

## ТЕОРЕТИКО-ИГРОВЫЕ МОДЕЛИ ЦИФРОВЫХ ПЛАТФОРМ

Ерешко Ф.И., Гасанов И.И., Горелов М.А.

Вычислительный центр им. А.А. Дородницына Федерального исследовательского центра  
«Информатика и управление» РАН, Россия, г. Москва ул. Вавилова д.40  
fereshko@ccas.ru

*Аннотация:* Рассматриваются проблемы управления в связи с активным развитием идей цифровизации общества. Утверждается мнение, что основой принятия решений в экономике станут вычислительные, или цифровые, платформы, отражающие отдельные функциональные отрасли. Рассматривается управление производственными системами, имеющими аддитивный характер. Проводится сравнение централизованного и децентрализованного управления, предлагается парадигма гибридного управления. В рамках теории иерархических игр исследуется вопрос создания и управления коалицией игроков.

Ключевые слова: цифровизация общества, вычислительные платформы, модели, аддитивное производство, информация и управление, теория иерархических игр, технология блокчейн, централизация vs децентрализация, гибридное управление, организация коалиций.

### **Введение. Цифровое общество и экономика. Проблемы управления цифровыми платформами**

В настоящее время общество переживает период активного проникновения информационных технологий во все сферы жизнедеятельности, бурно развивается информационное общество и цифровая экономика (digital economy). Цифровая экономика базируется на цифровых компьютерных технологиях, её продукты находят применение в разнообразных отраслях реального производства товаров и услуг.

Сейчас распространено определение цифровой экономики как *экономики данных*. Однако памятуя определение Н. Вирта, что программирование – это алгоритм и структура данных, имеет смысл говорить о цифровой экономике как об *экономике алгоритмов и данных*. Вслед за этим, мы обращаемся к понятию *математического моделирования*. Ведь современные достижения цивилизации напрямую связаны с использованием понятия модели, что нашло своё отражение во всех разделах естествознания и, более широко, культуры.

Цифровая экономика в широком смысле этого слова – это вся экономика, насыщаемая цифровыми продуктами. В результате широкого распространения электричества и внедрения конвейера, начавшегося в конце XIX и продлившегося до начала XX века, возникло новое массовое производство, и можно было говорить об электрической экономике. Точно так же можно было говорить о нефтяной экономике. Имеет смысл говорить о цифровом этапе развития экономики.

Цифровая экономика в узком смысле слова – это экономика, основанная на цифровых компьютерных технологиях, выпускающая цифровые продукты.

Примеры цифровых продуктов – это продукты умственного и с минимальным количеством физического труда, произведенные с использованием интеллектуальных технологий и вычислительных средств: это числа  $\pi$  и  $e$ , физические и химические константы, алгоритм Евклида, пси-функция Шредингера, эффект ядерной зимы, результаты вычислительных экспериментов, система алгоритмов. В ряду этих продуктов находятся теперь и цифровые валюты.

Цифровые технологии, основанные на аппаратном и программном обеспечении и сетях, не являются новшеством, но с каждым годом уходя все дальше от третьей промышленной революции, становятся все более усовершенствованными и интегрированными, вызывая трансформацию общества и глобальной экономики. (К.Шваб).

Технологической базой Цифровой экономики являются вычислительные комплексы, оснащённые специальным программным обеспечением на основе математических моделей, - это вычислительные платформы.

Многие мыслители предвосхищали наступление новой эпохи, один из ярких футурологов – Э.Тоффлер. Его книга [1], в английском издании «The Third Wave: The Classic Study of Tomorrow», 1980 г. в изложении Н.Н.Моисеева на семинарах оставила свой след в нашем сознании, но имела в то время характер далёкого и абстрактного образа будущего мира. Тем ярче выглядит прочтение этих мыслей сейчас.

Приведём некоторые тезисы книги 1980 года, поместив их в кавычки.

«С наступлением второй индустриальной волны СМИ заняли ключевое место в стандартизации поведения, необходимой для индустриального производства. С 1970-х годов число микро-СМИ увеличилось лавинообразно. Всё это приводит к грандиозному скачку в объемах информации, которой мы все обмениваемся. Главным противоречием современности будет противоборство между защит-

никами отжившей свое индустриальной цивилизации и сторонниками идущего ей на смену информационного общества (1970-2025 гг.)».

Книга-манифест [2] Клауса Шваба, лидера Давоса, провозглашающая основной тренд развития мировой экономики в направлении взрывного характера рождения цифровых технологий, убедительно демонстрирует, что современное состояние общества в значительной степени определяется цифровизацией.

В работе [2] приведена фраза «...Дизруптивные изменения, которые несет четвертая промышленная революция, переопределяют деятельность государственных учреждений и организаций... Новые технологии и социальные группировки и взаимодействия, которые ими обеспечиваются, позволяют практически кому угодно оказывать влияние на ситуацию и при этом такими способами, о которых невозможно было бы подумать еще несколько лет назад...»

Одной из таких технологий является *технология блокчейн* (специальная технология ведения распределённых реестров с использованием криптографических алгоритмов и алгоритмического достижения консенсуса).

Можно предположить, что основой принятия решений в экономике станут вычислительные, или цифровые, платформы, отражающие отдельные функциональные отрасли.

#### 1. Отечественные достижения. Развитие идей

В отечественных работах, которые велись в разных научных школах во многих академических институтах в областях теории управления и поддержки принятия решений были получены значимые результаты в системном анализе, теории оптимизации, исследовании операций, теории игр, моделировании экономических процессов, теории управления [3–15]. В книге [12], в которой были суммированы идеи управления экономическими системами, накопленные к тому времени, был принципиально поставлен вопрос о новом значении информации в жизни общества и описана трехуровневая в территориальном аспекте система ЭВМ, которые, накапливая и обрабатывая информацию, генерировали бы проекты государственных планов и реализовывали бы функции принятия решений. Система получила название Общегосударственной автоматизированной системы управления (ОГАС).

В художественной форме эти идеи сейчас описываются в американской литературе: <https://rg.ru/2016/11/01/v-ssha-vyshla-kniga-o-dostizheniih-sovetskih-kibernetikov.html>, <http://inosmi.ru/science/20161023/238054065.html>.

«Идея Глушкова заключалась в том, чтобы перейти к эпохе электронного социализма. Он назвал свой невероятно амбициозный проект Общегосударственной автоматизированной системой (ОГАС). Она предназначалась для оптимизации и технологической модернизации всей плановой экономики. Он считал, что такая система должна принимать экономические решения в соответствии с государственными планами, а не по рыночным ценам, однако полагал, что ее работа ускорится благодаря компьютерному моделированию, и она сможет прогнозировать равновесие платежного баланса еще до его достижения. Глушков хотел, чтобы решения принимались оперативнее и с умом, и даже задумывался об электронных деньгах. Ему был нужен кошелек Политбюро».

Вот ещё пример – книга «Как НЕ опутать сетью страну: Непростая история советского Интернета». Ее автор, профессор коммуникационных технологий Университета Тусла Бенжамин Петерс довольно подробно рассказал о работе выдающихся советских ученых-кибернетиков Виктора Глушкова и Анатолия Китова, которые занимались разработкой передовых электронно-вычислительных технологий.

Американское сообщество исследователей информационно-коммуникационных технологий встретило книгу Петерса с большим интересом. «Она заполнила пробел в истории интернета, подчеркнув, насколько важны преемственность и открытость для сетевых разработок», – заявил профессор Джонатан Зиттрейн из Гарвардского университета. Автор книги, по мнению Зиттрейна, проделал колоссальную работу, представив широкой публике факты, о которых на Западе даже не догадывались. «К примеру, в книге не раз подчеркивается, что и советские, и американские ученые практически одновременно делали важные шаги на пути развития компьютерных технологий. Причем СССР нередко обгонял США. Так в конце 1969 года в Америке была запущена компьютерная сеть ARPANET (прародитель Интернета). В Советском Союзе идею связать ЭВМ единой сетью впервые озвучил Анатолий Китов еще в 1959 году, предложив создать единую автоматизированную систему управления для вооруженных сил. А первые наработки в гражданской сфере появились в 1962 году, когда Виктор Глушков представил проект Общегосударственной автоматизированной системы учета и обработки информации (ОГАС), которая предназначалась для автоматизированного управления всей экономикой СССР».

Однако этот проект по тем временам был, во-первых, слишком затратным, во-вторых вызвал сильное противодействие системы управления (см. [http://zavtra.ru/blogs/tcifrovaya\\_ekonomika\\_i\\_sovetskaya\\_ekonomika](http://zavtra.ru/blogs/tcifrovaya_ekonomika_i_sovetskaya_ekonomika)), и в результате не получил поддержки.

Но если в СССР это не получилось, то что же сейчас?

Сейчас не нужно тратить деньги на вычислительную сеть, – уже есть Система распределённых ситуационных центров (СРСЦ) [16], и частным образом общество насыщено смартфонами. Успешно развита теория принятия решений и имеется опыт разработки систем управления социально-экономическими системами [17,18].

Проблема в том же самом: существует ли реальный запрос общества и власти в новых технологиях управления? Ответ созреет постепенно, сейчас неясен.

Во всяком случае, происходит постепенное развитие в осознании представителями государства и бизнеса необходимости трансформации управления в сторону цифровизации производственных технологий.

Это означает формализованное описание производственных технологий в модельном виде, и затем использование моделей в системах автоматизированного управления на основе баз данных.

Приведём пример современного развития и разработок платформ [19,20]: Блокчейн платформы, Таблица 1.

Для нашего изложения важно, что все Платформы содержат в себе модели управляемых объектов и управляющих субъектов.

В директиве Д. Трамп по развитию Искусственного интеллекта: <https://www.whitehouse.gov/presidential-actions/executive-order-maintaining-american-leadership-artificial-intelligence/> 11 февраля 2019 указывается, что «В результате нашего долгосрочного акцента на фундаментальные исследования и разработки, Америка была лидером в ИИ (AI) с момента его создания. Американская инициатива ИИ будет опираться на этот успех, используя нашу НИОКР (R & D), экосистему промышленности, научных кругов и правительства и приоритезируя федеральные инвестиции передовых идей, которые могут принести непосредственную пользу американскому народу. Неотъемлемой частью инициативы станут федеральные агентства, разрабатывающие бюджеты НИОКР в области ИИ для поддержки их основных задач. Но для воплощения этих идей в реальность нам нужна инфраструктура. Для ИИ это означает данные, модели и вычислительные ресурсы».

Если ставить проблему использования технологий ИИ в задачах управления, прогнозирования, в финансах, то необходимо иметь модели предметных областей, адаптированные к применению алгоритмов на основе схем ИИ. Именно через разработку моделей мы и можем войти в этот тренд.

Роль моделей становится приоритетной. Практичны ли теории контрактов.

Контракт – это совокупность правил, структурирующих в пространстве и во времени обмен между двумя (и более) экономическими агентами посредством определения обмениваемых прав и взятых обязательств и определения механизма их соблюдения.

Роль моделей в управлении, в принципе, осознаётся на всех уровнях иерархии власти

Контракты представляют собой правила, «обслуживающие» (т.е. координирующие) различные обмены. Наиболее распространенной формой являются рыночные обмены, однако в целом разнообразие видов обменов гораздо шире.

Ответ на этот вопрос и вообще зачем нужны формальные модели, в частности теория игр? дал Нобелевский комитет в пресс-релизе при выдаче премия 2016 года по экономике (по теории контрактов): «В современной экономике содержится неисчислимо число контрактов. Новые теоретические инструменты, созданные авторами (Hart и Holmström), ценны для понимания реальных контрактов и институтов, а также для учёта возможных подводных камней в разработке контрактов. Их анализ оптимальных контрактов закладывает интеллектуальный фундамент для разработки стратегий и институтов во многих областях, от законодательства о банкротстве до политических конституций».

Эти слова идеально подходят к отечественным теориям.

Обратимся к переводу книги Ю.Б. Гермейера [6], сделанному большим знатоком этапов развития теории игр и вообще принятия решений (RAND Corporation) к тому времени (1983-1986), профессором А.Б. Рапопортом.

В Предисловии к переводу книги А.Б. Рапопорт пишет:

«Outside the Soviet Union, analysis of this sort has been largely centred on bargaining processes, where the underlying game structures are, for the most part, rather elementary. In the work of Germeier and his

disciples, the framework in which the process (including much more than bargaining) occurs has been greatly extended and diversified/

A topic of particular interest, one to which Soviet game theorists have devoted considerable attention, is that of so-called hierarchical games, which can be construed as models of a planned economy with varying degrees of centralization or decentralization».

«За пределами Советского Союза анализ такого сорта был в основном сосредоточен на процессах установления цены, где основные структуры игры, по большей части, довольно элементарны. В работе Germeier и его учеников, структура, в которой происходит процесс (включая намного больше, чем торговля), была значительно расширена и разносторонне развита.

Особенно интересной темой, одной из многих, которой советские теоретики игры уделили значительное внимание, является тема так называемых иерархических игр, которые могут быть истолкованы как модели плановой экономики с различными степенями централизации или децентрализации».

Представляется, что эта оценка с одной стороны позитивна, а с другой стороны сыграла отрицательную роль, поскольку сместила акценты мнений западных коллег-экономистов, слишком привязав теорию иерархических игр к образу плановой экономики, имеющей для них негативный характер (кроме, Дж. Стиглица). Что необоснованно, поскольку принцип гарантированного результата не исключает равновесия, это замечательно иллюстрируется на примере теоремы о существовании седловой точки в играх с противоположными интересами.

Таблица 1.

### Сравнение платформ для построения блокчейн-сетей\*



**Описание:** Самый популярный проект в мире для создания публичных блокчейн-приложений. Работает глобальная сеть для создания решений, доступных во всем мире.

**Целевая аудитория:** создание публичных решений с открытыми данными.

**Разработчики:** Ethereum Foundation + большое открытое сообщество

**Особенности:** Самое большое сообщество разработчиков с высокой компетенцией по знанию платформы. Простота платформы. Смарт-контракты являются частью неизменной сети.

**Модель сети:** одноранговая сеть, все участники равны.

**Подключение участников:** любой может стать участником сети

**Риски:** риск получения контроля злоумышленником над всей сетью при достаточной мощи. Отсутствует контроль над списком участников. Обязательный майнинг. Ограничение на максимальную сложность логики смарт-контрактов.

**Проекты:**  
1. Проект правительства Москвы «Активный гражданин»  
2. Проект удаленной идентификации – IDChain (РосЕвроБанк, Microsoft)  
3. Цифровой аккредитив (ВЭБ)  
4. Проект по обмену реквизитами банков (банк «Открытие», банк «Ак Барс», Сбербанк, АФТ, ВТБ)  
5. Факторинг. (М.Видео, Сбербанк)



**Описание:** Закрытая платформа на базе модификации протокола Ethereum, с доработками под законодательство РФ. ГОСТ шифрование.

**Целевая аудитория:** платформа для финансового сектора и коммерческих организаций, соответствует законодательству РФ.

**Разработчики:** Ассоциация ФинТех.

**Особенности:** ГОСТ подпись и шифрование (аттестация в 2018). Готовые и востребованные рынком ФинТех продукты по модели As a Service. Майнинг у ограниченных участников

**Модель сети:** одноранговая сеть с управляемым доступом.

**Подключение участников:** администратором сети.

**Риски:** Возможное отставание по версии, из-за необходимости получения обновлений от проекта Ethereum, в том числе, обновления безопасности. Обязательный майнинг. Ограничение на максимальную сложность логики смарт-контрактов.

**Проекты:**  
1. Проект Электронная Закладная (децентрализованный депозитарный учет закладных) - Сбербанк, АФТ, АИЖК  
2. Проект KYC (Know Your Customer) - Обмен информацией о физических лицах между участниками сети (Банк Открытие, АФТ)  
3. Распределенный реестр цифровых банковских гарантий (ВТБ, АФТ)  
4. Цифровой аккредитив (Альфа-Банк, АФТ)



**Описание:** Открытая платформа от мирового разработчика для организации коммерческих взаимодействий со строго регулируемым списком участников.

**Целевая аудитория:** коммерческий сектор. Ведение доверенных распределенных баз данных.

**Разработчики:** консорциум Hyperledger.

**Особенности:** Возможность настройки нескольких блокчейн - сетей, используя один клиент. Легкое обновление логики смарт-контрактов владельцем смарт-контрактов. Легкое администрирование списка участников сети через выдачу и отзыв сертификатов. Отсутствует майнинг. Гибкая балансировка нагрузки.

**Модель сети:** многоуровневая: пользователи сети, администратор сети (YLC); узлы – валидаторы операций над своей зоной ответственности (конкретные смарт-контракты, операции над конкретными сущностями в БД (акции, облигации, денежные переводы); обслуживающий сервис для снижения нагрузки на простых участников.

**Подключение участников:** через выдачу сертификатов удостоверяющим центром

**Риски:** низкая компетенция специалистов в РФ и малый размер сообщества.

**Проекты:**  
1. Платформа по выпуску облигаций (НРД)  
2. Системы дистанционного банковского обслуживания финансовых институтов (Сбербанк)



**Описание:** Открытый фреймворк, для разработки полноценных приложений с использованием распределенной БД.

**Целевая аудитория:** Для разработки публичных и частных сетей. С доработкой платформы под каждого заказчика.

**Разработчики:** компания BitFury.

**Особенности:** Гибкость в работе с внешними источниками данных. Позволяет создавать как публичные так и частные решения. Контроль участников в сети через голосование. Смарт-контракты реализуются отдельно на каждом узле, в сети регистрируется описание смарт-контракта, условие для успешного выполнения контракта – идентичная реализация у большинства валидаторов. Отсутствует майнинг. Фиксация среза базы данных.

**Модель сети:** многоуровневая: легкий клиент для удаленной работы с базой данных; полный клиент для хранения базы данных; ограниченная группа лиц, именуемые «узлы-валидаторы» для исполнения транзакций, контроля изменений в базе данных и контроля списка участников через голосование.

**Подключение участников:** методом голосования среди привилегированных участников сети.

**Риски:** Риск рассинхронизации версий клиента.

**Проекты:**  
1. Проект ДДУ, взаимодействие Росреестр-Фонд(АИЖК)  
2. Регистрация прав собственности (NAPR, Грузия)  
3. Цифровой контракт (ВЭБ)  
4. Третьейская оговорка – прототип (Сбербанк)



\*На основе открытых источников



**Описание:** Платформа для обмена B2B сообщениями/уведомлениями для технической и юридической фиксации фактов в децентрализованной системе. Юридическая фиксация подкрепляется автоматическим созданием текстового договора и его подписанием юридически значимыми электронными подписями участников.

**Целевая аудитория:** участники финансового сектора, операции по учету активов, проведение финансовых сделок в закрытом канале.

**Разработчики:** консорциум R3: Консультанты: Barclays, Bank of America, HSBC, Citi, Royal bank of Canada и другие.

**Особенности:** Работа в формате утверждения фактов, а не в режиме базы данных. Содержание сообщений открывается только списку участников и, при необходимости, регулятору. При правильной работе формирует связи между связанными объектами. Высокая гибкость. Отсутствует майнинг.

**Модель сети:** многоуровневая: пользователи сети, пользователи, подключаемые для выполнения разовой валидации, оракулы – узлы, ответственные за валидацию информации из внешней среды (курс валюты по ЦБ, мировое время и т.д.), истрайкусы – необходимые участники сети, независимые валидаторы сети; администратор участников сети

**Подключение участников:** через выдачу сертификатов удостоверяющим центром

**Риски:** узконаправленность платформы: финансовый коммерческий сектор

**Проекты:** около 50 проектов  
1. MascoPoLo для оптимизации торгового финансирования  
2. HQLAx – биржа токенизации высоколиквидных активов

## 2 Вариант централизованной системы Компании-интегратора (Центр).

Рассмотрим экономические системы, в которых технологически производство и поставка материалов имеют аддитивный характер, разбивается на стандартные этапы, которые составляют некоторую последовательную цепочку и выполняются разными компаниями-исполнителями.

### 2.1 Особенности материального потока аддитивной деятельности.

Исходный продукт претерпевает трансформацию (передель) вплоть до конечного состояния. Движение продуктов может быть проиллюстрировано следующей схемой. На схеме узлы дерева представляют пункты изготовления и сборки компонентов продукта, стрелки – движение этих ком-

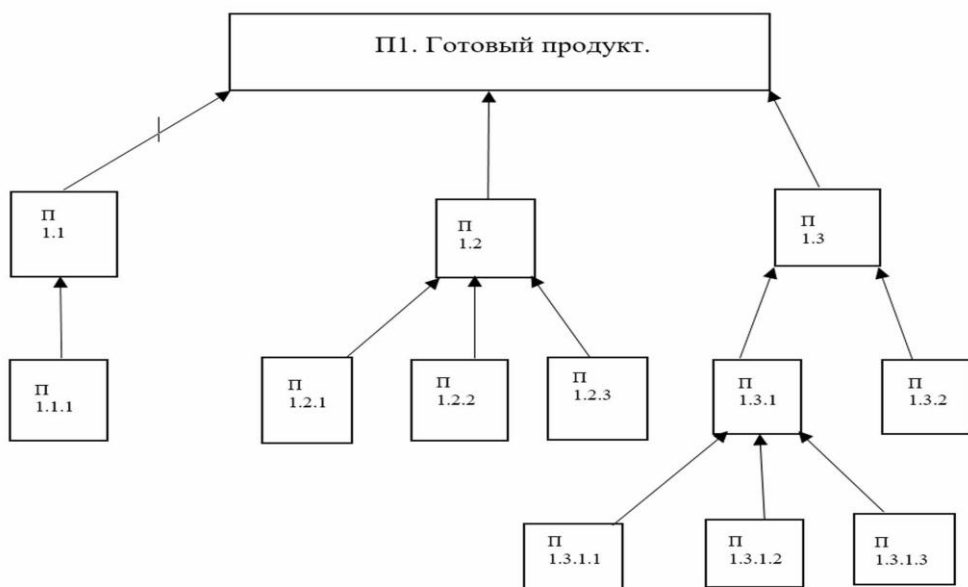
понент по производственной линии. В нумерации узлов числа без последнего – это номер узла на следующем уровне выше, для которого готовится данная компонента, последнее число – номер компоненты для сборки на следующем уровне. В корне дерева окончательная сборка (монтаж) того продукта, изготовление которого обеспечивается логистической операцией. Это могут быть товары для продажи, информационные стенды, рекламные буклеты и т.д.

Часть компонент предварительно могут аккумулироваться и храниться на складах, которые тоже должны быть представлены как узлы дерева.

В простых случаях дерево может состоять из одномерной цепочки. Также простая операция может сводиться к дереву всего двух уровней.

В случае децентрализованной системы в компетенцию схемы управления входит и выбор участников операции, т.е., по сути, формирование производственного дерева. При осуществлении рассматриваемой аддитивной деятельности имеют место три потока: материальный (физический), информационный и финансовый. Все они привязаны к структуре производственного дерева. Организация каждого из них должна быть предметом отдельного рассмотрения.

Децентрализованная схема предполагает создание коалиции независимых участников, связанных между собой определёнными обязательствами и взаимодействующими согласно определённому производственному механизму. Этот механизм будет рассмотрен в дальнейших разделах настоящей работы.



## 2.2 Описание организации централизованной системы

Ниже описывается примерная организация такой системы и необходимые действия для её формирования. Описываемая система представляется открытой коалицией компаний-участников. Участники посредством интернета объединены в единую информационную сеть, используют сервисы системы и пользуются единым протоколом передачи данных. Коалиция открыта в том смысле, что её состав может меняться во времени – какие-то компании могут к ней присоединяться, какие-то отпадать.

Текущая и прошлая информация о заказах и операциях по их исполнению хранится и дублируется (с целью защиты от потери и искажения) на нескольких серверах головной Компании. Информация в оговоренной мере доступна всем участникам коалиции.

Головная компания занимается организацией цепочек операций. Взаиморасчёты контрагентов в цепочке поставок могут вестись через бухгалтерию головной Компании или автономно. Но в любом случае все транзакции прежде, чем быть исполненными, должны визироваться головной Компанией. Существенным моментом в функционировании проектируемой системы является формирование цепочки исполнителей для операции. Здесь возможны разные подходы. Один подход состоит в том, что Компания сама выбирает соисполнителей каждого этапа поставки из числа участников Коалиции. В этом случае возникает достаточно нетривиальная многокритериальная оптимизационная задача по выбору исполнителей так, чтобы минимизировать сроки операции, вложения и общие затраты.

Другой подход состоит в том, что Компания через информационную сеть публикует данные о намечаемой операции: поэтапные объёмы, сроки, номенклатура, и т.п. Члены коалиции в ответ делают заявки на участие в операции, а Компания делает между ними выбор исполнителей. В рамках та-

кого подхода Компания может устраивать аукционы (тендеры) для участников с целью поиска наименее затратных решений. Одна из моделей формирования коалиций излагается ниже.

Следует отметить, что создание системы не отменяет вполне институт инспекторов.

Исходя из изложенного выше, перечислим существенные разделы в организации: программно-аппаратные требования, каждый участник имеет право на ведение всего реестра операций, в той его части, которая оговорена условиями коалиции; технические требования к центральным серверам информационной сети; разработка топологии сети, обеспечивающая оперативную связь между участниками и их связь с центральными серверами; выбор протоколов передачи данных по сети между участниками и серверами; регламентация форм для передачи информации между участниками и на центральные сервера, формы данных о состоянии ресурсов участников; договоры должны быть так регламентированы, чтобы их формальная корректность могла проверяться программно; договоры между участниками могут помимо публичной иметь скрытую, конфиденциальную часть, требуется выбрать технологию шифрования таких данных; . следует определиться, обязаны участники или нет передавать на центральные серверы конфиденциальные данные, хотя бы и в зашифрованном виде. Это может быть необходимо для разрешения возможных споров между исполнителями; Следует определиться, какая часть единого реестра доступна участникам. Это может быть весь реестр в его публичной части или только договора всех участников, но не их ресурсы, или только история договоров участника, делающего запрос и т.п.; общий объём данных может оказаться весьма обширным, следует выбрать эффективные методы индексирования данных и, возможно, их хеширования для быстрого поиска в общем реестре операций; разработка подходов к решению задачи по выбору исполнителей цепи поставки либо разработка регламента для аукционов; определение способов индексирования исполнения работ.

### 2.3 Замечание о рисках

Для разработки механизмов предотвращения сбоев и ликвидации их последствий в случае их возникновения потребуются дополнительные исследования. Представляется маловероятным разрешение проблем нестыковок и сбоев без участия Центра.

Возможны отклонения о заданной программы, несогласованность утверждений участников о полном исполнении своей части договора и другие реализации неопределённых факторов. Данные обстоятельства ограничивают пределы децентрализованных решений.

## 3 Вариант модели децентрализованного управления системы

### 3.1 Описание имитации

Опишем в общих чертах проект *имитационной модели* сообщество производителей, их коалицию. Производители объединяются для некоторой деятельности, некоторого производства. Это могут быть производители очень разных изделий. Важно, что их совместная деятельность необходима для создания конечного продукта. Целью объединения является создание рынка заказов на изделия выбранного ассортимента и условий для их эффективного изготовления. При этом участники остаются независимыми производителями и вольны выполнять как заказы, пришедшие от коалиции, так и любые другие, согласно их возможностям и ресурсам.

Предполагается, что число участников достаточно велико. Так, что при выполнении заказа есть возможность выбора между исполнителями.

Далее, как и выше, сосредоточимся на рассмотрении одного абстрактного заказа на производство некоторой партии одинаковых изделий. Изделие проходит несколько стадий сборки и затем выставляется на продажу либо обозрение. Каждая стадия – это сборка элементов, деталей, которые следует рассматривать как отдельные, но промежуточные, изделия. Они тоже изготавливаются участниками коалиции, соответствующей специализации. Не обязательно только участниками – часть поставок может приходиться со стороны. Разбитое таким образом на этапы производство будем называть *технологическим деревом*. Формально оно может быть представлено двунаправленным *математическим деревом* (каждая дуга имеет два направления – на уровень ниже и на уровень выше). В узлах (вершинах) дерева производится сборка продукции (в широком смысле: сборка промежуточных изделий, сопутствующих материалов, деталей), дуги вниз к поставщикам комплектующих для сборки, дуги вверх к получателям – сборщикам следующего уровня. В корне дерева заказанное изделие, в конечных (терминальных) узлах дерева производители, участники коалиции, которые получают необходимое снабжение только извне коалиции, самостоятельно. Когда для всех узлов технологического дерева выбраны исполнители заказа и проект сформирован, то такое дерево будем называть *производственным*. Участники коалиции не обязательно привязаны к одному определённому уровню технологического дерева. Какие-то строго специализированы, какие-то более универсальны.

В методических соображениях опишем вначале координирующее централизованное управление подобно тому, как сформулировано выше. Пусть имеется некоторый выделенный координатор производства – Центр. Все участники коалиции в режиме реального времени предоставляют Центру информацию о текущих возможностях и сроках производства изделий из своего ассортимента при условии достаточного снабжения материалами следующего уровня, т.е. необходимыми деталями. А также, о добавляемой ими стоимости в производство продукции. Кроме того, Центр использует граф транспортной сети между участниками, с указанными стоимостями перевозок от участника к участнику или на промежуточные склады. При этом транспортные компании и склады также могут выступать как самостоятельные участники коалиции.

Когда в Центр поступает очередной заказ на производство партии каких-то профильных изделий, перед Центром возникает задача это производство организовать. Он, ориентируясь на ресурсы участников, цены производства, складирования и перевозок, должен выбрать конкретных производителей во все узлы производственного дерева. Если пытаться оптимизировать этот выбор по срокам и стоимостям, то возникает очень нетривиальная задача, вряд ли имеющая строгое решение. И для автоматизации процесса можно изобретать всякие эвристики.

Другой подход к управлению производством в коалиции кажется более привлекательным и выглядит перспективным. Он содержит существенные признаки *децентрализации и даже блокчейна* в конструировании производственного дерева и отслеживании производственного процесса. Однако он не является полностью децентрализованным. Полностью отказываться от координации процессов Центром вряд ли целесообразно. Можно назвать его гибридным.

### 3.2 Гибридная организация

При гибридной организации производства все участники автономны в своих производственных возможностях и связаны компьютерной сетью. Каждый участник имеет свой идентификатор сети и связан каналами связи с некоторым множеством других участников. Это сходно с системами блокчейна. Сама сеть может формироваться не стихийно, а Центром. Имеется в виду, что Центр может назначать участникам соседей по графу сети. Всё организовано так, что всякая новая информация гарантировано и оперативно доставляется всем членам коалиции.

При такой организации производства формирование производственного дерева происходит в несколько этапов. Центр принимает заказ от очередного Заказчика на изготовление партии изделий и публикует этот заказ в сети. Чтобы заказ был выполнен, должны прийти предложения от участников на его выполнение. На первом шаге этого первого этапа должны найтись участники коалиции, желающие сделать окончательную сборку изделия, иначе, исполнители сборки первого уровня или сборки в корневой вершине дерева. (Это может быть именно сборка из деталей, а может быть монтаж стендов и т.п.). Как правило, они не могут выполнить работу автономно – нужны комплектующие. Желающие принять участие в проекте участники первого уровня посылают запрос в сеть на поставку в нужном объёме этих комплектующих. Запрос приходит ко всем участникам, в частности, к тем, кто способен обеспечить необходимые поставки. В рамках данного заказа, это будут участники 2-го уровня. Они формируют свой запрос на нужные им комплектующие и т.д. рекурсивно. По сети проходит, как бы, *нисходящая волна* вплоть до участников, претендующих на выполнение работ в терминальных узлах технологического дерева, т.е. участников, не зависящих от поставок из коалиции.

После того, как волна доходит до терминальных узлов технологического дерева, начинается обратное движение *восходящей волны*. Участники, претендующие на участие на предпоследнем уровне технологического дерева, получают предложение с последнего уровня. Эти предложения содержат сроки и цены поставок с учётом транспортных и складских расходов. После этого участники предпоследнего уровня могут сделать выбор между поставщиками, рассчитать сроки для выполнения своей части работы и стоимость их продукта. Эти данные также поступают в сеть. Дальше рекурсивно то же происходит на уровне выше и т.д. Когда восходящая волна доходит до корня дерева, Центру остаётся только выбрать между предложениями участников 1-го уровня. Таким образом, проект оказывается, по существу, сформированным. Дальше Центр запускает ещё одну нисходящую волну, подтверждая свой выбор производителя первого уровня. Выбранные для проекта участники на каждом из уровней транслируют свой выбор ниже, и проект может начать исполняться.

Такую систему выбора исполнителей проекта можно рассматривать как систему *множественных аукционов*. Каждый исполнитель выбирает поставщиков, руководствуясь какими-то своими соображениями. В принципе, правила выбора могут быть регламентированы, а сама процедура выбора прозрачной для членов коалиции.

Необходимо использоваться и другие особенности блокчейна: шифрование, защита данных от фальсификации и т.п. Всё в той мере, в какой это реально требуется для эффективной работы коалиции, а требуется, наверное, не всё.

Финансовые и другие производственные отношения между производителями смежных узлов дерева могут строиться автономно. Но роль Центра по-прежнему велика. Вот примерный список функции, которые не сводятся к переговорам с заказчиками.

*Организация и поддержание компьютерной информационной сети, связывающей участников коалиции.*

*Мониторинг исполнения заказов.* Предупреждение сбоев в исполнении заказов. Технологическое вмешательство в производственный процесс для развязки нештатных ситуаций. Это может быть оперативная замена поставщика, использование резервов поставляемых материалов. А значит, эти резервы должны быть Центром разумно организованы, храниться на складах так, чтобы могли быть вовремя задействованы, но и так, чтобы минимизировать затраты на хранение.

*Разрешение хозяйственных споров между участниками.* Разрешение финансовых споров с Заказчиком в случае невозможности надлежащего исполнения заказа. и Разрешение производственных и финансовых рискованных ситуаций должен принять на себя Центр. Могут быть использованы какие-то разумные механизмы солидарной ответственности. И Центр будет распределять эту ответственность между участниками.

### 3.3 Описание модели

Приведём описание формальной модели, в которой имитируется выбор соисполнителей для поступающих в коалицию заказов, т.е. формирование производственных деревьев.

Зададим ассортимент конечных изделий, производимых внутри коалиции согласно внешним заказам. Назовём такие изделия корневыми и обозначим  $A_n$ ,  $n = 1, 2, \dots, N^1$ .

Зададим ассортимент всех изделий (материалов), которые производятся членами коалиции и используются в производстве корневых изделий (включая и сами корневые изделия). Обозначим их  $B_k$ ,  $k = 1, 2, \dots, K$ .

Каждому корневому изделию  $A_n$  сопоставляем каркас технологического дерева его производства. С точки зрения, программирования, это некоторая ссылочная структура, которая представляет абстрактное математическое дерево. В корне такого дерева заказанный продукт, остальные узлы – это производство промежуточных изделий. Вниз от узла ведут дуги к производству изделий-комплектующих к данному узлу. Вверх идёт дуга к тому изделию, для которого данный узел готовит комплектующую деталь. Каркас дерева содержит только его структуру с номерами узлов. Путь по дереву до некоторого узла может быть записан как некоторый ансамбль номеров. К примеру, ансамбль (3,2,4) это путь от корневого продукта  $A_3$  к его 2-й комплектующей и дальше к 4-й комплектующей для изделия, обозначенного порядковым номером 2.

Далее каркас наполняется изделиями из ассортимента  $B_k$ . Для каждого узла указывается вид изделий (материалов) из множества  $B_k$  и их количество (объём, масса), требуемые для производства изделия, расположенного уровнем выше.

Задаётся множество производителей, составляющих коалицию. Обозначим их  $D_m$ ,  $m = 1, 2, \dots, M$ .

Каждый участник характеризуется ассортиментом изделий из множества  $\{B_k\}$ , которые он может производить при наличии заказов и поставок комплектующих. У каждого участника фиксированы его производственные мощности. Это некоторые линейные ограничения по каждому изделию в отдельности и по всем вместе. Кроме того, при функционировании модели в динамике рассчитываются текущие возможности участников, как разности между общей мощностью и уже задействованными ресурсами. В компьютерной реализации каждому участнику сопоставлен свой программный объект, который, по существу, представляет собой некоторую несложную линейную модель.

В общей модели также задан граф транспортной сети, связывающей участников, с указанными в нём параметрами сроков и стоимости доставки изделий от производителя к производителю. Транспортировку изделий можно рассмотреть как функцию некоторых специализированных членов коалиции – транспортных компаний, но можно не усложнять и ограничиться указанным графом – и так всего много. Естественно, чтобы модель функционировала нужны задать достаточные мощности по производству каждого изделия из ассортимента  $B_k$ .



В модель целесообразно включить склады. Хранение изделий впрок может быть эффективным инструментом для обеспечения надёжности выполнения заказов. В то же время, это большая отдельная тема. Управление складской деятельностью, её оптимизация в смысле объёмов хранилищ и стоимости хранения – неисчерпаемое поле для исследований и математических спекуляций.

Формирование производственного дерева для выполнения нового заказа в модели происходит так же, как описано в начале этого текста. В модель вводятся заказы от виртуального заказчика на производство корневых изделий  $A_n$ . Заказы, их частота и объёмы моделируются некоторым случайным процессом – это не сложно.

При поступлении нового заказа на корневое изделие  $A_n$  информация о нём становится доступна всем членам коалиции. Те производители, которые занимаются конечной стадией изготовления продукта  $A_n$ , оценивают свои текущие производственные возможности и делают запрос по сети на поставку комплектующих. И так волна пойдёт. Понятно, что при машинной реализации этого процесса компьютер последовательно обрабатывает каждый программный объект отдельно и выделяет те объекты, чьи ресурсы достаточны для выполнения заказа. Каждому узлу технологического дерева ставится в соответствие множество потенциальных исполнителей.

Таким образом, в конечном итоге формируется всё производственное дерево со сроками и ценами.

#### 4 Теоретико-игровая модель с аукционами при гибридном управлении

Рассмотрим процедуры управления Центром процессом образования коалиций при возможных механизмах аукционов, как это было описано выше. Можно сказать при переменной организационной структуре. Покажем, как в данном случае задача со многими подсистемами сводится к игре двух лиц [21-25].

Пусть имеется выделенный игрок (Центр). Он выбирает управления  $u \in U$ . Его интересы описываются стремлением к максимизации значения функции  $g : U \times X \rightarrow \square$ , где  $X$  – множество результатов деятельности нескольких агентов. Пусть число агентов равно  $m$ .

Центр обладает правом первого хода, т.е. он первым выбирает свою стратегию  $u$  и доводит информацию об этом выборе до партнеров. Зная этот выбор, агенты могут образовать несколько коалиций. Будем параметризовать возможные варианты образовавшихся коалиций элементами  $\alpha \in A$ . Поскольку число возможных разбиений конечного множества агентов на подмножества конечно, можно считать, что множество  $A$  конечно.

Пусть параметру  $\alpha$  отвечает образование коалиций  $K^1(\alpha), \dots, K^{n(\alpha)}(\alpha)$  в количестве  $n(\alpha)$ . Каждая коалиция  $K^i(\alpha)$  характеризуется множеством управлений  $V^i(\alpha)$  и функцией выигрыша  $h_\alpha^i : U \times V^1(\alpha) \times \dots \times V^{n(\alpha)}(\alpha) \rightarrow \square$  ( $i=1, \dots, n(\alpha)$ ). Процесс формирования множеств управлений и функций выигрыша коалиций весьма сложен и остается за пределами модели.

Если управления  $(v^1, \dots, v^{n(\alpha)}) \in V^1(\alpha) \times \dots \times V^{n(\alpha)}(\alpha)$  выбраны, то результат  $x$  деятельности агента определяется значением  $f_\alpha(v^1, \dots, v^{n(\alpha)})$  функции  $f_\alpha : V^1(\alpha) \times \dots \times V^{n(\alpha)}(\alpha) \rightarrow X$ .

Предполагается, что Центру в момент принятия решений не известна реализовавшаяся коалиционная структура  $\alpha$ , но ему известны параметрические семейства функций  $h_\alpha^i, f_\alpha$  и множеств  $V(\alpha)$ . Каждой коалиции, разумеется, известны ее интересы и возможности. Будем предполагать, что ей известны также интересы и возможности всех других образовавшихся коалиций, т.е. известен параметр  $\alpha$ .

Будем считать выполненными следующие стандартные предположения. Множества  $U, X$  и  $V^i(\alpha)$  будем считать наделенными топологиями и компактными. Функции  $g, f_\alpha$  и  $h_\alpha^i$  будем предполагать непрерывными.

Для замыкания модели нужно фиксировать принцип оптимальности. Имеется один достаточно хорошо интерпретируемый случай, когда сделанных предположений достаточно для того, чтобы описать поведение коалиций.

Предположим, что функции выигрыша коалиций представимы в виде  $h_\alpha^i(u, v^1, \dots, v^{n(\alpha)}) = \varphi_\alpha^i(u, v^i)$ , т.е. выигрыш коалиции зависит от выбора Центра и ее собственного выбора, но не зависит от выборов других коалиций. В этом случае можно считать, что при известном ей выборе стратегии  $u$  коалиция  $K^i(\alpha)$  выберет управление из множества

$$BR^i(u, \alpha) = \left\{ v^i \in V^i(\alpha) : \varphi_\alpha^i(u, v^i) = \max_{w^i \in V^i(\alpha)} \varphi_\alpha^i(u, w^i) \right\}.$$

Это множество Центр может оценить на основании имеющейся у него информации. Других оснований для сокращения неопределенности у Центра нет.

Методология рекомендует в таком случае использование гарантирующего подхода. Если принять гипотезу, что Центр осторожен по отношению к имеющейся неопределенности, то его максимальный гарантированный результат определяется условием

$$R = \sup_{u \in U} \min_{\alpha \in A} \min_{v^1 \in BR^1(u, \alpha)} \dots \min_{v^{n(\alpha)} \in BR^{n(\alpha)}(u, \alpha)} g(u, f_\alpha(v^1, \dots, v^{n(\alpha)})).$$

Задача вычисления этого результата может быть сведена к исследованию игры двух лиц.

Положим  $V(\alpha) = V^1(\alpha) \times \dots \times V^{n(\alpha)}(\alpha)$ ,  $h_\alpha(u, v) = \varphi_\alpha^1(u, v^1) + \dots + \varphi_\alpha^{n(\alpha)}(u, v^{n(\alpha)})$  и

$$BR(u, \alpha) = \left\{ v^i \in V(\alpha) : h_\alpha(u, v) = \max_{w \in V(\alpha)} h_\alpha(u, w) \right\}.$$

Непосредственно проверяется, что тогда  $BR(u, \alpha) = BR^1(u, \alpha) \times \dots \times BR^{n(\alpha)}(u, \alpha)$  и, следовательно,

$$R = \sup_{u \in U} \min_{\alpha \in A} \min_{v_\alpha \in BR(u, \alpha)} g(u, f_\alpha(v_\alpha)).$$

Этот нехитрый технический прием работает и в том случае, когда множество  $U$  наделено какой-то дополнительной структурой, например, структурой функционального пространства (в этом случае придется уточнить определение множеств  $BR^i(u, \alpha)$ , но существенных трудностей это не добавляет). Поэтому для исследования рассматриваемой нами проблемы могут быть непосредственно применены, например, все результаты, полученные при исследовании игры  $\Gamma_2$  с неопределенными факторами.

В общем случае возникает значительный произвол в описании взаимодействия игроков нижнего уровня. Для примера рассмотрим следующую популярную гипотезу.

Будем считать, что при известных  $u$  и  $\alpha$  игроки нижнего уровня выбирают одну из ситуаций равновесия по Нэшу. Центру известен такой принцип поведения партнеров, а в остальном он осторожен.

Поскольку множество ситуаций равновесия по Нэшу может оказаться пустым, эта гипотеза требует уточнения. Поступим следующим образом. Примем такое предположение: известных  $u$  и  $\alpha$  игроки нижнего уровня определяют наименьшее  $\varepsilon$ , при котором множество ситуаций  $\varepsilon$ -равновесия по Нэшу не пусто и выбирают одну из ситуаций  $\varepsilon$ -равновесия при этом значении  $\varepsilon$ .

Разумеется, может возникать вопрос об адекватности принятых гипотез. Но его бессмысленно обсуждать, пока не фиксирован моделируемый объект: в одних случаях гипотезы могут оказаться адекватными, в других – нет. Поэтому обратимся к математическому исследованию описанной модели.

Можно формализовать сделанные предположения в традиционных терминах.

Введем обозначение. Если  $v \in V(\alpha) = V^1(\alpha) \times \dots \times V^{n(\alpha)}(\alpha)$ , то символом  $(v \parallel w^i)$  будем обозначать такой набор  $\varpi = (\varpi^1, \dots, \varpi^{n(\alpha)})$ , что

$$\varpi^j = \begin{cases} v^j, & \text{если } j \neq i, \\ w^j, & \text{при } j = i. \end{cases}$$

**Определение.** Число  $\gamma$  называется гарантированным результатом Центра, если существует стратегия  $u \in U$  и для любого  $\alpha \in A$  существует число  $\lambda$ , для которых выполняются следующие условия:

1) существует такая ситуация  $w \in V(\alpha)$ , что для любого  $i = 1, \dots, n(\alpha)$  и любой стратегии  $\omega^i \in V^i(\alpha)$  выполняется неравенство  $h_\alpha^i(u, w) - h_\alpha^i(u, (w \parallel \omega^i)) \geq \lambda$ ;

2) для любой ситуации  $v \in V(\alpha)$  справедливо одно из условий: либо  $g(u, f_\alpha(v)) \geq \gamma$ , либо найдется  $i = 1, \dots, n(\alpha)$  и стратегия  $\varpi^i \in V^i(\alpha)$  для которых  $h_\alpha^i(u, v) - h_\alpha^i(u, (v \parallel \varpi^i)) < \lambda$ .

Точная верхняя грань  $R$  гарантированных результатов Центра называется его максимальным гарантированным результатом.

**Замечание.** В данном случае вместо величины  $\varepsilon$  использована величина  $\lambda = -\varepsilon$ . Это сделано для того, чтобы определение выглядело привычнее.

Задача вычисления так определенного максимального гарантированного результата  $R$  также может быть сведена к исследованию игры двух лиц.

Для этого положим  $V(\alpha) = V^1(\alpha) \times \dots \times V^{n(\alpha)}(\alpha)$ . Определим функцию  $h_\alpha$  условием

$$h_{\alpha}(u, v) = \min_{i=1, \dots, n(\alpha)} \min_{w^i \in V^i(\alpha)} \left[ h_{\alpha}^i(u, v) - h_{\alpha}^i(u, (v \| w^i)) \right].$$

Положим

$$BR(u, \alpha) = \left\{ v^i \in V(\alpha) : h_{\alpha}(u, v) = \max_{w \in V(\alpha)} h_{\alpha}(u, w) \right\}.$$

Тогда

$$R = \sup_{u \in U} \min_{\alpha \in A} \min_{v_{\alpha} \in BR(u, \alpha)} g(u, f_{\alpha}(v_{\alpha})).$$

Опять же с минимальными уточнениями все сказанное переносится на случай игр с обратной связью.

Таким образом, новых математических трудностей при исследовании новой постановки задачи не возникает. Основные проблемы появляются на этапе построения конкретной модели.

## Литература

1. Тоффлер Э. Третья волна = The Third Wave, 1980. – М.: АСТ, 2010. – 784 с.
- Шваб К. Четвертая промышленная революция/ Пер. с англ. Предисловие Греф Г.О. – М.: «Эксмо», 2016 – с.138.
2. Канторович Л. В., Макаров В. Л. Оптимальные модели перспективного планирования, Применение математики в экономических исследованиях, М. Мысль, 1965.
3. Мусеев Н.Н. Математические задачи системного анализа: – М.: Наука, 1981. – 487 с.
4. Гермейер Ю.Б. Игры с непротивоположными интересами. М.: Наука, 1976. – 328 с. английский перевод: Germeier, Yu. B. Nonantagonistic games / Translated from the Russian and with a preface by Anatol Rapoport. — Dordrecht: D. Reidel Publishing Co., 1986. — xiv+331 с. — (Theory and Decision Library, 46). — ISBN 90-277-2023-1
5. Гермейер Ю.Б. Введение в теорию исследования операций. – М.: Наука, 1971.–383 с.
6. Поспелов И.Г. Исследование операций и моделирование экономического развития // Материалы учредительной конференции Российского научного общества исследования операций. – М.: ВЦ РАН, 1997. – 105 с.
7. Ватель И.А., Ерешко Ф.И. Математика конфликта и сотрудничества. М.: Знание, 1973. – 64 с.
8. Ватель И.А., Ерешко Ф.И. Игры с иерархической структурой. // Математическая энциклопедия. т.2. М.: 1979. с.478–482.
9. Гермейер Ю.Б., Мусеев Н.Н. О некоторых задачах теории иерархических систем // Проблемы прикладной математики и механики. М.: Наука, 1971. С. 30–43.
10. Мусеев Н.Н. Информационная теория иерархических систем // Труды I Всесоюзн. конф. по исследованию операций. Минск: 1974. с. 95-99.
11. Глушков В.М. Макроэкономические модели и принципы построения ОГАС. М.: Статистика, 1975. – 160 с.
12. Бурков В.Н. Основы математической теории активных систем. М.: Наука, 1977. – 255 с.
13. Новиков Д.А. Теория управления организационными системами: Учебное пособие. М.: МПСИ, 2005. – 584 с.
13. Бурков В.Н., Ириков В.А. Модели и методы управления организационными системами. М.: Наука, 1994. – 272 с.
14. Зацаринный А.А., Шабанов А.П. Технология информационной поддержки деятельности организационных систем на основе ситуационных центров – М.: ТОРУС ПРЕСС, 2015. – 232 с.: ил.
15. Ерешко Ф.И., Турко Н.И., Цвиркун А.Д., Чурсин А.А., Синтез организационных структур в крупномасштабных проектах цифровой экономики. Автоматика и Телемеханика, № 10, 2018. С.121-142.
16. Ерешко Ф. И. Теория иерархических игр в приложении к законотворчеству в цифровом обществе. Бизнес в законе. // Computational nanotechnology, 2017, №2, С. 52–58.
17. Antonopoulos, Andreas M. (2014). Mastering Bitcoin. UNLOCKING DIGITAL CRYPTOCURRENCIES, O'Reilly Media, Inc., – 272 p.
18. Narayanan A., Bonneau J., Felten E., Miller A., Goldfeder S.. Bitcoin and cryptocurrency technologies : a comprehensive introduction. Princeton : Princeton University Press, 2016. – 331 p.  
<https://en.wikipedia.org/wiki/Decentralization>
19. Горелов М.А. Максимальный гарантированный результат при ограниченном объеме передаваемой информации // Автоматика и телемеханика. – 2011. – №3. – С. 124–144.
20. M.A. Gorelov and F.I. Ereshko, “Awareness and Control Decentralization,” Automation and Remote Control, 2019, vol. 80, issue. 6, pp. 1063–1076.
21. M.A. Gorelov and F.I. Ereshko, “Awareness and Control Decentralization (stochastic case),” Automation and Remote Control (to be printed).