномасштабными системами и с окружающей средой.

Комплексный характер управления (в частности, требуется согласование отраслевых, корпоративных и региональных интересов).

Грубость и устойчивость, небольшие отклонения в параметрах развития отдельных элементов и их взаимосвязей мало влияют на развитие систем в целом.

Имеется опыт разработок [4] программных комплексов для финансового анализа и разработки бизнес-планов инвестиционных проектов. Эти системы используются промышленными предприятиями, банками, проектными учреждениями и консалтинговыми центрами.

Усложнение структуры народнохозяйственных систем, обусловленное ростом размеров и сложности производственных процессов и процессов управления ими, выдвигает ряд проблем, связанных с научным обоснованием построения таких структур.

Под структурой крупномасштабной системы в статье понимается состав ее элементов с соответствующими взаимосвязями в динамике их развития и функционирования.

Непрерывность развития, выражающаяся в постоянном изменении структуры системы, является важнейшей особенностью крупномасштабных систем. Процесс развития крупномасштабных систем носит необратимый характер, т.е., как правило, интегральные характеристики, определяющие “продукт” на “выходе” системы, в процессе развития в целом не убывают, хотя характер изменения отдельных элементов системы может быть различен. При этом в процессе развития расширяется состав элементов крупномасштабной системы и усложняются их взаимосвязи.

При управлении развитием крупномасштабной системы необходимо получать взаимосвязанное решение двух групп вопросов. К первой относятся вопросы развития структуры управляемой производственно-транспортной системы, т.е. определение оптимального состава элементов и их взаимосвязей, распределение плановых заданий по элементам и т.п. Ко второй — вопросы развития структуры системы управления, включающие выбор иерархии управления, распределение выполняемых функций управления между уровнями и узлами системы.

Во многих отраслях народного хозяйства разрабатываются долгосрочные программы развития структур крупномасштабных систем. Примерами таких систем могут служить: топливно-энергетический комплекс в целом и отдель-

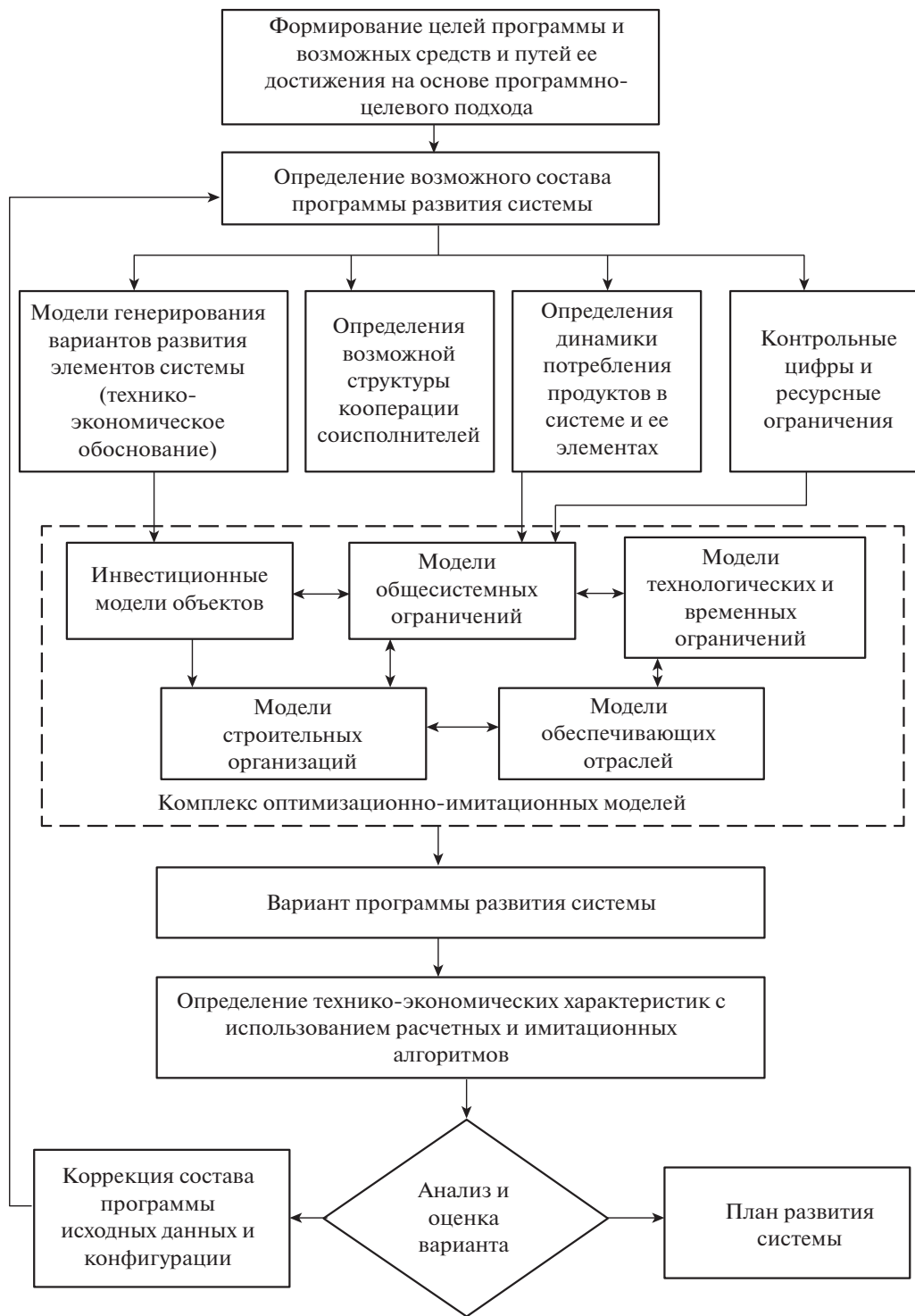


Рис. 1. Схема формирования и использования комплекса инвестиционных моделей.

ные его отрасли; комплекс атомных электростанций, газоснабжающая сеть страны и др.

Основное содержание предлагаемого подхода в [10] составляют методы планирования развития крупномасштабных систем, основанные на взаимодействии в процессе формирования плана развития крупномасштабных систем комплекса моделей, описывающего систему на различных уровнях детализации, в том числе на уровне агрегированных показателей и на уровне отдельных производственно-транспортных элементов.

Схема формирования и использования комплекса инвестиционных моделей приведена на рис. 1. Расчеты по оптимизации программ развития крупномасштабных систем начинаются с формирования цели программы и возможных путей и средств ее достижения. В результате этого определяется возможный состав программы (перечень объектов различного типа, логические и технологические связи между ними, варианты их строительства и т.п.).

На следующем этапе варианты развития отдельных элементов и комплексов подвергаются технологической проработке и технико-экономическому обоснованию. После подготовки необходимой информации и формирования моделей оптимизации проводятся соответствующие расчеты программ развития.

Следующий этап состоит в определении технико-экономических характеристик полученного варианта программ, используемых при анализе и принятии соответствующих решений.

Анализ специфики планирования, опыт общения с лицами, участвующими в выработке плановых решений на различных уровнях, показал большое разнообразие постановок задач оптимизации: от формирования одного глобального народнохозяйственного критерия до задач с векторными и локальными критериями оптимизации.

Поэтому представляется целесообразным такой подход к решению подобных задач, когда главное внимание уделяется разработке моделей, более близко моделирующих объект в интересующей пользователя области, созданию, по возможности, полного перечня (библиотеки) критериев, ограничений, функциональных связей, условий и других элементов описания рассматриваемого класса задач.

Это позволяет специалисту, подготавливающему решение, выбирать из перечня нужный в сложившейся ситуации набор критериев и ограничений. Таким образом, вопросы формирования структуры модели, комплектование модели критериями оптимизации, их содержательная трактовка, корректировка модели и исходных данных приближаются к специалисту, подготавливающему и принимающему плановые решения.

Использование результатов модельных экспериментов при подготовке управляющих решений не исключает возможности, а в ряде случаев и необходимости применения других, неформализованных средств оценки соответствующих аспектов решений. В одних случаях моделирование играет ве-

дущую роль, в других — вспомогательную как инструмент количественной оценки некоторых показателей исследуемой системы.

Как описано в публикациях авторов [2, 9], при разработке крупномасштабных систем возникает проблема взаимосвязанного описания, анализа и синтеза различных аспектов деятельности систем: процессов выбора целей и принятия решений, обработки информации, технологических процессов.

Обычно для крупномасштабных систем оказывается невозможным описание их структурных свойств и особенностей на одном уровне детализации, поэтому такие системы должны представляться в виде взаимосвязанной совокупности элементов различных уровней детализации и этапов развития: уровня целей функционирования подсистем и системы в целом; функций и задач элементов системы; звеньев организационной иерархии; производственных и транспортных объектов; технических средств и т.д. Причем на указанных этапах и уровнях описания структур крупномасштабных систем могут использоваться различные средства и языки — вербальные описания, теория множеств, аналитические и графоаналитические, алгоритмические процедуры, альтернативно-графовая формализация и т.п.

При синтезе структуры сложных систем эффективным является принцип последовательного синтеза моделей допустимых вариантов построения отдельных элементов, частей и системы в целом с последующим выбором с помощью синтезируемой модели структуры системы наилучшего варианта ее реализации и развития. Такой подход позволяет выделить типовые задачи синтеза структуры сложных систем, детализация которых определяется этапом и целями разработки.

Функциональная часть крупномасштабных систем формулируется в виде альтернативных графов на уровнях целей функционирования и выполняемых функций и функциональных задач. Организационная часть системы формулируется аналогичным образом на уровнях узлов управления (организационной иерархии), регионов, предприятий, отдельных объектов управления, производственных и технологических процессов, агрегатов, а также сетей ЦВМ и вычислительных центров.

На основе моделей крупномасштабной системы возможна разработка сценариев концентрации усилий и ресурсов в рамках программ развития и структурной перестройки систем. В [11] отмечается, что “в одной из таких программ возможна интеграция добывающих компаний и предприятий военно-промышленного комплекса в финансово-промышленные группы с целью завоевания (при поддержке государства) прочного места на мировых рынках, а также рационального использования полученных доходов для восстановления научно-технического потенциала страны, технологического обновления добывающих отраслей и особенно распространения высоких технологий из военно-промышленного комплекса во все отрасли народного хозяйства. Необходимо учесть возможные риски, потому что в конце 80-х гг. интересы ВПК и ТЭК были противоположными, а реформы проходят под знаком противоборства ОПК и ТЭК”.

3. Стратегическое планирование в децентрализованных системах

Проблема сочетания централизации и децентрализации, в частности при анализе государственно-частного партнерства, относится к главенствующим вопросам в теории принятия решений и привлекала внимание многих исследователей [12].

К фундаментальным исследованиям крупномасштабных систем, взаимодействия в которых имеют иерархический характер, следует отнести работы Ю.Б. Гермейера и его учеников, обзор которых содержится в монографии [13] и в работах [14–17].

Опыт показывает, что на практике управление достаточно сложными организационными системами осуществляется по иерархическому децентрализованному принципу. Объяснение эффективности принципа предложено Ю.Б. Гермейером и Н.Н. Моисеевым [6]: если лицо, принимающее решения, передаст часть своих полномочий по выбору решений каким-то агентам, то совместными усилиями можно будет своевременно обработать большие объемы информации и за счет этого сделать управление более эффективным. Построить формальные математические модели, позволяющие описать этот эффект, удалось в [18], где рассматривается задача управления организационной системой в условиях внешней неопределенности.

В [19, 20] исследуется вопрос о целесообразности децентрализации управления в зависимости от доступного объема информации о неопределенных факторах, проведен сравнительный анализ при централизованном и децентрализованном способах управления и установлено базовое теоретическое утверждение. Доказана *Теорема: если интересы Центра и управляемых систем плохо согласованы, то Центру всегда выгодно централизованное управление, если интересы хорошо согласованы, то при ограниченных мощностях обработки информации Центру выгоднее децентрализация, в ином случае — централизация.*

Из рассмотрения содержательных экономических процессов проистекает вывод: рыночная экономика — это децентрализованная система управления взаимодействием экономических агентов в обществе, и она не может решить все проблемы социально-экономического развития общества. Необходимо рациональное государственное регулирование.

В аналитической среде Запада намечается сдвиг в понимании роли централизованного управления. Как отмечается в [21]: “ситуация должна измениться, потому что трудно представить, как можно справиться с экзогенным шоком такой силы, как тот, который вызван COVID-19, с помощью чисто рыночных решений... Уже и почти в мгновение ока коронавирусу удалось изменить представления о сложном и хрупком балансе между частной и общественной сферами в пользу последней... Все, что происходит в постпандемическую эпоху, заставит нас переосмыслить роль правительств... Они должны гарантировать, что партнерство с бизнесом и участием государственных средств руководствуется общественными интересами, а не прибылью”.

Централизация и децентрализация проявляются в различных формах государственно-частного партнерства. В [22] предлагаются различные организации хозяйственного партнерства государства и бизнеса с использованием средств и методов теории принятия решений, теории управления и исследования операций.

В [23] предлагается в этих постановках наряду с предприятиями разной формы собственности рассматривать и участие координатора (используем далее для описания его деятельности термин Центр). Предметом его регулирования выступают общественные отношения, возникающие между органами государственной власти и субъектами промышленного сектора экономики при использовании различных инструментов государственного воздействия на деятельность компаний. В качестве инструментов государственного воздействия на субъекты промышленной деятельности могут быть как меры экономического стимулирования, так и меры государственного регулирования (императивные предписания и запреты).

Рассмотрим вопрос о деятельности совокупности предприятий [24], входящих в сферу комплекса крупномасштабных систем, и совокупное описание моделей предприятий (цифровых двойников), входящих в цифровую платформу комплекса при веерном технологическом графе. Прежде всего отметим, что модель отражает иерархическую структуру управления.

Ограничимся вопросами организационно-технологического характера: приведем описание модели для оценки возможности выполнения плана группой предприятий по выпуску конечных продуктов при заданных финансовых средствах. Модели такого типа (“грубые” модели) позволяют оценить качественные стороны принятия решений. Прежде всего они находят эффективное применение при разработке сценариев вычислительных экспериментов для имитационных систем на базе цифровых платформ при большой размерности модельных комплексов.

В [23] отмечается, что в рамках указанных положений и конструкций исследованы модели контрактов между активными экономическими системами. Нобелевская премия 2016 г. по экономике присуждена Оливеру Харту (Гарвардский университет, США) и Бенгту Хольстрему (Массачусетский технологический институт, США) за их вклад в теорию контрактов, которая базируется на моделях взаимодействия иерархического характера: принципал — агенты. Прикладной смысл таких исследований — с одной стороны, создание математического аппарата для анализа упрощенных моделей, позволяющих делать качественные выводы и, с другой стороны, формирование на модельном уровне представлений о предмете исследований у лиц, принимающих решения на всех организационных уровнях. Проведенный авторами анализ оптимальных контрактов закладывает интеллектуальный фундамент для разработки стратегий и институтов во многих областях, от законодательства о банкротстве до политических конституций.

3.1. Децентрализованная система при программах Центра

Рассмотрим здесь один из вариантов описания на основе отечественной теории иерархических игр [19, 20]. Предполагаем, что организационно система состоит из трех уровней: Центр — интегрированные структуры (холдинги) — предприятия. Оперирующую сторону в данной модели будем отождествлять с Центром.

Пусть имеется некоторое число предприятий, разбитых на K интегрированных структур. Предприятия будем нумеровать двойными индексами kn , где k ($k = 1, \dots, K$) — номер интегрированной структуры, n — номер предприятия ($n = 0, 1, \dots, N$). Здесь, чтобы не использовать лишних индексов, считаем, что число предприятий в каждой интегрированной структуре одинаково. Если это не так, то можно считать, что $N + 1$ — максимальное число предприятий в интегрированной структуре, а в те структуры, в которых предприятий меньше, добавлены фиктивные предприятия с очень большими затратами на производство (см. далее).

Каждую интегрированную структуру будем отождествлять с ее головным предприятием, за которым зарезервируем индекс $n = 0$.

1. Технологические процессы. Будем рассматривать функционирование системы на отрезке времени $t = 1, 2, \dots, T$.

Пусть система способна выпускать I видов продукции. Обозначим $U = \mathbb{R}_+^I$.

Центр выбирает *объемы и сроки* заказа выпусков, т.е. для каждой интегрированной структуры k задает набор $(u_1^k, \dots, u_T^k)$ векторов $u_t^k \in U$, $t = 1, 2, \dots, T$.

Кроме того, Центр устанавливает *цены продукции*, т.е. для каждого момента времени t выбирает вектор $p_t \in U$.

Таким образом, например, структура k в момент времени t получит от Центра за выполнение заказа сумму, равную $p_t u_t^k$.

2. Производственные мощности. Состояние производственных мощностей предприятия kn в момент времени t описывается вектором x_t^{kn} с неотрицательными компонентами. Множество всех таких векторов обозначим через X .

Опять же для простоты формул считаем, что размерности этих векторов для всех t и всех kn одинаковы, но в них могут быть нулевые компоненты.

В момент времени t предприятие kn выбирает вектор z_t^{kn} вновь создаваемых мощностей. Таким образом, динамика производственных мощностей задается формулой

$$x_{t+1}^{kn} = x_t^{kn} + z_t^{kn}, \quad t = 1, \dots, T, \quad k = 1, \dots, K, \quad n = 0, 1, \dots, N.$$

Начальное значение x_0^{kn} считается *параметром задачи*.

За создание новых мощностей предприятие платит сумму $P_t z_t^{kn}$. Здесь вектор P_t с неотрицательными компонентами — параметр модели.

3. Выпуск продукции, затраты. В момент времени t предприятие kn выбирает объем выпуска продукции $v_t^{kn} \in U$.

Разумеется, производство продукции связано с *затратами*. Будем считать, что эта связь описывается функцией

$$\Phi = (\varphi, \phi) : X \times U \rightarrow U \times W.$$

Здесь $\varphi(x_t^{kn}, v_t^{kn}) \in U$ – затраты продукции, производимой внутри ОПК, на производство продукции в количестве v_t^{kn} при наличии мощностей x_t^{kn} , $\phi(x_t^{kn}, v_t^{kn}) \in W$ – затраты на приобретение продукции, закупаемой извне ОПК.

Здесь вновь для упрощения формул считаем, что каждое предприятие может выпускать полную номенклатуру продукции, но затраты на выпуск “непрофильных” товаров (т.е. не соответствующих имеющимся мощностям) принимаются значительными для их исключения при расчете.

Предположим, что предприятия, входящие в одну интегрированную структуру, могут обмениваться произведенной продукцией.

4. Обмены. Объем $\omega_t^{knm} \in U$ продукции, поставляемой предприятием n предприятию m в момент времени t , определяется головным предприятием интегрированной структуры.

Управления головного предприятия интегрированной структуры k должны удовлетворять ограничениям

$$v_t^{k0} + \sum_{n=1}^N \omega_t^{kn0} - \sum_{n=1}^N \omega_t^{k0n} - \sum_{n=1}^N \varphi(x_t^{kn}, v_t^{kn}) \geq u_t^k, \quad t = 1, 2, \dots, T.$$

Обозначим через $U_t^{k0}(x_t^{k0}, u_t^k)$ множество наборов (управлений)

$$\left(z_t^{k0}, v_t^{k0}, \omega_t^{k00}, \dots, \omega_t^{k0N}, \omega_t^{k10}, \dots, \omega_t^{kNN} \right) \in X \times U^{N^2+1},$$

удовлетворяющих ограничению

$$v_t^{k0} + \sum_{n=1}^N \omega_t^{kn0} - \sum_{n=1}^N \omega_t^{k0n} \geq u_t^k + \sum_{n=1}^N \varphi(x_t^{kn}, v_t^{kn}),$$

(здесь для простоты записи принято $\omega_t^{knn} = 0$, $n = 0, 1, \dots, N$).

Управления предприятия n ($n \neq 0$), входящего в интегрированную структуру k , должны удовлетворять ограничениям

$$v_t^{kn} - \varphi(x_t^{kn}, v_t^{kn}) \geq \sum_{m=1}^N \omega_t^{knm} - \sum_{m=1}^N \omega_t^{kmm}, \quad t = 1, 2, \dots, T.$$

Обозначим через $U_t^{kn}(x_t^{kn}, \omega_t^{kn0}, \dots, \omega_t^{knN}, \omega_t^{k0n}, \dots, \omega_t^{kNn})$ множество пар $(z_t^{kn}, v_t^{kn}) \in X \times U$, удовлетворяющих условию

$$v_t^{kn} - \varphi(x_t^{kn}, v_t^{kn}) \geq \sum_{m=1}^N \omega_t^{knm} - \sum_{m=1}^N \omega_t^{kmm}.$$

5. Интересы. Будем считать, что целью предприятий является максимизация прибыли.

Обозначим для краткости

$$\bar{z}^{kn} = (z_1^{kn}, \dots, z_T^{kn}), \quad \bar{v}^{kn} = (v_1^{kn}, \dots, v_T^{kn}), \quad \bar{p} = (p_1, \dots, p_T).$$

Для n ($n \neq 0$) прибыль предприятия kn задается формулой

$$\begin{aligned} g^{kn}(\bar{p}, \bar{z}^{kn}, \bar{v}^{kn}) &= \sum_{t=1}^T p_t v_t^{kn} - \sum_{t=1}^T P_t z_t^{kn} - \\ &- \sum_{t=1}^T p_t \varphi(x_t^{kn}, v_t^{kn}) - \sum_{t=1}^T \pi_t \phi(x_t^{kn}, v_t^{kn}). \end{aligned}$$

Здесь π_t – вектор цен на товары, закупаемые вне ОПК. Это – параметр модели.

Считаем, что головное предприятие интегрированной системы является *акционером* остальных предприятий этой системы. Поэтому его прибыль выражается формулой

$$\begin{aligned} g^{k0}(\bar{p}, \bar{z}^{k0}, \bar{z}^{k1}, \dots, \bar{z}^{kN}, \bar{v}^{k0}, \bar{v}^{k1}, \dots, \bar{v}^{kN}) &= \\ &= \sum_{t=1}^T p_t v_t^{k0} - \sum_{t=1}^T P_t z_t^{k0} - \sum_{t=1}^T p_t \varphi(x_t^{k0}, v_t^{k0}) - \\ &- \sum_{t=1}^T \pi_t \phi(x_t^{k0}, v_t^{k0}) + \sum_{n=1}^N \alpha^{kn} g^{kn}(\bar{z}^{kn}, \bar{v}^{kn}). \end{aligned}$$

В этой формуле α^{kn} – доля головного предприятия в капитале предприятия kn . В модели – это параметры.

Как было изложено выше, в данной модели предполагается, что любое предприятие в принципе способно выпускать любую продукцию в любом количестве, только такой непрофильный выпуск может сопровождаться очень большими затратами. Поэтому в рамках данной модели реализуемость плана естественно трактовать как безубыточность всех предприятий. Таким образом, Центру приписывается функция выигрыша

$$\begin{aligned} g(\bar{p}, \bar{z}^{10}, \bar{z}^{11}, \dots, \bar{z}^{1N}, \dots, \bar{z}^{KN}, \bar{v}^{10}, \bar{v}^{11}, \dots, \bar{v}^{1N}, \dots, \bar{v}^{KN}) &= \\ &= \min_{1 \leq k \leq K} \min \left[g^{k0}(\bar{z}^{k0}, \bar{z}^{k1}, \dots, \bar{z}^{kN}, \bar{v}^{k0}, \bar{v}^{k1}, \dots, \bar{v}^{kN}) \right. \\ &\quad \left. \min_{1 \leq n \leq N} g^{kn}(\bar{z}^{kn}, \bar{v}^{kn}) \right]. \end{aligned}$$

6. Информированность и порядок ходов. Будем предполагать, что всем субъектам рассматриваемой системы точно известны ее параметры.

Считаем, что *первым* принимает решение *Центр*. Он выбирает управления $\bar{u}^k = (u_1^k, \dots, u_T^k)$, $k = 1, \dots, K$, $\bar{p} = (p_1, \dots, p_T)$ и доводит до предприятий информацию о сделанном выборе.

Затем одновременно и независимо делают выбор *головные предприятия*.

Обозначим через $\bar{U}^{k0}(\bar{u}^k)$ множество всех наборов $u_t^{k0} = (z_t^{k0}, v_t^{k0}, \omega_t^{k00}, \dots, \omega_t^{k0N}, \omega_t^{k10}, \dots, \omega_t^{kNN})$, $t = 1, \dots, T$, удовлетворяющих условиям

$$u_t^{k0} \in U_t^{k0}(x_t^{k0}, u_t^k), \quad x_{t+1}^{k0} = x_t^{k0} + z_t^{k0}, \quad t = 1, \dots, T.$$

Головное предприятие *выбирает программу* $\bar{u}^{k0} \in \bar{U}^{k0}(\bar{p}, \bar{u}^k)$ и сообщает о своем выборе предприятиям своей интегрированной структуры.

После этого одновременно и независимо производят свой выбор остальные предприятия. Предприятие kn выбирает свою программу $u_t^{kn} = (z_t^{kn}, v_t^{kn})$, $t = 1, \dots, T$, из множества $\bar{U}^{kn}(\bar{u}^{k0})$ программ, удовлетворяющих условиям

$$u_t^{kn} \in U_t^{kn}(x_t^{kn}, \omega_t^{kn0}, \dots, \omega_t^{knN}, \omega_t^{k0n}, \dots, \omega_t^{kNn}), \\ x_{t+1}^{kn} = x_t^{kn} + z_t^{kn}, \quad t = 1, \dots, T.$$

7. Принцип оптимальности. Будем считать, что все субъекты осторожны к имеющейся у них неопределенности. При этом они рассчитывают на рациональное поведение своих партнеров.

При описанной выше схеме принятия решений предприятие kn ($n > 0$), выбирая управления, находится в ситуации, когда его выигрыш зависит только от его решения. Поэтому естественно считать, что оно выберет программу $\bar{u}^{kn}$ из множества

$$BR^{kn}(\bar{u}^{k0}) = \left\{ \bar{u}^{kn} \in \bar{U}^{kn}(\bar{u}^{k0}) : g^{kn}(\bar{p}, \bar{u}^{kn}) = \max_{\bar{w}^{kn} \in \bar{U}^{kn}(\bar{u}^{k0})} g^{kn}(\bar{p}, \bar{w}^{kn}) \right\}.$$

Головное предприятие $k0$ может оценить это множество. Поэтому для него естественно выбрать свою программу $\bar{u}^{k0}$ из множества

$$BR^{k0}(\bar{u}^k) = \\ = \left\{ \bar{u}^{k0} \in \bar{U}^{k0}(\bar{u}^k) : \min_{\bar{u}^{k1} \in \bar{U}^{k1}(\bar{u}^{k0})} \dots \min_{\bar{u}^{kN} \in \bar{U}^{kN}(\bar{u}^{k0})} g^{k0}(\bar{p}, \bar{u}^{k0}, \bar{u}^{k1}, \dots, \bar{u}^{kN}) = \right. \\ \left. = \max_{\bar{w}^{k0} \in \bar{U}^{k0}(\bar{u}^k)} \min_{\bar{u}^{k1} \in \bar{U}^{k1}(\bar{w}^{k0})} \dots \min_{\bar{u}^{kN} \in \bar{U}^{kN}(\bar{w}^{k0})} g^{k0}(\bar{p}, \bar{w}^{k0}, \bar{u}^{k1}, \dots, \bar{u}^{kN}) \right\}.$$

Можно показать, что если все параметры α^{kn} строго положительны, то при обычных предположениях о множествах выборов максимум в этой формуле достигается.

Обозначим

$$BR^k(\bar{u}^{k0}) = BR^{k0}(\bar{u}^k) \times \prod_{n=1}^N BR^{kn}(\bar{u}^{k0}).$$

Пусть Центр фиксировал программы $\bar{u}^k = (u_1^k, \dots, u_T^k)$, $k = 1, \dots, K$, и $\bar{p} = (p_1, \dots, p_T)$. Тогда он может рассчитывать, что при рациональном поведении партнеров он получит выигрыш, не меньший

$$\min_{(\bar{u}^{10}, \bar{u}^{11}, \dots, \bar{u}^{1N}) \in BR^1(\bar{u}^1)} \dots \min_{(\bar{u}^{K0}, \bar{u}^{K1}, \dots, \bar{u}^{KN}) \in BR^K(\bar{u}^K)} g(\bar{p}, \bar{u}^{10}, \bar{u}^{11}, \dots, \bar{u}^{1N}, \dots, \bar{u}^{K0}, \bar{u}^{K1}, \dots, \bar{u}^{KN}).$$

Теорема. Если величина

$$\sup_{\bar{p} \in U^T} \min_{(\bar{u}^{10}, \bar{u}^{11}, \dots, \bar{u}^{1N}) \in BR^1(\bar{u}^1)} \dots \min_{(\bar{u}^{K0}, \bar{u}^{K1}, \dots, \bar{u}^{KN}) \in BR^K(\bar{u}^K)} g(\bar{p}, \bar{u}^{10}, \bar{u}^{11}, \dots, \bar{u}^{1N}, \dots, \bar{u}^{K0}, \bar{u}^{K1}, \dots, \bar{u}^{KN})$$

положительна или она неотрицательна и верхняя грань в формуле достигается, то Программа $(\bar{u}^1, \dots, \bar{u}^K)$ реализуема.

Замечание о смешанных механизмах. В изложении не акцентирован случай, когда Предприятие может реализовывать излишки продукции на внутреннем рынке по рыночным ценам. Формально это учитывается при описании выпусков продукции и интересов предприятий. Тем самым учитывается специфика по смешанным механизмам управления отрасли.

В результате на основе данного описания построена сетевая модель, которая учитывает технологические и организационные связи предприятий комплекса. Сформулированная сетевая модель имеет вид теоретико-игровой модели с иерархической структурой, с приоритетом действий Центра и учетом связей между агентами технологического графа комплекса.

Задача принятия решений Центра сформулирована с учетом неопределенностей и рисков, что соответствует построению общей системы математического обеспечения процедуры стратегического планирования производственным блоком крупномасштабного комплекса.

3.2. Децентрализованная система при аукционных схемах сборочного производства

В настоящее время наблюдается большой интерес к созданию систем, управление которыми осуществляется по сетевому принципу. Как отмечается К. Швабом [21], тренд развития современной экономики определяется оцифрованными технологиями и сетевыми системами. Это системы, состоящие из относительно автономных элементов, узлов, которые обмениваются между собой информацией и изменяют свое состояние по каким-то локальным правилам. В данном изложении содержится описание такого проекта

[25] — предлагается сетевая форма взаимодействия внутри ассоциации предприятий, занимающихся некоторым общим производством. Взаимодействие предполагает организацию множественных локальных аукционов, по результатам которых внутри ассоциации определяется распределение функций для выполнения очередного заказа на производство.

1. Исходное описание.

Предполагается, что ассоциация занимается производством, закупкой, монтажом, сборкой изделий из некоторого фиксированного набора. Множество изделий из этого набора обозначим через $\hat{P}$. Предприятия, входящие в ассоциацию, будем называть участниками и их множество обозначим через L .

Предполагается, что участники — самостоятельные предприятия, деятельность которых не ограничена ассоциацией. Ее состав может меняться от заказа к заказу. Организация ассоциации — это способ расширить и упорядочить рынок сбыта продукции каждого из участников. Вход и выход предприятия из ассоциации — это свободный выбор предприятия. Участники предлагают свои услуги в выполнении заказов, принимают на себя обязательства по их выполнению, но их благополучие не зависит полностью от того, будут они выбраны для участия в очередном заказе или нет. Им важно занять свое место в потоке поступающих заказов. Участие в ассоциации накладывает на предприятия определенные требования, в частности необходимость интеграции в общую информационную сеть.

Помимо предприятий, составляющих множество участников L , есть еще один выделенный участник — это Центр, центральный участник ассоциации. Функции Центра в рамках модели и рассматриваемых далее аукционных схем — это координация аукционов и распределение заказа между изготовителями изделий ранга 1.

В реальности Центр также должен контролировать исполнение заказов, расшивать нестыковки, которые могут возникать по причине невыполнения участниками взятых на себя обязательств в плановые сроки, распределять выручку между участниками и т.п.

Введем необходимые обозначения.

Изделия будем именовать по индексу: $\hat{P} = \{m\}_{m=1}^{M^0}$.

Будут рассматриваться поставки изделий от производителей друг другу. Все множество поставок по заказу описывается трехмерной матрицей $A = (a_{k,r}^n)$, здесь верхний индекс соответствует изделию, первый нижний индекс — поставщику, а второй — получателю изделия.

Произвольному набору изделий W из $\hat{P}$ сопоставим вектор $\bar{W} \subset \mathbb{R}^{M^0}$, в котором компоненты w_n соответствуют количеству (объему) изделий $n \in \hat{P}$ из W . И, наоборот, для вектора изделий $\bar{W}$ через W будем обозначать набор ненулевых индексов этого вектора.

Запись $\bar{w}_n$ будет означать вектор $\bar{W} \subset \mathbb{R}^{M^0}$ с единственной ненулевой компонентой n , равной w_n . Часть изделий $n \in M^0$ монтируется из других изделий, производимых внутри ассоциации. Изделию n сопоставим множество

$G(n) \subset \hat{P}$ тех деталей, из которых оно монтируется. Для множества изделий $W \in \hat{P}$ через $G(W)$ обозначим набор деталей, из которых монтируются изделия из W : $G(W) = \bigcup_{n \in W} G(n)$.

Заметим, что в множество $G(W)$ может входить часть изделий из W , поскольку одни изделия из набора W могут использовать другие в качестве комплектующих. Через $\bar{G}(W)$ будем обозначать вектор комплектующих, необходимых для сборки всех компонент вектора $\bar{W}$. Подчеркнем, что в $G(n)$ входят только детали финальной сборки изделия n . Если некоторая деталь $k \in G(n)$ сама является сборной, то объемы комплектующих $\bar{G}(\bar{v}_k)$ не входят в компоненты вектора $\bar{G}(\bar{v}_n)$.

Имеется набор изделий $\hat{P}^1 \subset \hat{P}$, которые условно назовем товарами. Это те изделия, которые ассоциация производит по внешним заказам или на продажу. Они образуют первый, верхний уровень производства. Товары монтируются из деталей, составляющих множество $\hat{P} \setminus \hat{P}^1$.

Часть деталей, используемых при монтаже товаров, в свою очередь монтируются из деталей, входящих в $\hat{P}$. Выделим в нем и отнесем к уровню 2 подмножество $\hat{P}^2$ таких изделий, которые используются только в монтаже изделий из $\hat{P}^1$. Множество $\hat{P}^2 \subset \hat{P} \setminus \hat{P}^1$.

Для монтажа изделий из $\hat{P}^2$ в свою очередь могут потребоваться комплектующие. Это изделия из множества $\hat{P} \setminus (\hat{P}^1 \cup \hat{P}^2)$. Выделим из них те, которые используются только в монтаже изделий первых двух уровней. Отнесем их к уровню 3 и обозначим через $\hat{P}^3$. Множество $\hat{P}^3 \subset \hat{P} \setminus (\hat{P}^1 \cup \hat{P}^2)$. И так далее, всего будет выделено некоторое ограниченное число уровней.

2. Графическое представление производства.

Всю структуру производства наглядно можно представить в виде направленного ациклического графа, называемого технологическим графом. Узлы этого графа соответствуют изделиям $n \in M^0$, используем для них те же обозначения. На верхнем, корневом уровне графа узлы, соответствующие изделиям, которые названы товарами. Обозначим множество этих узлов, как и множество товаров, т.е. $\hat{P}^1$.

Дуги, исходящие из узла $n \in M^0$ технологического графа, направлены к узлам, соответствующим тем деталям, из которых монтируется изделие n .

Определение 1. Из двух смежных узлов назовем прямым предшественником тот узел, из которого исходит дуга, а тот, к которому она подходит, — прямым потомком.

Определение 2. Совокупность прямых потомков, составляющих некоторое подмножество узлов технологического графа W , соответствует определенному выше множеству $G(W)$. Назовем его проекцией множества W .

Проекцией множества $G(W)$ будет множество $G(G(W))$ и т.д. Понятно, что число таких проекций ограничено. Двигаясь по дугам от узла к узлу,

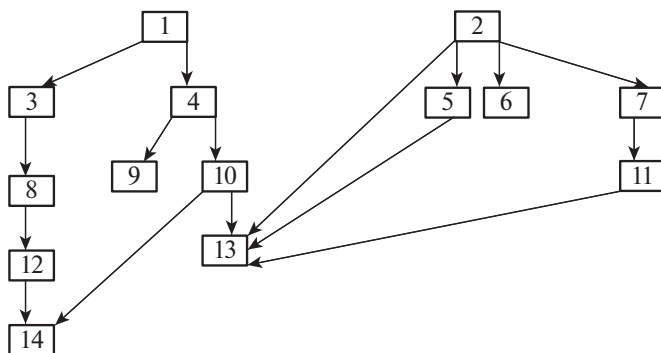


Рис. 2. Пример технологического графа.

неизбежно достигнем конечных узлов, которые разбросаны по разным множествам $G^n(W)$. Эти узлы соответствуют изделиям, производство которых не требует комплектующих из набора $\hat{P}$. Они закупаются готовыми извне ассоциации или для их производства используются только комплектующие, произведенные вне ассоциации.

На рис. 2 представлен пример технологического графа. Узлы 1, 2 составляют корень графа множество $\hat{P}^1$. К множеству $\hat{P}^2$ относятся узлы 3–7, 13. К множеству $\hat{P}^3$ — узлы 8–10, 11, 13. Узлы 12, 13 принадлежат множеству $\hat{P}^4$, узел 14 — $\hat{P}^5$. Концевыми узлами являются узлы 6, 9, 11, 13, 14.

Определение 3. Назовем рангом узла n технологического графа длину максимального пути (числа дуг) от корня графа до этого узла плюс 1.

В графе на рис. 2 у корневых узлов 1 и 2 ранг 1, узлы 3–7 имеют ранг 2, узлы 8–11 имеют ранг 3, узлы 12, 13 — ранг 4, а узел 14 — ранг 5.

Дугам технологического графа придадим веса.

Определение 4. Вектору изделий $\bar{W}$ сопоставим $\bar{H}(\bar{W})$, вектор деталей всех уровней, необходимых для сборки $\bar{W}$. Набор деталей, составляющих вектор $\bar{H}(\bar{W})$, обозначим $H(\bar{W})$ и назовем полной проекцией вектора $\bar{W}$.

Вектор $\bar{H}(\bar{W})$ представляет собой сумму последовательных проекций $\bar{G}(\bar{W}) + \bar{G}(\bar{G}(\bar{W})) + \bar{G}(\bar{G}(\bar{G}(\bar{W}))) + \dots$. Продвигаясь по дугам вниз от узла n и используя веса дуг, легко посчитать, сколько всего комплектующих того или иного вида требуется для сборки изделия n .

3. Участники.

Каждое из предприятий производит некоторое подмножество продуктов из набора $\hat{P}$. Участник $l \in L$ описывается одной из множества принятых моделей производства. В общей форме это выглядит так. Предприятие l располагает некоторым набором ресурсов, текущие объемы которых записаны в виде вектора $\bar{S}_l = (s_1^l, s_2^l, \dots, s_P^l)$. Задана вектор-функция $\bar{\Psi}^l(\bar{W}) : \mathbb{R}^{M^0} \rightarrow \mathbb{R}^p$, показывающая, сколько ресурсов каждого вида расходует предприятие при производстве вектора продукции $\bar{W}$.

Одним из ресурсов, составляющих набор S , являются финансы. Пусть для определенности это компонента s_1 . Расход ресурса s_1 отражает финансовые издержки предприятия на производство вектора продукции $\bar{W}$. В s_1 входят только собственные траты участника на сборку продукции, но не стоимость необходимых для этого комплектующих. Предполагается, что стоимость комплектующих, поставляемых участнику l , войдет в стоимость его изделий и вернется поставщикам после выполнения заказа.

4. Транспорт.

Осуществление поставок между участниками требует затрат и может осуществляться как силами производителей, так и специализированными транспортными компаниями. В данной статье для моделирования транспорта используется самое простое решение. Каждому предприятию l приписывается набор таблиц, $T_l = (t_{l,r}^n)$, $n \in M^0$, в которых указаны цены доставки единицы продукции n от предприятия l другим предприятиям, т.е. r . Эти цены учитываются при взаиморасчетах участников.

Задача распределения производства по узлам технологического графа.

Центр входит в ассоциацию производителей под номером 0. Предположим, Центр принимает заказ Z на производство изделия $m \in \hat{P}^1$ в объеме v_m . Производство объема v_m распределяется между теми участниками, которые специализируются на сборке этих изделий. После выполнения заказа Z готовые изделия m поступают в Центр в виде поставок $y_{l,0}^m$, $l \in L$.

Для выполнения заказа должны быть обеспечены поставки комплектующих по всем уровням технологического графа. Обозначим матрицу поставок как $Y = (y_{j,l}^n)$, $n \in M^0$, $j, l \in L$. Должны выполняться балансовые соотношения:

$$\forall l : \bar{G}(\bar{W}_l) = \sum_{j \in L} \bar{Y}_{j,l}.$$

Здесь $\bar{W}_l$ – вектор продукции, производимый участником l , $\bar{Y}_{j,l}$ – вектор поставок изделий от участника j участнику l .

Кроме балансовых, должны выполняться ресурсные ограничения:

$$\forall j : \bar{\Psi}^j \left(\sum_{l \in L} \bar{Y}_{j,l} \right) \leq \bar{S}_j.$$

Пока в модели не рассматриваются запасы комплектующих. Все поставки формируются из изделий, произведенных на базе текущих ресурсов предприятий. Вектор поставок $\sum_{l \in L} \bar{Y}_{j,l}$ – это вектор изделий, произведенных предприятием j в рамках текущего заказа.

Согласно договоренности, компонента s_1 – это денежные средства, идущие на производство изделий. Суммировав величины $\psi_1^j (\sum_{l \in L} \bar{Y}_{j,l})$ и транспортные расходы по всем поставкам, получим стоимость производства заказанно-

го объема изделий v_m . Ставится задача минимизировать эту стоимость:

$$\psi_1^l \left(\sum_{l \in L} \bar{Y}_{j,l} \right) + \sum_{n \in M^0} \sum_{j \in L} \sum_{l \in L} t_{j,l}^n \cdot y_{j,l}^n \rightarrow \min.$$

Ассоциация заинтересована в снижении себестоимости ее продукции, так как участвует в конкурентной борьбе за заказы. Разница между продажной стоимостью заказа и его себестоимостью формирует прибыль участников. Если вектор-функции 1–3 ресурсов линейны, то задача 1–3 является задачей линейного программирования.

5. Обзор схемы аукционов.

Современное развитие вычислительной техники и методов линейного программирования позволяет решать задачи очень большой размерности. Если сформулированная выше задача создания оптимального плана распределения заказа между производителями может быть адекватно представлена линейными соотношениями, то основная проблема формирования такого плана, вероятно, будет связана не с вычислениями, а с конструированием весьма громоздкой модели и наполнением ее конкретными данными. Для этого потребуются постоянный мониторинг ресурсов участников ассоциации, а также меняющихся технологических условий производства. Для достаточно большой ассоциации такой централизованный подход может оказаться слишком затратным, если вообще осуществимым. Поэтому естественно декомпозировать задачу, передав большую часть функций по оценке производственных мощностей предприятий и разработке общего плана производства самим предприятиям. Идея состоит в том, чтобы план производства вырабатывался в результате аукционов, на которых одни участники выбирают себе поставщиков из числа других участников.

Децентрализация с аукционной схемой — это способ декомпозировать представленную выше общую задачу распределения производства, поэтому для нее должны выполняться те же балансовые и ресурсные ограничения, и еще некоторые дополнительные, обусловленные декомпозицией. Переменные в рамках модели полагаем непрерывными.

Для иллюстрации схемы используем граф, изображенный на рис. 2.

Множество предприятий, производящих изделия из набора W , будем обозначать $L(W)$.

Допустим, в Центр поступил заказ на производство некоторого объема w_m изделий m , пусть на рис. 2 — это будет изделие 1. У Центра имеются схемы технологических графов для всех изделий $n \in M^0$. Центр публикует этот заказ вместе с его полной проекцией, вектором $\bar{H}(\bar{w}_m)$. Участники на основании своих ресурсов решают, за производство каких объемов изделий n , составляющих вектор $\bar{H}(\bar{w}_m)$, они хотели бы и готовы взяться. Под эти объемы они публикуют заказы на поставки деталей из множеств $G(n)$. Эти публикации суть объявление аукционов.

На заказы изделий $G(n)$ должны отреагировать участники из множества $L(G(n))$. Они из предполагаемого ими объема производства выделяют какую-то его часть на поставки каждому участнику из $L(n)$. Предприятия, производящие изделия, соответствующие конечным узлам, не нуждаются для их изготовления в поставках от других участников ассоциации и могут определять объемы их производства исходя только из своих ресурсов. Для планирования производства остальных изделий их изготовители должны знать, какими объемами комплектующих они располагают. Так, на рис. 2 участники $l \in L(4)$ должны сформировать пулы изделий 9 и 10, служащих деталями для изделия 4. Однако, прежде чем будет собран пул изделий 10, участники из $L(10)$ должны определиться с объемом производства и поставок этих деталей производителям изделий 4. Чтобы аукционы были синхронизированы, они должны проводиться в определенном порядке. Этот порядок устанавливает Центр в соответствии с технологическим графом.

Определение 5. Назовем рангом проводимого участником $l \in L(n)$ аукциона на поставки комплектующих для изделия n ранг изделия n .

Условие 1. Аукционы более высокого ранга предшествуют аукционам более низкого ранга.

В рассматриваемом примере этот порядок выглядит так. Предприятия из множества $L(12)$ суммируют предложения по комплектующим от участников из множества $L(14)$. Эти предложения включают в себя объемы поставок и их цены с учетом транспортных расходов. Предложения ограничены объемами и сроками, объявленными в заказах. Если по каким-то позициям суммы предложений превосходят объем заказа, то участники из $L(12)$ делают выбор между ними, отдавая предпочтение более дешевым вариантам. Сформировав пулы комплектующих, участники рассчитывают, какой объем изделий и по каким ценам они могут произвести из этих комплектующих в пределах объема, объявленного ими на аукционе. Так, в рамках примера, сформировав пулы из комплектующих 14, участники из множества $L(12)$ рассчитывают, какой объем изделий 12 и по каким ценам они могут произвести. Определившись с объемом, производители изделий 12 делают предложения о поставках этих изделий участникам из $L(8)$. На этом аукционы по изделиям 12 завершаются.

Далее по тому же сценарию проводят аукцион предприятия из $L(8)$, выбирая между предложениями по комплектующим 12 и формируя свои предложения участникам из множества $L(3)$. Затем такой же аукцион проводят предприятия из $L(3)$ по комплектующим 8.

Предприятия из множества $L(10)$ проводят отдельные аукционы по комплектующим от участников из множеств $L(14)$, $L(13)$ и определяются с объемом и ценами поставок изделий 10 предприятиям из $L(4)$.

После этого проводят аукционы предприятия из множества $L(4)$, отдельно по предложениям от участников из $L(9)$ и $L(10)$.

Наконец, предприятия из множества $L(1)$ проводят аукционы по предложениям от участников из множеств $L(3)$, $L(4)$ по комплектующим 3 и 4. По

результатам этих аукционов они рассчитывают, какой объем изделий 1 и по каким ценам они могут произвести и объявляют результаты Центру. На этом заканчивается нисходящая (в смысле рангов изделий) волна аукционов.

Начинается завершающая фаза верстки плана по выполнению заказа. Центр назначает, какие доли от заказанных изделий m будут производить участники из множества $L(m)$. Назначенные объемы, разумеется, не превосходят предложений участников. Участники из $L(m)$ в соответствии с назначенными объемами распределяют задание на производство комплектующих между производителями из множества $L(G(m))$. И эти задания не превосходят те объемы, которые были предложены участниками из множества $L(G(m))$ на аукционах, проведенных участниками из $L(m)$, и т.д. Восходящая волна заданий доходит до концевых узлов, и на этом формирование плана производства завершается.

6. Формализованное описание схемы аукционов.

Как выше, но в общем виде рассматриваем ситуацию, когда в Центр поступил заказ Z на производство изделия $m \in M^0$ в объеме w_m . Схема разбивается на несколько этапов.

Этап 1. Центр рассчитывает и объявляет участникам вектор всех необходимых для исполнения заказа деталей $\bar{H}(\bar{w}_m)$.

Этап 2. Участники выбирают векторы изделий $\bar{W}^{2,l} = (w_1^{2,l}, w_2^{2,l}, \dots, w_{M^0}^{2,l})$, $l \in L$, которые они хотели бы произвести в рамках данного заказа. Цифра 2 в верхнем индексе указывает на этап, на котором выбирается этот вектор производства. Участник l выбирает точку на подмножестве пространства $\mathbb{R}^{M^0}$, ограниченном ресурсными неравенствами

$$\bar{\Psi}^l(\bar{W}^{2,l}) \leq \bar{S}_l$$

и требованиями заказа Z , т.е. неравенствами

$$w_n^{2,l} \leq h_n(\bar{w}_m) \quad \forall n \in M^0.$$

Затем объявляют аукционы на поставки комплектующих, необходимых им для производства вектора $\bar{W}^{2,l}$, т.е. на поставки компонент вектора $\bar{G}(\bar{W}^{2,l})$. Аукционы, объявленные участником l , обозначим A^l .

Этап 3. Это этап собственно аукционов, которые проводятся последовательно от более высоких рангов к низшим. К моменту проведения аукциона по поставкам деталей $G(n)$ для изделия $n \in W^{2,l}$ участником l собран весь пул предложений по поставкам ему этих деталей и их ценам от разных производителей.

Участник j на аукционе A^l по комплектующей k предлагает объем поставок, который будем обозначать $Y_{jl}^{3,k}$ (цифра 3 в верхнем индексе указывает на этап).

С поставкой связывается записанная в табличной форме функция цен $c_{j,l}^k(\varsigma)$, $\varsigma \in [0, Y_{j,l}^{3,k}]$, зависящих от объема поставки ς . В цену входят назначенная производителем j стоимость заданного объема изделий и транспортные расходы.

Множество предложений от участника j по аукционам всех участников образует матрицу $Y_j^3 = (y_{j,l}^{3,k})$, где $l \in L \setminus j$, $k \in M^0$. Матрицу цен $c_{j,l}^k(\varsigma)$ участника j обозначим C_j .

Весь корпус предложений о поставках от всех участников вместе с таблицами цен обозначим как пару $(\hat{Y}^3, \hat{C})$, $\hat{Y}^3 = \bigcup_{j \in L} Y_j^3$, $\hat{C} = \bigcup_{j \in L} C_j$.

Исходя из объемов и цен, предложенных ему комплектующих, участник l корректирует объем изделий n , который он желал бы произвести. Обозначим его $w_n^{3,l}$. Этот объем не должен превышать объявленный на этапе 2, т.е.

$$w_n^{3,l} \leq w_n^{2,l} \quad \forall n \in M^0.$$

Объем $w_n^{3,l}$ должен быть обеспечен поставками комплектующих, т.е.

$$g_k(\bar{w}_n^{3,l}) \leq \sum_{j \in L} y_{j,l}^{3,k} \quad \forall n, k \in M^0.$$

Выбрав объем производства $w_n^{3,l}$, участник l определяет объемы своих предложений по поставкам на аукционы более низких рангов, тех, где заявлена потребность в комплектующих n , т.е. он определяет вектор $\bar{Y}_l^{3,n} = (y_{lj}^{3,n})$.

Предложения о поставках не должны превышать потребности, поэтому должны выполняться неравенства

$$y_{l,j}^{3,n} \leq g_n(\bar{W}^{2,j}) \quad \forall j \in L, \forall n \in M^0.$$

Таким образом, последовательно по аукционам формируется совокупность предложений $(\hat{Y}^3, \hat{C})$.

Этап 4. На этом завершающем этапе по совокупности предложений $(\hat{Y}^3, \hat{C})$ верстается план производства, т.е. распределение производственных заданий и поставок. Это совокупность матриц $\hat{Y}^4(\hat{Y}^3, \hat{C}) = \left\{ Y_l^4(\hat{Y}^3, \hat{C}) \right\}_{l=1}^L$, где $Y_l^4(\hat{Y}^3, \hat{C})$ – матрица объемов комплектующих, которые участник l должен будет поставить другим участникам.

Для поставок должны выполняться неравенства

$$y_{j,l}^{4,n}(\hat{Y}^3, \hat{C}) \leq y_{j,l}^{3,n} \quad \forall l, j \in L, \quad \forall n \in M^0,$$

т.е. задания участнику j по плану не должны превышать его предложения.

Чтобы избежать неоднозначности при формировании плана, можно условиться, что при равенстве цен комплектующих от разных производителей предпочтение отдается поставщику с меньшим порядковым номером $j \in L$. Процедура выбора значений $y_{j,l}^{4,n}$ рекурсивная и организована в виде восходящей волны по технологическому графу.

Производитель j дожидается получения заданий на производство изделий n от всех участников l , которым он посылал предложения $y_{j,l}^{3,n}$. Предполагается, что ответ он должен получить от всех таких участников, даже если объем задания равен нулю.

После этого участнику j известен весь объем изделий n , который ему необходимо произвести. Это будет $w_n^{4,j} = \sum_{l \in L} y_{j,l}^{4,n}(\hat{Y}^3, \hat{C})$. Под этот объем участ-

ник j определяет вектор необходимых комплектующих $\bar{G}(\bar{w}_n^{4,j})$. Для каждой из компонент k этого вектора на аукционах A^j был создан пул комплектующих объемом $\pi_k^j = \sum_{l \in L} y_{l,j}^{3,k}$. Если предложения $y_{j,l}^{3,n}$ были корректны (см. правила 1–3 далее), то $w_n^{4,j} \leq w_n^{3,j} \quad \forall n \in M^0$ и объемы этих пулов достаточны для того, чтобы обеспечить комплектующими k производство всех компонент вектора $\bar{W}^{3,j}$, т.е. выполняются неравенства

$$\sum_{n \in M^0} G_k(\bar{w}_n^{4,j}) \leq \sum_{n \in M^0} G_k(\bar{w}_n^{3,j}) \leq \pi_k^j.$$

Участник j выбирает из объема π_k^j объем $G_k(\bar{w}_n^{4,j})$, начиная с наиболее дешевых предложений. Затем j распределяет задания тем производителям, предложения которых вошли в объем $G_k(\bar{w}_n^{4,j})$, т.е. определяет для каждого из них компоненты $y_{l,j}^{4,k}(\hat{Y}^3, \hat{C})$ матрицы поставок $Y_l^4(\hat{Y}^3, \hat{C})$.

Комплектующие k могут входить в разные изделия производителя j . Для j можно рассчитать суммарную стоимость поставок деталей k от производителей l , получивших в ходе этапа 4 задание от j на их поставки. Обозначим ее d_j^k :

$$d_j^k(\hat{Y}^4, \hat{C}) = \sum_{l \in L} c_{l,j}^k \left(y_{l,j}^{4,k}(\hat{Y}^3, \hat{C}) \right).$$

Формирование плана производства заканчивается, когда волна заданий доходит до конечных узлов.

Для рассмотренной схемы установлено, что участникам аукционов целесообразно придерживаться следующих правил.

Правило 1. Участник j , определяя на этапе 2 желаемый вектор производства $\bar{W}^{2,j}$, делает выбор среди недоминируемых допустимых векторов, т.е. среди недоминируемых векторов, удовлетворяющих ограничениям 4 и 5.

Правило 2. Участник j на этапе 3 определяет объемы производства $w_n^{3,j}$, равные $\min[w_n^{2,j}; \pi_n^j]$, где $\pi_n^j = \sum_{l \in L} y_{l,j}^{3,n}$ – пул комплектующих n , собранных на аукционах A^j .

Правило 3. Участник j , определяя на этапе 3 свои предложения по поставкам изделия n , величины $y_{j,l}^{3,n}$, действует следующим образом:

если $w_n^{3,j} = H_n(\bar{w}_m)$, то $y_{j,l}^{3,n} = G_n(\bar{W}^{2,l}) \quad \forall l \in L$, т.е. если выбранный участником j объем производства $w_n^{3,j}$ равен общей потребности в изделиях n по заказу Z (больше $H_n(\bar{V}_m)$) он быть не может в силу условия 2), то j предлагает каждому производителю l тот объем изделий n , который объявлен l на аукционах A^l ;

если $w_n^{3,j} < H_n(\bar{V}_m)$, то j выбирает значения $y_{jl}^{3,n}$ такими, чтобы они удовлетворяли соотношениям

$$\sum_{l \in L} y_{jl}^{3,n} = w_n^{3,j}$$

и

$$y_{jl}^{3,n} \leq G_n(\bar{W}^{2,l}) \quad \forall l \in L.$$

Описанная схема представляется достаточно прозрачной и эффективной в смысле поиска допустимого плана, если число участников велико и их ресурсы производства значительно превосходят те, которые необходимы для исполнения заказа. Однако, как нетрудно видеть, аукционная схема не гарантирует формирования плана во всех тех случаях, когда допустимый план существует.

Рассмотрим ту же схему производства в предположении, что каждый участник производит не более одного изделия из множества изделий $\bar{H}(\bar{w}_m)$, необходимых для выполнения заказа Z . Это эквивалентно условию, что каждое предприятие l , получив от Центра сведения об очередном заказе, выделяет доли своих ресурсов под производство тех или иных изделий из множества $\bar{H}(\bar{w}_m)$. В результате определяется $w_{l,n}^{\max}$, максимальный допустимый объем производства каждого из изделий участником l , и неравенство $\bar{\Psi}^l(\bar{W}^{2,l}) \leq \bar{S}_l$ заменяется на неравенство

$$w_n^{2,l} \leq w_{l,n}^{\max}, \quad n \in M^0, \quad l \in L.$$

Тогда формально можно считать, что каждому предприятию l , желающему участвовать в выполнении заказа Z , сопоставлено ровно одно изделие $\tilde{n}(l) \in H(\bar{V}_m)$ и каждому изделию $n \in H(\bar{V}_m)$ соответствует множество готовых его производить участников $\tilde{L}(n)$.

Условие 2. Для каждого изделия $n \in H(\bar{w}_m)$ верно неравенство $\sum_{l \in \tilde{L}} w_{l,n}^{\max} \geq h_n(\bar{w}_m)$.

Справедливо следующее утверждение.

Утверждение. Данная схема аукционов приводит к допустимому решению тогда и только тогда, когда выполняется условие 2.

Замечание. Опишем компьютерную имитацию аукционной схемы.

Рассмотренные выше схемы проведения аукционов оставляют вопросы, на которые сложно искать ответы аналитическими методами, поэтому представляется целесообразным проведение исследований предложенных схем в режиме имитации на компьютерной модели. Такая модель должна строиться как сеть, состоящая из узлов, каждый из которых соответствует участнику ассоциации. В общих чертах имитационная система выглядит так. Для каждого узла создается своя модель производства, соответствующая описанию, сделанному выше в подразделе 3.2, п. 3. Выбираются набор изделий M^0 и производственные графы для них. Моделируются правила аукционов. Для каждого узла задается начальное состояние ресурсов, и системе предлагается последовательность заказов на производство изделий из множества $\hat{P}^1$.

Откликом системы на заказ будут план сборки (если аукционная схема его находит) и изменение состояния узлов по результатам выполнения заказов. Естественно, при исследовании желательно также реализовать решение общей задачи. Сравнивая результаты решений общей задачи и аукционных, удастся сделать выводы об эффективности аукционной схемы.

Предложенная модель может найти применение в задачах планирования хозяйственной деятельности при возможности конкурентных взаимодействий игроков.

4. Информационное обеспечение в крупномасштабных проектах многоукладной экономики

Как отмечалось, для использования описанных концептуальных построений необходима соответствующая инфраструктура. Вопросам разработки данных, на которых будет базироваться специализированный информационно-вычислительный комплекс и которые составляют один из важнейших разделов программы цифровизации, посвящается этот раздел. Что касается алгоритмического инструментария для проведения расчетов и вычислительных экспериментов, то научное и прикладное сообщество располагают обширным арсеналом методов оптимизации, решения теоретико-игровых задач и разработки имитационных систем [5].

В данном разделе изложение следует публикации соавторов [8].

Особое место среди крупномасштабных экономических систем страны занимает оборонно-промышленный комплекс (ОПК), где наряду с техническими и экономическими проблемами необходимо принимать чрезвычайно ответственные оперативные решения по организационным и технологическим инновациям.

Естественно, ОПК является частью экономического комплекса страны, но имеет и специфику, которую необходимо учесть в процессе моделирования. В организационном плане это проявляется прежде всего в формах управления. Управление носит смешанный децентрализованный характер, осуществляется как государственно-плановое, директивное, так и рыночное воздействия.

В основном упор делается на плановый характер государственных заказов через принятие решений в интересах государства на предприятиях с государственной собственностью, но учитываются и рыночные механизмы, в частности ценовые механизмы и спрос при производстве гражданской продукции и при поставках на экспорт.

Кроме того, имеется особенность в производимой продукции. Выпускаемая продукция подразделяется на три группы. Основная продукция военного назначения в экономической терминологии носит характер не прямого товарного характера для потребления на внутреннем рынке, а услуги, обеспечивающие защиту от внешнего воздействия. Потребление в ОПК перспективных научных достижений мира имеет приоритетный характер в силу указанной специфической услуги.

Основная военная продукция, поставляемая на внешний рынок, имеет характер рыночного товара. Продукция гражданского назначения является товаром прямого потребления и входит в состав товаров рыночного характера.

Термин “Развитие ОПК” подразумевает изменение во времени характеристик состояния комплекса и предполагает, что позитивное улучшение состояния происходят в направлении прогресса составляющих комплекса и связывается с новейшими технологиями. Управление развитием предполагает осуществление воздействий на процесс развития ОПК, обеспечивающих улучшение характеристик его состояния.

Вследствие этого при использовании математических моделей предполагается возможность выбора всех свободных переменных модели для улучшения по совокупности формально заданных целей. Таким образом, с методологической точки зрения для выработки и реализации рациональных управляющих воздействий необходимо построить модели изменения переменных состояния, определить параметры, могущие повлиять на развитие, определить цели и затем выработать стратегии в зависимости от наличной информации, ведущие к прогрессу управляемой системы.

Очевидно, что задача управления развитием ОПК является сложной задачей, требующей анализа большого объема данных при принятии решений по управлению, в том числе предполагает использование элементов математического моделирования в интересах принятия решений в процессе программно-целевого и ситуационного управления развитием ОПК.

С целью формирования эффективного инструмента информационного взаимодействия с заинтересованными органами Центра, интегрированными структурами и организациями ОПК при подготовке и решении широкого круга управленческих и производственных задач в сфере ОПК, начиная с 2012 г., Минпромторгом России разработана концепция и реализуются мероприятия по созданию и развитию Единого информационного пространства ОПК (далее — ЕИП ОПК) [24].

ЕИП ОПК представляет собой территориально распределенные автоматизированные информационные системы и информационные ресурсы, объединенные общими правилами обмена данными и телекоммуникационной системой с защищенными каналами связи.

Реализация концепции развития ЕИП ОПК осуществляется по четырем ключевым направлениям (см. рис. 3):

- развитие нормативной базы и организационного обеспечения ЕИП ОПК;
- формирование инфраструктуры ЕИП ОПК;

- развитие тематических баз данных и сервисов ЕИП ОПК;

- создание интегрированного ресурса и организация информационного взаимодействия с внешними системами.

Создание и развитие тематических баз данных ЕИП ОПК основано на принципе сочетания централизованного и децентрализованного подходов к сбору, хранению и обработке информации.

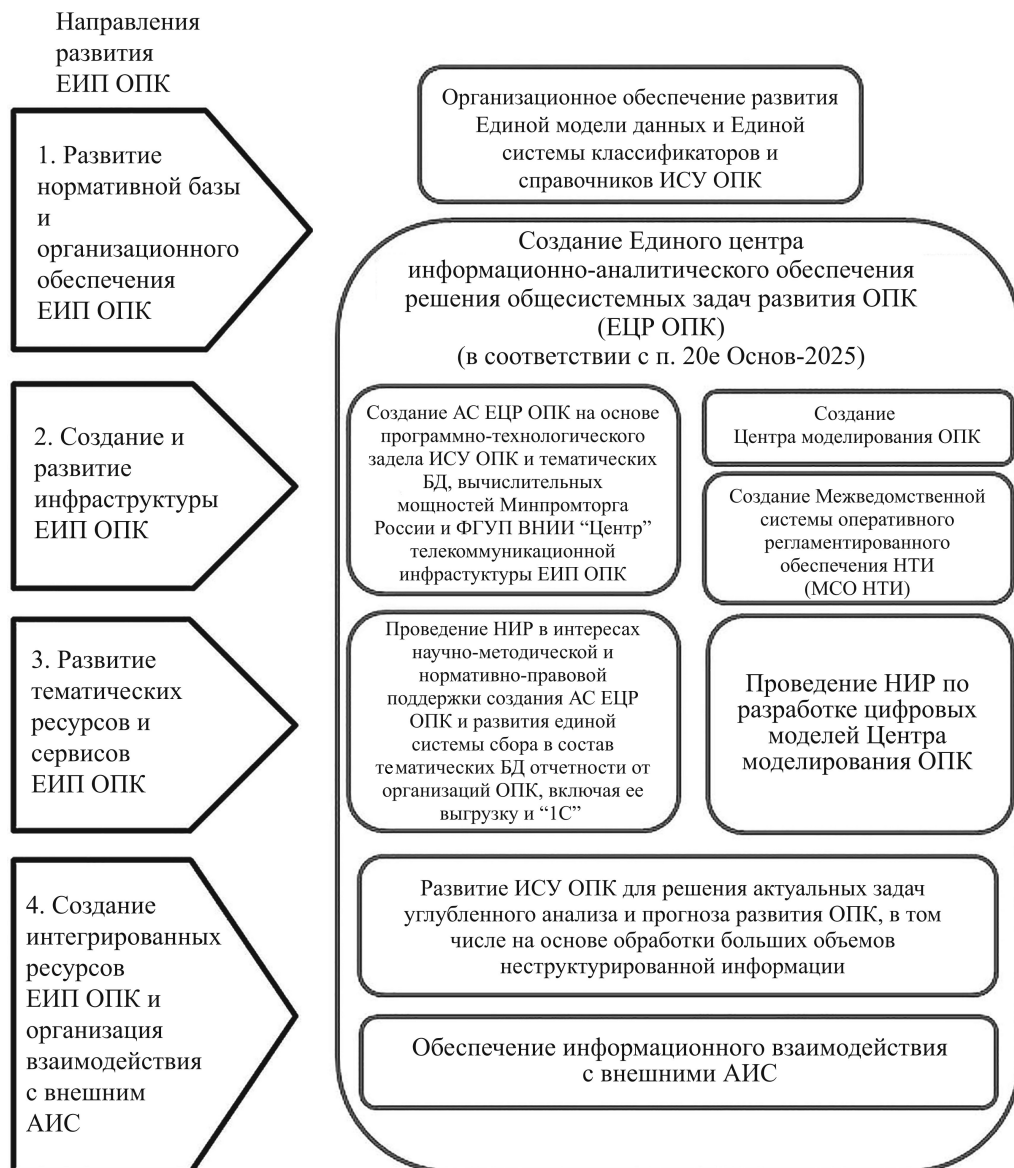


Рис. 3. Этапы создания и развития ЕИП ОПК.

5. Заключение

Изложен опыт разработки и приводятся примеры описания информационного пространства и комплекса математических моделей, которые обеспечивают в совокупности, на основе целостной и взаимоувязанной методологии системного подхода использование алгоритмов, программных комплексов прогнозирования и систем поддержки принятия решений на разных уровнях стратегического планирования развитием крупномасштабных проектов.

Комплекс концептуальных математических моделей управления развитием включает:

1. Модели анализа и синтеза крупномасштабных проектов. Позволяют специалисту, подготавливающему решение, выбирать из перечня нужный в сложившейся ситуации набор критериев и ограничений. Таким образом, вопросы формирования структуры модели для плановых расчетов, комплектование модели критериями оптимизации, их содержательная трактовка, корректировка модели и исходных данных создают набор инструментов для стратегического планирования на базе цифровых платформ;

2. Базовая модель производства, цифровой двойник. Базовая модель предприятия описывает развитие производства, динамику материальных (продукция, производственные фонды) и финансовых потоков (инвестиции, активы, обязательства, собственный капитал) с учетом технологий и целей производства;

3. Сетевая модель отвечает на вопрос: какое распределение финансовых средств и ресурсов между предприятиями обеспечивает выполнение заданного стратегического плана при учете их экономических интересов на основе цифровых платформ.

Дальнейшие исследования в рамках представлений данной статьи соответствуют логике синтеза крупномасштабных проектов, описанной в [3]. Прежде всего необходима разработка системы показателей для построения производственных функций для отдельных предприятий и интегрированных структур. Эта процедура строится на идеях обработки нелинейных балансов финансовых потоков системы предприятий [26, 27].

Следующий шаг связан с анализом и проектированием экономических механизмов всей системы с учетом рыночных отношений и государственного регулирования, отношений собственности, системного подхода [9, 11, 23, 28].

В моделях общего равновесия рассматриваются максимально агрегированные агенты и проводится анализ влияния изменения экономических механизмов, который позволяет сделать выводы о степени и направлении влияния наборов механизмов на деятельность предприятий крупномасштабных проектов. К числу таких механизмов может быть отнесена программа инвестирования в национальные проекты и развития инфраструктуры за счет целевого кредитования, выпуска долгосрочных бумаг под проектную деятельность, изменение механизмов финансового взаимодействия с внешним миром. В перспективе может быть поставлен вопрос о выборе наиболее эффективных механизмов экономической деятельности отдельных агентов и системы в целом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Моисеев Н.Н.* Математические задачи системного анализа. М.: Наука, 1981.
2. *Васильев С.Н., Цвиркун А.Д.* Проблемы управления развитием крупномасштабных систем в современных условиях // Управление развитием крупномасштабных систем. (Современные проблемы. Вып. 3). М.: Физматлит, 2018. С. 12–42.

3. Цвиркун А.Д. Основы синтеза структуры сложных систем. М.: Наука, 1982.
4. Цвиркун А.Д., Акинфиев В.К., Соловьев М.М. Моделирование развития крупномасштабных систем. М.: Экономика, 1983.
5. Еreshko Ф.И. Математические модели и методы принятия согласованных решений в активных иерархических системах. Дисс. на соискание уч. степ. д-ра техн. наук. Специальность: 05.13.10 Управление в социальных и экономических системах. М.: ИПУ РАН, 1998.
6. Гермейер Ю.Б., Моисеев Н.Н. О некоторых задачах теории иерархических систем управления / Сб. Проблемы прикладной математики и механики. 1-е изд. М.: Наука, 1971.
7. Глушков В.М. Макроэкономические модели и принципы построения ОГАС. М.: Статистика, 1975.
8. Довгучиц С.И., Мушков А.Ю., Еreshko Ф.И. Математическое моделирование в решении задач информационно-аналитического обеспечения управления развитием оборонно-промышленного комплекса // Научн. вестн. оборонно-промышленного комплекса России. 2021. № 1. С. 5–15.
9. Петров А.А., Поспелов И.Г., Шананин А.А. Опыт математического моделирования экономики. М.: Энергоатомиздат, 1996.
10. Цвиркун А.Д., Акинфиев В.К. Структура многоуровневых и крупномасштабных систем. Синтез и планирование развития. М.: Наука, 1993.
11. Поспелов И.Г. Системный анализ рыночной экономики. Уч. пос. М.: МФТИ, 2018.
12. Decentralization, Wikipedia article, <https://en.wikipedia.org/wiki/Decentralization>
13. Гермейер Ю.Б. Игры с противоположными интересами. М.: Наука, 1976.
14. Ватель И.А., Еreshko Ф.И. Игры с иерархической структурой // Математическая энциклопедия. М.: Сов. Энциклопедия, 1979. Т. 2. С. 478–482.
15. Ватель И.А., Еreshko Ф.И. Математика конфликта и сотрудничества. М.: Знание, 1973.
16. Ватель И.А., Еreshko Ф.И., Кононенко А.Ф. Игры с фиксированной последовательностью ходов и иерархические системы управления в экономике / Сб. Методы оптимизации и их приложения. Иркутск: СЭИ АН СССР, 1974. С. 86–99.
17. Еreshko Ф.И., Кононенко А.Ф. Решение игры с правом первого хода при неточной информации о цели партнера // Журн. вычисл. матем. и матем. физики. 1973. Т. 13. № 1. С. 217–221.
18. Горелов М.А. Максимальный гарантированный результат при ограниченном объеме передаваемой информации // АиТ. 2011. № 3. С. 124–144.
Gorelov M.A. Maximal Guaranteed Result for Limited Volume of Transmitted information // Autom. Remote Control. 2011. V. 72. No. 3. P. 580–599.
19. Горелов М.А., Еreshko Ф.И. О моделях централизации и децентрализации управления в цифровом обществе. Монография “Контурсы цифровой реальности. Гуманитарно-технологическая революция и выбор будущего”. Под ред. В.В. Иванова, Г.Г. Малинецкого, С.Н. Сиренко. М.: Ленанд, 2018.
20. Горелов М.А., Еreshko Ф.И. Информированность и децентрализация управления // АиТ. 2019. № 6. С. 156–172.
Gorelov M.A., Ereshko F.I. Awareness and Control Decentralization // Autom. Remote Control. 2019. V. 80. No. 6. P. 1109–1122.

21. Шваб Клаус, Маллере Тьерри. COVID-19. Великая перезагрузка. ФОРУМ ИЗДАТЕЛЬСТВО. Вып. 1.0. Всемирный экономический форум (ВЭФ), 2021.
22. Еreshko Ф.И., Турко Н.И., Цвиркун А.Д., Чурсин А.А. Синтез организационных структур в крупномасштабных проектах цифровой экономики // *АиТ*. 2018. № 10. С. 121–142.
Ereshko F.I., Turko N.I., Tsvirkun A.D., Chursin A.A. Design of Organizational Structures in Large-scale Projects of digital Economy // *Autom. Remote Control*. 2018. V. 79. No. 10. P. 1836–1853.
23. Еreshko Ф.И. Модельный взгляд на проблемы управления // Сб. трудов XIII Всеросс. совещания по проблемам управления ВСПУ-2019. ИПУ им. В.А. Трапезникова РАН. 2019. Москва, Россия, 2019. С. 63–69.
<https://doi.org/10.25728/vspu.2019.2074>
24. Еreshko Ф.И., Мушков А.Ю. Математическое моделирование в стратегическом планировании развития ОПК // Тр. XXI Межд. конф. “Информатика: проблемы, методы, технологии” (IPMT-2021). Воронеж, Россия, 2021. С. 9–18.
25. Гасанов И.И. Организация аукционов в сетевых моделях // Управление развитием крупномасштабных систем MLSD’2021. М.: ИПУ РАН, 2021.
26. Клейнер Г.Б. Производственные функции: теория, методы, применение. М.: Финансы и статистика, 1986.
27. Шананин А.А. Двойственность по Янгу и агрегирование балансов // Докл. РАН. Математика, информатика, процессы управления. 2020. Т. 493. С. 81–85.
28. Васильев С.Н., Цвиркун А.Д. Проблемы управления развитием крупномасштабных систем // Тр. Второй Межд. конф. “Управление развитием крупномасштабных систем” (MLSD’2008). М.: ИПУ РАН, 2008. С. 9–18.

Статья представлена к публикации членом редколлегии А.А. Галяевым.

Поступила в редакцию 02.09.2021

После доработки 12.11.2021

Принята к публикации 26.01.2022