

Применение технологии цифрового двойника в коммерческих сетях

Application of digital twin technology in commercial networks

doi 10.26310/2071-3010.2023.292.2.004



Л. Н. Борисogleбская,
д. э. н., профессор, проректор по научной
и проектно-инновационной деятельности,
Орловский государственный университет им.
И. С. Тургенева
✉ boris-gleb@rambler.ru

L. N. Borisoglebskaya,
doctor of economic sciences, professor,
acting vice-rector for scientific and project-
innovative activity, Oryol state university
named after I. S. Turgenev



С. М. Сергеев,
к. т. н., доцент, доцент Высшей школы
производственного менеджмента, Санкт-
Петербургский политехнический университет
Петра Великого
✉ sergeev2@yandex.ru

S. M Sergeev,
Ph.D., associate professor Peter the Great
St.Petersburg Polytechnic University Institute
of Industrial Management, Economy and Trade



И. Н. Бурилич,
к. т. н., доцент, Курский государственный
университет
✉ burili4@yandex.ru

I. N. Burilich,
candidate of technical sciences, assistant
professor Department of algebra, geometry and
theory of teaching mathematics of the Kursk
state University



Г. С. Толстова,
к. физ.-мат. н, доцент, Курский государственный
университет
✉ tolstova_gs@list.ru

G. S. Tolstova,
candidate of physical and mathematical
sciences, assistant professor Department of
algebra, geometry and theory of teaching
mathematics of the Kursk state University

Конкурентное преимущество субъектов цифровой коммерции основано на анализе рынка в режиме реального времени и прогнозном моделировании с использованием математических алгоритмов и базовых показателей, таких как спрос, предложение, затраты и риски. Концепция цифровизации основана на доминировании цифровых экосистем и на широком внедрении систем искусственного интеллекта, в основе которых лежат компьютерные программы, реализующие такие алгоритмы. Серьезная конкуренция в сфере торговли привела к процессу консолидации бизнеса в торговую сеть. Кроме того, растет ответственность менеджеров за качество принимаемых управленческих решений. С точки зрения экономиста, цифровой двойник не имеет смысла без математической модели. При обычной оцифровке обработки данных эффект оцифровки ограничивается обычной запаздывающей отчетностью. Только математически обоснованный результат с применением теории оптимальных решений позволит руководству достичь наибольших выгод на основе набора экономических критериев. Это связано с тем, что переход к системе опережающих экономических показателей возможен только за счет использования научно обоснованных прогностических математических моделей. Полученные результаты могут быть заложены в алгоритмическую основу цифровых платформ экосистемы торговой сети. В представленной работе рассмотрено несколько вариантов планирования коммерческой деятельности и получены алгоритмы, удобные для реализации на серверах для управления деятельностью торговой сети. Целью исследования является разработка математической модели, ориентированной на ее использование при управлении деятельностью торговой сети в сочетании с информационным киберпространством. В ходе исследования были использованы методы стохастического моделирования и динамического программирования, а также математические методы оптимизации. В качестве критериев эффективности были выбраны экономические показатели.

The competitive advantage of digital commerce entities is based on real-time market analysis and predictive modeling using mathematical algorithms and basic indicators such as demand, supply, costs and risks. The concept of digitalization is based on the dominance of digital ecosystems and on the widespread introduction of artificial intelligence systems based on computer programs that implement such algorithms. Serious competition in the field of trade has led to the process of consolidating the business into a retail network. In addition, managers' responsibility for the quality of management decisions is growing. From an economist's point of view, a digital double doesn't make sense without a mathematical model. With the usual digitization of data processing, the digitization effect is limited to the usual delayed reporting. Only a mathematically sound result using the theory of optimal solutions will allow management to achieve the greatest benefits based on a set of economic criteria. This is due to the fact that the transition to a system of leading economic indicators is possible only through the use of scientifically based predictive mathematical models. The results obtained can be incorporated into the algorithmic basis of the digital platforms of the trading network ecosystem. In the presented work, several options for planning commercial activities are considered and algorithms are obtained that are convenient for implementation on servers for managing the activities of a retail network. The aim of the research is to develop a mathematical model focused on its use in managing the activities of a retail network in combination with information cyberspace. In the course of the study, stochastic modeling and dynamic programming methods were used, as well as mathematical optimization methods. Economic indicators were selected as the performance criteria.

Ключевые слова: цифровой двойник; интеллектуальные цепочки поставок; цифровая логистика; управление торговой сетью; алгоритмизация
Keywords: digital twin; intelligent supply chains; digital logistics; retail network management; algorithmization

Введение

Глобализация экономической деятельности сегодня определяет не только структуру бизнеса в сфере торговли. Принципы сетевой организации господствуют над общими услугами, производством и направлениями, связанными с организацией ло-

гистики, курьерскими службами, здравоохранением, отдыхом, а также такими направлениями, как подразделения G4S, обеспечивающие безопасность во всем мире. Поскольку деятельность сетевого бизнеса осуществляется из единого центра управления (головного офиса), топ-менеджеры сталкиваются с рядом проблем:

- неравномерный потребительский ландшафт, окружающий каждое подразделение сети;
- разная доходность инвестиций для предприятий торговой сети;
- частая смена предлагаемых потребителям товаров, составляющих ассортиментную матрицу;
- фактор рыночной неопределенности, вызванный потребительскими предпочтениями и деятельностью конкурентов в данном секторе бизнеса.

Существуют и другие факторы, которые связаны с конкретными регионами деятельности, а также со скоростью проникновения цифровых технологий в различные отрасли экономической деятельности. Проблема цифрового двойника рассматривалась различными исследователями [1]. В современном мире увеличивается поток цифровых технологий, таких как большие данные, искусственный интеллект, Интернет вещей (IoT), робототехника и социальные сети, которые используются для преобразования бизнес-операций за счет упрощения таких задач как совместная работа, привлечение и использование информации и знаний [5].

Особенность цифрового двойника можно определить как его связь с физическим двойником, что отличает цифрового двойника от любой другой цифровой модели. Основываясь на данных физического актива или системы, цифровой двойник раскрывает ценность, главным образом, поддерживая улучшенное принятие решений, что создает возможность для положительной обратной связи с физическим двойником. Согласно принципам Gemini [3] цифровой двойник можно рассматривать как модель актива или модель системы:

- Цифровой двойник 1: динамическая модель актива с вводом текущих данных о производительности от физического двойника через потоки данных в реальном времени от датчиков; обратная связь в физического двойника посредством управления в режиме реального времени (применительно к этому вопросу используется термин «умный актив», относящийся к проведению мероприятий по управлению активами с высокой производительностью).
- Цифровой двойник 2: статическая модель стратегического планирования системы с вводом долгосрочных данных о состоянии от физического двойника через корпоративные системы; обратная связь с физическим близнецом через процесс капиталовложений.

Постановка задачи

Предмет исследования данной статьи — методология формирования торговой сети, поэтому второе определение относится к теме исследования. Цель исследования состоит в усовершенствовании разрабатываемой математической модели, ориентированной на ее использование при управлении деятельностью торговой сети во взаимодействии с информационным киберпространством.

В связи с тем, что современный бизнес отличается высокой динамичностью, необходима стабильная обратная связь от каждого из предприятий торговой

сети и, самое главное, возможность принятия оптимальных решений в кратчайшие сроки. Именно сама возможность цифрового взаимодействия позволяет в режиме реального времени получать информацию о движении товаров, объеме спроса, финансовых показателях с использованием единой компьютерной базы данных. Эти данные доступны с POS-терминалов, работающих в автономном режиме с физически присутствующими потребителями, а также из статистики онлайн-взаимодействий. Аналогичным образом, с введением концепции цифровых транспортных коридоров и соответствующей машиночитаемой маркировки информация о местонахождении товаров и грузов также представляется в режиме реального времени. Это позволяет перейти к предиктивной аналитике и предиктивному планированию управления JIT (точно в срок) в рамках модели управления бесперебойными цепочками поставок. Все эти данные включены в массив информации, предлагающей обратную связь.

В рамках данной задачи смысл цифрового двойника заключается в следующем: это программная реализация алгоритма обработки набора данных, поступающих в онлайн режиме и в каждый момент времени отражающая реальное состояние коммерческой деятельности. Результатом работы алгоритма является прогнозное моделирование динамики развития торговой процесса. После решения оптимизационной задачи формируются рекомендации для поддержки решений менеджеров торговой сети.

Материалы и методы

Рекомендуется смотреть на проблему моделирования цифровых двойников с точки зрения возможностей имитационных и оптимизационных моделей [6].

Оптимизация, искусственный интеллект или другая передовая аналитика могут быть частью эффективного цифрового двойника цепочки поставок. Цифровой двойник в составе широкого спектра систем диспетчерского пункта обеспечивает сквозное управление цепочками поставок [7].

Что касается возможности принятия оптимальных решений при управлении торговой сетью, то эти данные становятся аргументами в пользу математической модели. Основная задача — разработать алгоритмы принятия управленческих решений в отношении торговых сетей. Разработка комплекса формализмов на основе адекватного математического описания решает ряд очень важных задач в области управления торговыми сетями. Это позволяет перейти к алгоритмизации именно таких цифровых двойников:

- возможность сквозного сопровождения любых коммерческих сделок,
- стратегическое планирование с использованием инновационных методов на основе опережающих экономических показателей,
- использование хорошо формализованных методов математической теории стохастического управления для поиска решений экономических задач в условиях рыночной неопределенности,
- поддержание максимального уровня прибыли при наличии на рынке нескольких поколений продук-

ции и их взаимозаменяемость с инновационными предложениями,

- взаимодействие в режиме реального времени с динамично меняющимися потребительскими запросами с учетом социально-демографического ландшафта,
- моделирование стресс-тестов, позволяющих поддерживать высокие показатели устойчивости бизнес-решений и их эффективности.

Под торговой сетью понимается физическая сеть, в которой основной составной частью узлов являются любые коммерческие субъекты, работающие под единым брендом при соблюдении принципа единого управления, определяющего на высшем уровне стратегию и рыночную политику. Все узлы торговой сети объединены в единую финансово-экономическую структуру. Для каждого из них определена контактная поверхность, выступающая интерфейсом взаимодействия, обеспечивающая синхронизацию физического и информационного обмена в рамках торговой деятельности. Этими узлами могут быть распределительные центры, торговые залы, производственные предприятия, склады, транспортные терминалы, а также техническая инфраструктура для межмашинного обмена информацией, центры обработки данных и вычислительные мощности серверов управления и хостинга. При создании математической модели четко выделяется набор входных и выходных параметров в качестве вектора данных для интерфейса данного физического узла. При этом ряд возможных взаимосвязей определяется в виде графика, определяющего направленность и характер взаимодействия, а также необходимую степень протекания этих процессов в виде функций распределения. Поскольку в практическом взаимодействии разветвленных коммерческих структур часто существуют различные стандарты источников и представления данных в зависимости от страны и места нахождения, необходимо их согласование.

Второй определяющей концепцией является настройка сетевой информации. Его функция напрямую связана с деятельностью физической сети. Информационная сеть осуществляет отслеживание всех операций и записывает финансовую составляющую каждой транзакции. Математическое моделирование в первую очередь отражает систему информационных потоков в торговой сети. Путем поиска оптимальных алгоритмов обработки этих потоков достигается рыночная конкурентоспособность. Условия ведения каждого вида бизнеса диктуются действующим законодательством, которое затем формально определяет ограничения при создании модели. Также ограничителями могут служить качественные характеристики используемого в узлах оборудования и пропускная способность каналов взаимодействия, а также временные факторы.

Третья концепция касается устойчивости реализуют интересный подход к построению логистической сети для применения в определенных устойчивых логистических стратегиях. В этой работе синтезируются эмпирические результаты в отношении схемы классификации логистических предприятий от 1PL до 5PL и соответствующих стратегий удержания. С точки

зрения трансформации логистического бизнеса для обеспечения устойчивости исследователи описывают логистическую сеть, состоящую из конкретных объектов, в частности заводов, складов, распределительных центров (ЦД) и клиентов. Рассматриваемые торговые сети имеют некоторое сходство с логистическими сетями, при этом необходимо учитывать требования «зеленой» экономики. Можно согласиться с тезисом о том, что сотрудничество и интеграция цепочки поставок, а также интеграция решений для экономики совместного потребления и новых цифровых технологий были выявлены с помощью подхода качественного контент-анализа. Таким образом, в нашем исследовании методология алгоритмизации цифрового двойника торговой сети может быть реализована совместно с контент — анализом, реализуемым в вышеупомянутом исследовании.

Поступательные сдвиги в формировании и развитии торговых сетей привели к внедрению нового подхода к управлению системой движения товаров, основанного на трансформации модели продаж, представляющей собой цепочку последовательных действий, направленных на оптимизацию процесс принятия управленческих решений. Конкурентная рыночная среда создает спрос на инновационные экспертные системы для поддержки управления сетевой коммерцией.

Развитие научных знаний в области управления позволяет ввести концепцию многоуровневого управления, в основе которой лежат опережающие плановые показатели, как практико-ориентированный подход при организации бюджетирования и движения в цепях поставок. Отмеченная тенденция характерна для всего мирового рынка розничной торговли.

Результаты

В исследовании определены наиболее характерные определяющие моменты на текущем этапе, которые помогают оценить, как решается представленная проблема. Это четко определенный набор показателей работы торговой сети, реализованный в едином интерфейсе. Программная реализация алгоритма также должна обеспечивать мультиплатформенность вычислений, поскольку на различных уровнях управления используется самое разнообразное оборудование от мощных серверов до планшетов и смартфонов. М2 М-взаимодействие также происходит с использованием широкого класса технических решений, таких как сканеры QR-кода (быстрого реагирования), метки RFID (радиочастотная идентификация), GNSS (Глобальная навигационная спутниковая система), GPS (Глобальная система позиционирования) и многие другие, к стандартизированным протоколам. Одним из наиболее важных из них является требование масштабируемости алгоритма. Это продиктовано не только стоимостными соображениями при расширении бизнеса, но и постоянной эволюцией бизнес-процессов, т. е. реинжинирингом. Поскольку миграция устаревших систем неизбежна, необходимо сохранить общую архитектуру, обеспечить адаптацию к увеличению числа узлов сети и усложнить ее типологию. Исполь-

зую этот подход, мы можем полностью раскрыть возможности взаимодействия контактных поверхностей, минимизируя тем самым необходимость адаптации интерфейса узлов сети.

В целях разработки цифрового двойника процессов, происходящих в торговой сети, используем представление ее деятельности в виде многоуровневого процесса. [4]. В данном исследовании два из этих уровней рассматриваются как наиболее важные при формализации работы торговой сети. Первым из них или вышестоящим в управленческой иерархии является группа предприятий, образующих консолидированную структуру узлов сети. Группа участников верхнего уровня управляется единым управлением, когда распределение средств на плановый период по предприятиям сети осуществляется централизованно. Второй уровень иерархии связан с компонентами узлов сети и находится под непосредственным управлением верхнего уровня. Менеджмент второго уровня получает средства на плановый период и может распределить их оптимальным образом по компетенциям, чтобы получить максимальную прибыль.

На каждом из двух перечисленных уровней математическая модель строится по следующим ограничивающим условиям:

- заранее определяется горизонт планирования, по окончании которого формируется итоговая оценка экономических показателей эффективности;
- общая длина горизонта планирования разбивается на более мелкие периоды или этапы планирования;
- по результатам деятельности формируется промежуточная оценка показателей экономической деятельности за каждый из промежуточных периодов;
- на основании промежуточных оценок экономических показателей деятельности руководство принимает управленческие решения на следующий период промежуточного планирования;
- определяется набор ключевых показателей, формализованных в виде вектора, характеризующего текущее состояние торговой сети;
- торговая сеть четко представлена как вектор текущего состояния и как вектор, отражающий совокупность управленческих решений, принимаемых менеджментом в начале каждого промежуточного периода.

Задача менеджмента состоит в том, чтобы перед началом каждого промежуточного этапа определить набор управленческих решений, чтобы окончательная оценка показателей экономической эффективности была максимальной. Это означает, что критерии качества принятия управленческих решений учитывают показатели эффективности за все промежуточные периоды. Эта концепция соответствует действующему принципу перехода планирования к системе опережающих экономических показателей.

Математическая модель должна строиться с учетом дискретности данных о деятельности хозяйствующих субъектов и, соответственно, аргументов функций. Для решения этого класса задач рекомендуется использовать соответствующие методы, основанные на дискретном принципе максимума, разработанном Львом

Понтрягиным. Также рассматривается возможность использования уравнений Беллмана.

Алгоритмизация в рамках цифрового двойника необходима для применения методов прогнозирования и поиска оптимальных решений. Формализация задачи позволяет использовать экономическую природу параметров реальной торговой сети в качестве аргументов математической модели и с помощью теории оптимизации получать логически обоснованные рекомендации для управления.

Для торговых сетей вводится понятие системы, обозначаемой символом S . Состояние системы S четко определяется набором индикаторов. В зависимости от времени t количественные значения показателей могут изменяться, полностью соответствуя текущему состоянию системы S . Многие такие допустимые состояния описываются фазовым пространством \mathbb{S} . Высшее руководство торговой сети, иначе системы S , имеет возможность влиять на работу сети, принимая несколько управленческих решений U . При этом качество управления оценивается по критерию W . Поскольку стоимость W определяется решениями, принимаемыми менеджерами U , существует зависимость:

$$W = W(U) \quad (1)$$

Задача управления торговой сетью формулируется как поиск набора управленческих решений, U^* при которых критерий качества [28] максимален:

$$W^* = W(U^*) = \max_U [W(U)] \quad (2)$$

При этом существует ограничение на площадь начальных состояний, \mathbb{S}_0 соответствующих моменту времени $t = 0$, и площадь конечных состояний \mathbb{S}_{FIN} соответственно как:

$\mathbb{S}_0 \in \tilde{\mathbb{S}}_0$; $\mathbb{S}_{FIN} \in \tilde{\mathbb{S}}_{FIN}$, где указано: где $\tilde{\mathbb{S}}_0$ – площадь фазового пространства [29] при $t = 0$, а $\tilde{\mathbb{S}}_{FIN}$ – соответственно множество допустимых состояний при $t = t_{FIN}$. Аналогично, согласно сделанным допущениям, горизонт планирования от t до t_{FIN} разбивается на n промежуточные периоды. В конце каждого из них W_i вычисляется значение для $i = 1 \dots n$. Принято тогда, что итоговое значение W для всего горизонта планирования рассчитывается по формуле аддитивного критерия:

$$W = \sum_{i=1}^n \theta_i W_i \quad (3)$$

значения; $\theta_i = 1 \forall i = 1, \dots, n$ однако, поскольку, как правило, деятельность коммерческих субъектов оценивается с помощью финансовых показателей, для учета инфляционной составляющей и возможности реинвестирования критерии учитывают коэффициенты дисконтирования θ_i .

Далее U_i вводится, где $i = 1 \dots n$, множества управленческих решений для каждого из n промежуточных периодов. Установлено, что изменение состояния \mathbb{S}_{i-1} в состояние \mathbb{S}_i определяется набором управленческих решений U_i и предшествующим состоянием \mathbb{S}_{i-1} , иными словами, дает соотношение:

$$\mathbb{S}_{i-1} = \mathbb{S}_{i-1}(\mathbb{S}_{i-1}, U_i) \quad (4)$$

Это ограничение не является критичным, так как при отсутствии последствий достаточно увеличить размерность фазового пространства \mathbb{S} [2], введя в него параметры состояния за предыдущий период. Если данные термины используются для формулировки, то (3) и (4) можно использовать для определения выражения (1) как такового:

$$W = \sum_{i=1}^n W_i(\mathbb{S}_{i-1}, U_i) \quad (5)$$

Таким образом, целью поставленной задачи является поиск множества управленческих решений U_i^* , а в виде вектора: $U_i^* = \{U_1^*, U_2^*, \dots, U_n^*\}$, действия которых в рамках торговой сети или в рамках математической модели перевести исследуемую систему S из исходного состояния (начало периода планирования) \mathbb{S}_0 в конечное \mathbb{S}_{FIN} состояние через n промежуточные периоды. Использование такой концепции математической формализации процесса планирования позволит создать алгоритм на основе устойчивой обратной связи с потоком цифровых данных, отражающих экономические показатели текущей деятельности.

Техника использования математического моделирования и метод практического расчета представлена на следующем примере. Предположим, торговая сеть состоит из m узлов. Субъектами, составляющими торговую сеть, могут быть розничные и оптовые торгово-производственные единицы, распределительные центры, складские комплексы. Каждая из них состоит из внутренней инфраструктуры со стандартизированным интерфейсом, обеспечивающим контактную поверхность. Высшее руководство распоряжается средствами для поддержки и развития работы торговой сети. Сумма средств равна Z . Эту сумму необходимо выделить каждому из m подразделений в размере, $k = 1, 2, \dots, m$ где Z_k .

Z_{1k} выделяются средства, где 1 – номер периода, k – номер узла торговой сети. Тогда можно записать распределение в виде вектора: \bar{Z}_1 , размерность которого определяется количеством предприятий m : $\bar{Z}_1 = (Z_{11}, \dots, Z_{1m})$. Так как прибыль оценивается после окончания первого периода, для вложенной суммы z значение прибыли записывается как $f_k(z)$ для каждого из $k = 1 \dots m$. Учитывается, что вложенные средства частично расходуются на текущие расходы, что можно записать в виде: $\phi_k(z) \leq z$ для каждого из $k = 1 \dots m$. Для второго промежуточного периода распределение средств записывается как $\bar{Z}_2 = (Z_{21}, \dots, Z_{2m})$. Эта операция продолжается до последнего n промежуточного периода. Задача управления формулируется как: необходимость найти способ оптимального управления имеющимися средствами.

Рассматриваются несколько популярных вариантов управления вместе с соответствующими критериями.

Вариант 1. Полученную от деятельности прибыль полностью инвестировать в дальнейшее развитие. Критерием оптимизации является максимальная сумма текущих остатков средств и полученной прибыли за период.

Вариант 2. Полученную от деятельности прибыль полностью инвестировать в дальнейшее развитие. Критерием оптимизации является максимальная только прибыль, достигнутая за период.

Вариант 3. Прибыль, полученная от деятельности, вкладывается в дальнейшее развитие не полностью, а только оговоренная ее часть. Критерием оптимизации является максимальная только прибыль, достигнутая за период.

Представленные три варианта были выбраны как наиболее распространенные. На практике могут быть и другие критерии, поддающиеся формализации. Результатом расчета с использованием математической модели должна стать совокупность управленческих решений \bar{Z}_i для $i = 1 \dots n$, которая максимизирует соответствующие критерии W . Это равносильно тому, что на практике руководство торговой сети имеет обоснованные рекомендации по перераспределению имеющихся средств между предприятиями сети. Результат этой деятельности обеспечивает максимум по выбранным критериям W .

Математические формализмы для уровня узла торговой сети аналогичны общесистемным S . Каждое из предприятий также имеет внутреннюю структуру. Например, в торговом комплексе есть свои подразделения, такие как производство, складская инфраструктура, инженерно-энергетическая структура, транспортно-наливные терминалы, охрана, охрана, информационно-вычислительная деятельность и т.д. Так же существуют аффилированные виды деятельности внутри торговой сети с производством товаров под собственными торговыми марками. Для описания этой системы можно использовать ряд показателей, многие из которых также представлены в виде фазового пространства. Управление узлом торговой сети влияет на состояние системы. Его задача заключается в выработке управленческого решения, обеспечивающего максимум соответствующих критериев оценки показателей эффективности по истечении планового периода, который разбит на периоды. В свою очередь, начальное состояние также определяется на уровне узла торговой сети. Отличие состоит в том, что область допустимых значений фазового пространства узла определяется высшим руководством всей сети. Несмотря на то, что две задачи структурно схожи, методы их решения различны.

Модели, используемые для решения экономических задач, даже самые простые, приближенно отражающие реальные процессы, в большинстве своем нелинейны. Сформулированная выше задача относится к классу многомерных нелинейных задач. Ее решение основано на поиске оптимального набора управленческих решений. В процессе исследования использовался дискретный принцип максимума, известный как принцип Понтрягина. Его использование в разработанной модели было обусловлено поиском оптимального решения для всей системы предприятий, входящих в торговую сеть. На основе полученного решения было разработано дополнение с использованием другого метода – принципа динамического программирования. Этот алгоритм поэтапно реализуется следующим образом (используя введенные символы).

Формализованная выше модель процесса, происходящего на уровне узла торговой сети, ставит задачу поиска последовательности векторов управленческих решений $\bar{U}_i = (U_{i1} \dots U_{im})$ для $i = 1 \dots n$. Наглядное представление процесса показано на рис. 1.

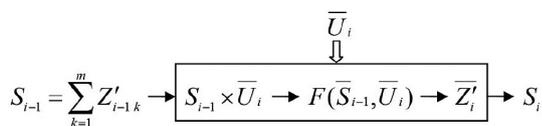


Рис. 1. Схема принятия управленческих решений.

где формула $S_i = S_i(S_{i-1}, U_i)$ характеризует зависимости перехода из состояния S_{i-1} в S_i ; элементы вектора F отражают реакцию сети $Z'_{ik} = F_k(\bar{Z}_{i-1}, \bar{U}_i)$, когда $k = 1 \dots m$ текущие затраты равны $\phi_k(z) \leq z$ для каждого из $k = 1 \dots m$ соответственно равных для каждого предприятия как узла торговой сети: $F_k = f_k(S_{i-1} \times U_{ik}) + \phi_k(S_{i-1} \times U_{ik})$, а соответствующие элементы U_{ik} для всех $k = 1, 2, \dots, m$ расположены на стандартном симплексе $m - 1$.

Применение принципа максимума Понтрягина позволяет получить необходимый набор управленческих решений U_i^* .

Компьютерное программирование, небольшой объем вычислений и простота расчетов по приведенным выше формулам являются положительными качествами этого метода.

Теперь значение кумулятивного критерия W данной формулы (3) необходимо объединить с расчетными значениями для каждого промежуточного периода W_i для $i = 1 \dots n$: $W = \sum_{i=1}^n W_i$. Для решения этой проблемы используется принцип Беллмана или динамическое программирование.

Следует отметить, что метод динамического программирования трудоемок в вычислительном процессе. Однако использование современных процессов и специализированных пакетов приложений и надстроек позволяет переложить громоздкие вычисления на вычислительные мощности компьютера.

Реальная коммерческая деятельность всегда происходит в условиях рыночной неопределенности. Это выражается в хаотичности всех признаков, таких как объем спроса на позиции ассортиментной матрицы, сезонная неравномерность, неблагоприятное воздействие конкурентной среды. В процессе принятия управленческих решений менеджеры имеют только средние показатели. Рассмотренные выше задачи и их решение предусматривают детерминированность переменных. В реальности каждый из узлов торговой сети состоит из ряда подразделений, показатели эффективности каждого из которых имеют стохастическое значение. Однако управленческие решения принимаются на высшем уровне управления, а отдельные показатели уже суммируются и усредняются. Таким образом, необходимо решить задачу математического моделирования уровня узла торговой сети, который является стохастическим.

Для построения стохастической задачи управления узлом торговой сети используются приведенные выше формализмы. Здесь торговая сеть представлена как система S , подверженная случайным факторам. Совокупность управленческих решений U , применяемых к системе, S оценивается по критерию W . Здесь его значение равно $W = \sum_{i=1}^n W_i$, где W_i - оценка критерия

в каждом из промежуточных периодов, на которые разбит горизонт планирования, где $i = 1 \dots n$. Однако в стохастической задаче значение W не полностью определяется выбранным U и начальным состоянием S_0 . Задача менеджмента состоит в том, чтобы определить набор решений U_i^* для $i = 1 \dots n$, что приводит систему S к состоянию S_{FIN} за n промежуточные периоды и обеспечивает максимальность критерия W . Так как задача является стохастической, то можно говорить только о ее среднем значении \bar{W} . Выражение только через ожидаемое значение дает $\bar{W} = M[W]$.

Сформулированная задача решается методом динамического программирования. При этом целью решения является последовательность векторов U_i для $i = 1 \dots n$, которые представляют собой набор управленческих решений руководства торговой сети. Процедура поиска U_i определяется критерием, \bar{W} который необходимо максимизировать.

В общем случае решение происходит за i -й промежуточный период из условия нахождения системы торговой сети в предыдущем состоянии S_{i-1} , что вместе с набором управленческих решений U_i и стохастическим распределением, зависящим от S_{i-1} , полностью определяет последующее состояние сети S_i . В этих условиях ожидаемое значение равно $\bar{W}_i(S_{i-1}, U_i) = M[W_i(S_{i-1}, U_i)]$.

Эта стохастическая задача отличается от детерминированной тем, что множество оптимальных управленческих решений также носит случайный характер. Он выбирается уже из условия деятельности торговой сети в условиях неопределенности. При этом расчет сводится к набору управленческих решений, оптимальных в состоянии системы после случайного результата, полученного в предыдущем промежуточном периоде. Это согласуется со схемой принятия управленческих решений с использованием обратной связи в связи с текущим состоянием.

Сложность расчета стохастической задачи выше по сравнению с детерминированной задачей. Однако при использовании программных надстроек вычислительная нагрузка ложится на мощность процессора. При использовании современных компьютеров для создания экспертной системы руководство торговой сети может использовать научно обоснованные решения в своей деятельности в режиме реального времени.

Для демонстрации изложенной методики приведем пример расчета. Для наглядности рассмотрим два предприятия — узлы, входящие в торговую сеть. Обозначим узел торговой сети как TNN 1 и TNN 2. Сравним вариант использования предложенного алгоритма на основе метода динамического програм-

мирования с традиционным планированием на основе скользящей средней. Исходными данными являются количество средств, распределенных между узлами, рентабельность активов каждого из них и текущие затраты. Горизонт планирования составляет 12 месяцев. Рассмотрены торговые предприятия с различными показателями торговой деятельности, которые определяются социально-демографическим ландшафтом их местонахождения. На рис. 2 представлены результаты расчетов по заданному алгоритму на фазовой плоскости.

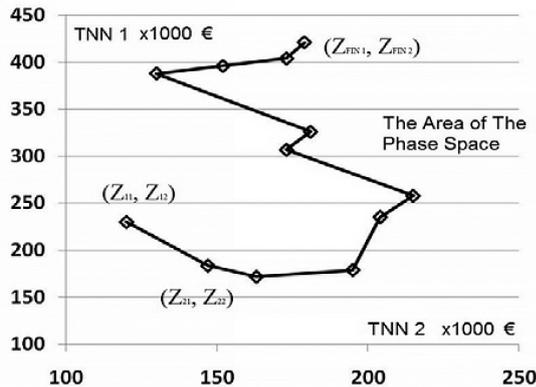


Рис. 2. Процесс расчета планового заказа с помощью динамического программирования

Для того чтобы можно было оценить эффект от метода динамического программирования, на рис. 3 показано сравнение итоговой экономической эффективности по сравнению с методом скользящего среднего. Из сравнения двух диаграмм видно, что компьютер уже на первом этапе выбирает перераспределение средств между TNN1 и TNN2.

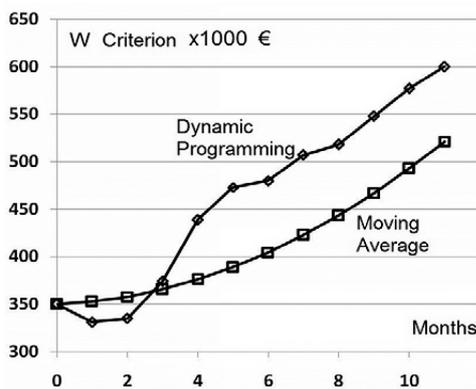


Рис. 3. Расчет зависимости критерия качества управления W

При дальнейших шагах расчетные значения постоянно корректируются, что позволяет увеличить суммарный показатель экономической эффективности совместного планирования.

Расчет проводился на короткий горизонт и на малое количество узлов для наглядности. Для реальных практических расчетов на компьютере размерность

векторов, определенное количество узлов, составляющих торговую сеть, и продолжительность периода планирования не имеют значения.

Развитие торговой сети, цифровизация товаров и услуг, перевод торговых и платежных операций в цифровое пространство дает уникальный шанс создать научно обоснованную цифровую торговую экосистему.

Заключение

Таким образом, в статье обоснована эффективность использования математического аппарата для поиска оптимальных решений для цифрового двойника торговой сети. До сих пор не существовало технической базы и массово доступных технологий, позволяющих в режиме реального времени получать данные о текущем состоянии такого сложного хозяйственного объекта, упомянутого выше. Предлагаемый подход позволяет использовать поток входных данных в качестве аргументов функций математической модели и рассчитать оптимальную стратегию управления торговой сетью.

Онлайн-информация обо всех этапах сделок и взаимодействие с экспертными системами на основе проверенных алгоритмов закладывают основу для принятия управленческих решений в результате программной обработки данных, полученных в результате цифрового бесшовного M2 M-взаимодействия. При этом целевые показатели торговой деятельности сверяются с критериями оптимальности ведения бизнеса. Возможность проведения стрессовых сценариев, инновационные ИТ-решения, разумная диверсификация бизнеса и адаптация к изменчивым компонентам ландшафта цифровой экосистемы снижают риски при ведении бизнеса. Разработка научно обоснованных алгоритмов цифровой экосистемы актуальна, поскольку процесс роста коммерческих сетей в большинстве развитых стран происходит за счет региональной и транснациональной экспансии. В связи с тем, что рассматриваемые процессы протекают в условиях негативного фона экономической ситуации, драйвером конкуренции становится оптимизация, достигаемая методом математического моделирования. В настоящее время наблюдается глобальная тенденция консолидации бизнеса в торговые структуры (сети). Эта тенденция формирования торговых сетей касается не только розничного сектора, но и сферы услуг. Его появление особенно заметно в последние годы под влиянием цифровой трансформации. Грань между цифровой продажей товаров и внедрением услуг стирается, поскольку произошли глобальные сдвиги всего торгового ландшафта. Связь между физическим объектом и его виртуальной моделью лежит в основе концепции создания цифрового двойника, включающей оптимизационные модели, данные которых являются аргументами функций математической модели цифрового двойника.

Список использованных источников

1. Новая парадигма цифрового проектирования и моделирования глобально конкурентоспособных продуктов нового поколения. Рабочий отчет Департамента корпоративного образования Московской школы управления Сколково «Цифровое производство: методы, экосистемы, технологии». 2018. Стр. 24–43. (на рус.). — URL: http://assets.fea.ru/uploads/fea/news/2018/04_april/12/cifrovoeiproizvodstvo-032018.pdf
2. Артемов М. А., Барановский Э. С., Жабко А. П., Провоторов В. В. (2019). О трехмерной модели неизотермических течений в сети трубопроводов. — Журнал физики: серия конференций, 1203 (1) — URL: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1203/1/012094>
3. Балабан, О. Р. Аппроксимация эволюционных дифференциальных систем с распределенными параметрами сетевым и моментным методами//Моделирование, оптимизация и информационные технологии» («МОИТ»). — 2019. — 7 (3). — URL: <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2019.26.3.040>
4. Борисоглебская Л. Н., Провоторова Е. Н., Сергеев С. М., Худяков А. П. (2019). Автоматизированная система хранения и поиска для концепции Индустрии 4.0. Серия конференций IOP: Материаловедение и инженерия — 537 (3). — 0–6. — URL: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/537/3/032036>
5. Сазерленд, Э. Тенденции регулирования мировой цифровой экономики. Электронный журнал SSRN. — 2018 — 29 июля. — URL: <https://doi.org/10.2139/ssrn.3216772>
6. Чжан К., Сюй В., Лю Дж., Лю З., Чжоу З. и Фам Д. Т. Реконфигурируемый подход к моделированию производственной системы на базе цифровых двойников. Труды CIRP. — 2019. — 83. — С. 118–125. — URL: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.03.141>
7. Цифровые двойники цепочки поставок. определения, проблемы, которые они решают, и как их развивать. — URL: <https://www.anylogistix.com/supply-chain-digital-twins/>

References

1. A new paradigm of digital design and modeling of globally competitive products of a new generation. Working report of the Department of Corporate Education of the Moscow School of Management Skolkovo «Digital production: methods, ecosystems, technologies». 2018. pp. 24–43. (in Russian). — URL: http://assets.fea.ru/uploads/fea/news/2018/04_april/12/cifrovoeiproizvodstvo-032018.pdf
2. Artemov M. A., Baranovsky E. S., Zhabko A. P., Provotorov V. V. (2019). On a three-dimensional model of non-isothermal flows in a pipeline network. — Journal of Physics: Conference Series, 1203 (1) — URL: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1203/1/012094>
3. Balaban, O. R. Approximation of evolutionary differential systems with distributed parameters by network and moment methods//Modeling, optimization and information technologies» («МОИТ»). — 2019. — 7 (3). — URL: <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2019.26.3.040>
4. Borisoglebskaya L. N., Provotorova E. N., Sergeev S. M., Khudyakov A. P. (2019). Automated Storage and Retrieval System for the Industry 4.0 Concept. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering — 537 (3). — 0–6. — URL: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/537/3/032036>
5. Sutherland, E. Trends in regulation of the global digital economy. Electronic journal SSRN. — 2018 — July 29. — URL: <https://doi.org/10.2139/ssrn.3216772>
6. Zhang K., Xu V., Liu J., Liu Z., Zhou Z. and Pham D. T. A reconfigurable approach to modeling a production system based on digital twins. Proceedings of CIRP. — 2019. — 83. — pp. 118–125. — URL: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.03.141>
7. Digital counterparts of the supply chain. definitions, the problems they solve, and how to develop them. — URL: <https://www.anylogistix.com/supply-chain-digital-twins/>