

На правах рукописи



Проскуряков Александр Юрьевич

Математические методы и информационные технологии управления
торговыми операциями с цифровыми валютами

5.2.2. Математические, статистические и
инструментальные методы в экономике

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
доктора экономических наук

Москва – 2024

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «МИРЭА - Российский технологический университет», институте радиоэлектроники и информатики, г. Москва

Научный консультант: доктор технических наук, профессор
Увайсов Сайгид Увайсович

Официальные оппоненты: **Козырев Анатолий Николаевич**
доктор экономических наук, федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Центральный экономико-математический институт РАН», главный научный сотрудник, отделение теоретической экономики и математических исследований, руководитель научного направления

Агафонова Валентина Васильевна
доктор экономических наук, профессор, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева», кафедра экономики Института экономики и управления, профессор

Тинякова Виктория Ивановна
доктор экономических наук, профессор, федеральное государственное образовательное бюджетное учреждение высшего образования «Государственный университет управления», кафедра управления проектом, профессор

Ведущая организация: федеральное государственное образовательное бюджетное учреждение высшего образования «Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации»

Защита состоится «14» мая 2024 г. в 12:00 на заседании диссертационного совета 24.2.372.03 на базе ФГБОУ ВО «РЭУ им. Г.В. Плеханова» по адресу: 115054, г. Москва, Стремянный пер., д. 36, корп. 3, ауд. 353.

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в Научно-информационном библиотечном центре им. академика Л.И. Абалкина ФГБОУ ВО «РЭУ им. Г.В. Плеханова» по адресу: 115054, г. Москва, ул. Зацепа, д. 43 и на сайте организации: <http://ords.rea.ru/>.

Автореферат разослан « _____ » _____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.372.03
доктор экономических наук, доцент



Георгий
Всеволодович
Колесник

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

В последнее время, начиная с 2017 года, все больше набирает популярность и развивается рынок цифровых финансовых услуг. Следствием является рост капитализации мирового рынка цифровых финансовых активов (далее ЦФА) и увеличение мощности блокчейн сети до 200 миллионов тэрахэшей/с и более. В марте 2021 года общая капитализация ЦФА сравнялась с ВВП Российской Федерации и составила примерно 130 триллионов в рублёвом эквиваленте.

Высокий технологический уровень блокчейн решений в значительной степени спровоцировал импульсивный рост рынка и повсеместное распространение все большего числа криптоактивов и появление новых подвидов ЦФА. Появляются проекты стейблкоинов в качестве цифровой альтернативы фиатных средств, заменяющих наличные евро и доллары в виртуальном секторе ЦФА. Кроме этого, выходят более скоростные, технологичные и многофункциональные блокчейны, не использующие майнинг для своей эмиссии. Начинает развиваться рынок виртуальных произведений искусства, основанных на невзаимозаменяемом токене NFT (non-fungible token). В итоге, число криптовалют и токенов на их основе в 2022 году приблизилось к двадцати тысячам и продолжает расти. Однако рынок цифровых инвестиционно-финансовых активов демонстрирует высокие риски.

Значительные инвестиционные риски сделок с криптовалютой связаны со слабой степенью проработанности законодательной базы, отсутствием надежных лицензированных операторов и их недостаточной квалификацией, малым числом площадок для работы с ЦФА, а также высокой стоимостной волатильностью и отсутствием регулирования. В частности, после значительного увеличения суточных объёмов торгов в 2013, 2017 и 2021 годах с 10-20 до 100 и более миллиарда долларов в настоящие дни, а также роста стоимости биткоина с 4 долларов (2011) до 200-1000 (2013) и 19 тысяч (2017) следовали периоды достаточно динамичных спадов. В 2014-2015 годах стоимость падала до 155 и в 2019 году до трёх тысяч долларов. К подобным колебаниям на рынке криптовалюты могут приводить крупные сделки спекулятивного характера, отсутствие регуляции и все больше проявляющаяся зависимость от фондового рынка, а также неоднозначное отношением различных государств к встраиванию рынка криптовалют в мировую финансовую систему. В частности, Китай не раз менял отношение к принятию криптовалют, а Непал, Боливия, Бангладеш, Индонезия и Эквадор запретили их вовсе. Запрет в таком случае обуславливается религиозными или национальными причинами, опасениями по дестабилизации экономики государства.

Вместе с тем за столь короткий жизненный цикл криптовалюты значительно прибавили в стоимости и завоевали определенное признание

среди финансистов. Достаточно отметить, что к ноябрю 2022 года суточные объёмы сделок на этом рынке достигли 5 триллионов в рублёвом эквиваленте, а стоимость биткоина превышает миллион рублей.

ЦФА имеет ряд особенностей, которые приводят к формированию новых закономерностей в изменениях их стоимости. Такими особенностями являются высокая скорость принятия решений и жесткое ограничение эмиссии. Кроме того, биржевые системы для ЦФА в отличие от традиционных рынков функционируют в непрерывном режиме без остановок для подсчета баланса портфеля, клиринга и перерывов на выходные и праздники. Подобные особенности рынка криптовалют приводят к формированию новых специфичных закономерностей в стоимостной динамике ЦФА, которые не учитываются при использовании распространённых методов принятия решений и управления финансовыми активами.

В банковском секторе РФ технология блокчейн используется для проведения платежей и обработки больших массивов данных. Федеральный закон от 31.07.2020 N 259-ФЗ "О цифровых финансовых активах, цифровой валюте и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации" вступил в силу 1 января 2021 года. В соответствии с указанным законом определен правовой статус и порядок оборота цифровых финансовых активов. В 2021 году Сбербанк подал заявку в Центробанк на регистрацию собственной криптовалюты сберкоин. В рамках реализации Указа Президента Российской Федерации от 7 мая 2018 г № 204 «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года» с целью решения задачи по обеспечению ускоренного внедрения цифровых технологий в экономике и социальной сфере, Правительством РФ сформирована национальная программа «Цифровая экономика Российской Федерации».

Все это предполагает необходимость в исследовании и создании математических и информационных методов для повышения эффективности принятия решений по управлению цифровыми финансовыми активами, адекватно отражающих их особенности развития и учитывающих характерные им условия работы. Отсутствие достаточного времени на принятие торговых решений предъявляет повышенное требование к автоматизации расчетов и скорости исполнения операций на рынке цифровых финансовых активов. Возникает необходимость в проектировании и построении роботизированных информационно-аналитических систем.

Неразработанность такого рода подходов, методов, информационных систем поддержки и принятия решений предопределили актуальность темы данного исследования.

Степень разработанности проблемы.

Для решения проблемы управления торговыми операциями и портфелем активов применяются концепции, базирующиеся на оценке ценовых характеристик, рисков и доходностей, которые можно получить на основе методов эконометрики. Значительный вклад в развитие теории распределения активов привнесли Айвазян С.А., Геворкян Э.А, Голубева О.С., Доугерти К., Дуброва Т.А., Косоруков О.А., Льюис К.Д., Мхитарян В.С., Марковиц Г., Тихомиров Н.П., Davidson R., Hamazacebi C., Hayashi F., James G.M., James Tobin, Johansen S., Kennard R., Mood A., Mulaik S.A., Pearson K., Tibshirani R., Wishart J., Wooldridge J.M., Engle R., Engsted T.

Получаемые на основании методов эконометрики соотношения риска к доходности позволяют формировать управляющие решения по торговым операциям над ЦФА. Однако, появляются новые экономических инструменты и рынок цифровых финансовых активов, предъявляющие новые запросы в части повышения достоверности исходных данных временных рядов стоимостных показателей, учитывающих эмиссионные и другие специфичные закономерности для автоматизированного принятия решений в режиме реального времени.

Согласно исследовательским работам Lon Wong расчеты и торги на фондовом рынке акций с помощью краудэкономики, децентрализованных блокчейн-технологий и искусственного интеллекта позволяют применить подход дезинтермедиации и реинтермедиации, автоматизирующий процессы клиринга и не требующий остановки торгов. Такой подход, устраняющий или сокращающий число посредников между производителем продукта и его конечным потребителем, позволяет уйти от традиционного централизованного банковского подхода в сторону прямого финансирования субъектов экономики и представляет регуляторам и системам хранения ценных бумаг новый путь управления торгами акций и транзакциями.

Блокчейн технологии и программное обеспечение децентрализованных, распределенных и высокопроизводительных вычислительных систем, которые находят все более широкое применение в экономике, подробно описаны в трудах Бутерина В., Кравец А.Г., Кочергина Д., Могайара У., Roger Wattenhofer, Melanie Swan., Zyskind G, Nathan O, Crosby MA, Pattanayak P, Verma S, Kalyanaraman V, Don Tapscott, Alex Tapscott.

Аппарат технико-экономического анализа, отражающий закономерности, социодинамику и цикличности рыночных движений исследован Робертом Пректером и Альфредом Фростом. Методам и алгоритмам обработки временных рядов в системах автоматизированного мониторинга посвящены работы Athanasopoulos G., Ermolaev V.A., Hyndman R., Kropotov Y. A.

Для повышения достоверности прогнозирования временных рядов стоимостных показателей ЦФА в системах автоматизированного финансового мониторинга предлагается использовать комбинированный алгоритм аппарата вейвлет-преобразования и искусственных нейронных сетей. Необходимость в предварительной обработке временных рядов стоимостных показателей

обусловлена высокой степенью волатильности в поведении динамики ценообразования ЦФА. Эти эффекты обусловлены ложными всплесками, дивергенциями и флуктуациями, что может привести к неверной интерпретации основополагающих трендов при анализе и в дальнейшем прогнозе временных рядов стоимостных показателей ЦФА. Подобный комбинированный подход рассмотрен в работах Болдырева С.В., Новикова М.А., Терехова С.А., Янчушка З.И., Alben Cardenas, Voubacar Doucoure, Kodjo Agbossou.

Управление торговыми операциями с применением технико-экономического анализа повышает эффективность торговых систем. Процесс управления торговыми операциями на основе технико-экономического анализа временных рядов можно представить моделью с обратной связью. Проблемы построения экономических моделей как систем с обратными связями рассмотрены в трудах Моисеева Н.Н. и Леонтьева В.В.

Теоретическим основам анализа временных рядов на базе вейвлет-обработки уделено внимание в работах Барри У., Джервис Б., Малла С., Чуи К, Эммануил С., Mallat S., Karhunen J., Hyvdrinen A, Oja E. Исследованиям разработки алгоритмов сглаживания, анализа периодических и трендовых структур временных рядов, а также вопросам разработки алгоритмов распознавания, классификации, прогнозирования с применением математического и программного аппарата искусственных нейронных сетей посвящены труды Борисова В.В., Белова А.А., Гарцеева И.Б., Еремина Д.М., Ефимова Д. В., Круглова В.В., Терехова В. А., Тюкина И. Ю., Хайкина С.

Сформулированные в работах вышеупомянутых авторов инструменты, математические методы и модели для прогнозирования временных рядов финансовых показателей и мониторинга рынков позволили изучить существующие подходы к решению проблемы управления торговыми операциями с ЦФА. Несмотря на весомый вклад в развитие прикладной информатики и экономики, предложенные традиционные методы эконометрики не всегда могут быть применены к новому классу стремительно развивающихся цифровых финансовых активов, построенных на блокчейн технологиях.

Объектом исследования является динамика стоимостных показателей рынка цифровых финансовых активов с характерными трендами, закономерностями и паттернами.

Предмет исследования - методы, модели и алгоритмы автоматизированного мониторинга и управления портфелем цифровых финансовых активов на биржевых торговых площадках и реализующих их информационные системы принятия инвестиционных решений по покупке и продаже.

Целью работы является разработка и совершенствование моделей управления торговыми операциями с цифровыми финансовыми активами, реализующих их информационно-аналитических систем, учитывающих закономерности и особенности стоимостной динамики криптовалюты, находящейся под воздействием внутренних и внешних ограничений и рисков.

Задачи научного исследования, которые должны быть решены для достижения поставленной цели:

1. Выявление особенностей процессов ценообразования цифровых инвестиционно-финансовых активов экономики.

2. Разработка алгоритма формирования исходной информации временных рядов стоимостных показателей с использованием вейвлет-преобразования для адаптивного подавления ложных всплесков, дивергенций, флуктуаций с целью повышения достоверности исходной информации о ценах криптовалюты.

3. Разработка и обоснование системы критериев оценки результатов сглаживания временных рядов стоимостных показателей для компенсации случайных вариационных показателей.

4. Разработка математических моделей динамично изменяющихся нестационарных временных рядов стоимостных показателей портфеля цифровых финансовых активов.

5. Разработка методов автоматизированного мониторинга временных рядов стоимостных показателей и управления торговыми операциями над ЦФА.

6. Разработка алгоритма комбинированного многоступенчатого прогнозирования значений временных рядов стоимостных показателей цифровых финансовых активов, основанного на совместном применении аппарата искусственных нейронных сетей, вейвлет-преобразования и волнового экономического анализа для определения оптимальных параметров принятия решений.

7. Разработка методов принятия решений по покупке и продаже активов с использованием автоматизированного торгового робота.

8. Разработка методов верификации и тестирования автоматизированного торгового робота управляющего депозитом активов цифровой экономики на удаленном облачном сервере.

9. Создание и разработка платформы для синтетического тестирования торговых стратегий на исторических временных рядах стоимостных показателей.

10. Экспериментальная оценка и обоснование разработанных алгоритмов прогнозирования и методов принятия решений по сделкам с ЦФА.

11. Разработка адаптивной программной системы финансового мониторинга, прогнозирования и управления ПА, включающей предложенные математические модели, алгоритмы и подходы для повышения эффективности управления торговыми операциями с ЦФА.

Теоретической базой исследования являются работы российских и зарубежных ученых в области моделирования, анализа и прогнозирования временных рядов экономических процессов, теорий искусственных нейронных сетей, экономического анализа и управления, принятия решений, инвестиционно-финансовой деятельности, статистике и эконометрике.

Методологическую базу исследования составляют технологии блокчейн, методы моделирования и математической статистики, методы теории случайных процессов, методы цифровой обработки информации, аппарат анализа временных рядов и вейвлет-преобразований, методы искусственного интеллекта, методы интерполяции, локальной аппроксимации и многомасштабного анализа сигналов, а также табличные и графические методы для демонстрации результатов.

Статистическая информационная база исследований сформирована на основе истории котировок стоимостных показателей компании Tradingview с международных торговых биржевых площадок ЦФА – Kraken, Binance, Bitstamp, Bitfinex, часть данных предоставлена ICE Data Services, а также интегратором финансовых рынков Coinmarketcap, Coingecko и информационным ресурсом Blockchain.com.

Информационной базой данных также послужили данные Московской биржи (MOEX), данные международного индекса 500 крупнейших компаний S&P Dow Jones Indices LLC и других электронных и печатных средств массовой информации исследуемой темы.

В диссертации были использованы следующие **программные инструментари**: пакеты прикладных программ «Microsoft Excel», «STATISTICA», инструменты разработки серверных web-приложений «Go» и «Angular», пакеты прикладных математических программ «Scilab», «MATLAB», сервис облачных вычислений «Digital Ocean».

Область исследования. Проведенные исследования соответствуют паспорту специальности 5.2.2 в части пунктов 3, 4, 11.

Научная новизна состоит в разработке моделей и методов прогнозирования ценовых характеристик торговых сделок с ЦФА и принятия решений по их реализации на финансовых рынках, учитывающих характерные для криптовалюты закономерности в формировании и развитии ценовых показателей, связанных с всплесками и флуктуациями, периодичностью и волновой цикличностью, ограниченностью эмиссии, законодательным принятием. Разработаны подходы к повышению достоверности прогнозирования ценовых характеристик торговых сделок с ЦФА на основе формирования достоверной информации об их значениях с использованием сглаживания, устраняющего ценовые флуктуации.

Подходы и методы описания закономерностей базируются на аппарате эконометрического моделирования и автоматизированных технологий принятия торговых решений. Выявленные закономерности позволили сформировать модель развития и предложить методы управления портфелем активов (далее ПА) с помощью комбинированного многоступенчатого алгоритма прогнозирования стоимостных показателей. Все это составляет общую методологию проектирования систем управления торговыми операциями над ЦФА для обеспечения прироста покупательской способности инвестиционного ПА при колебаниях курсов.

На защиту выносятся следующие результаты, определяющие новизну диссертационного исследования:

1. Предложена методология проектирования систем управления торговыми операциями над цифровыми финансовыми активами.

Методология проектирования систем управления цифровыми активами определяет набор правил использования методов, моделей и алгоритмов, требуемых для построения систем, решающих комплексную проблему управления торговыми операциями над активами цифровой экономики.

В качестве объекта управления предлагаемой методологии выступают активы ЦФА, исходная информация – вектор параметров, определяющих чувствительность системы к возмущающим воздействиям внешней среды и требования к ожидаемым результатам управления.

В отличие от традиционного подхода к управлению финансовыми инвестициями, где применяется фундаментальный и технико-экономический анализ инструмента и процесса, предложенная методология управления со вспомогательным интеллектуальным анализом временных рядов, позволяет в автоматизированном режиме управлять портфелем ЦФА. Отличительной особенностью является применение комбинированного метода принятия решений, позволяющего повысить доходность ПА и минимизировать риски потери покупательской способности актива.

2. Получены результаты исследования долгосрочных трендов групп криптовалют и проведена оценка их влияния на эффективность управления торговыми операциями над ЦФА.

Ценовая направленность ЦФА по отношению к традиционным фиатным активам имеет положительную растущую динамику на длительных интервалах и наклонность около 30-40 градусов относительно исходных точек отсчета начала торгов. Подобные движения и паттерны свойственны динамично растущим рынкам и зачастую они не всегда могут быть эффективно отработаны торговыми алгоритмами. Это обусловлено тем, что для получения прибыли и закрытия торгового цикла необходима более глубокая коррекция импульса. В противном случае недостаточно сильное корректирующее движение приведет к задержке или даже полной остановке всей системы.

В качестве альтернативы торговых пар ЦФА к фиатным фидуцированным, национальным валютам, были рассмотрены пары ЦФА к ЦФА (например, ETH/BTC). Здесь, в отличие от торговых пар к фиату отмечается средняя нулевая полярность подобно центрированным сигналам. В таком случае достаточный откат случается регулярно и единственным фактором риска потери доходности может быть растягивание временных интервалов торговых циклов. Полученные результаты говорят о более высокой эффективности автоматизированных роботизированных алгоритмах управления на торговых парах ЦФА к ЦФА.

Проведенный сравнительный анализ торговых пар ЦФА в различных комбинациях позволил выявить закономерности, которые влияют на эффективность управления инвестиционным портфелем криптовалют.

3. Разработана и исследована математическая модель временных рядов стоимостных показателей, информационных функций и сигналов с алгоритмом сглаживания, учитывающим широкую вариативность и высокочастотные флуктуации.

В финансовых временных рядах стоимостных показателей и процессов могут быть выявлены существенные флуктуации, искажающие основополагающие тренды и мешающие интерпретации полезных сигналов, закономерностей и паттернов. В свою очередь это может ограничивать и понижать эффективность интеллектуального анализа процессов и приводить к неверной трактовке тренда или задержке при получении результата.

Повышение достоверности последующего технико-экономического анализа достигается обработкой временного ряда стоимостных показателей пороговой обработкой (трешолдингом). Для разработки математической модели предварительной обработки отсчетов временных рядов из-за широкой вариативности и высокочастотных флуктуаций в работе предложен алгоритм предварительной пороговой обработки для сглаживания значений стоимостных показателей.

Существенной особенностью разработанной модели и алгоритма является реализация обработки динамично изменяющихся нестационарных временных рядов уровней стоимостных показателей ПА, что позволяет снизить погрешность представления данных и представить трендовые структуры и закономерности с повышенной точностью в технико-экономическом анализе.

4. Разработан метод автоматизированного мониторинга цифровых финансовых активов, базирующийся на вейвлет-преобразовании временных рядов с предварительной пороговой обработкой детализирующих коэффициентов. Данный метод позволяет понизить флуктуации в высокочастотных компонентах временного ряда для его дальнейшего анализа.

Исследования показали высокую степень чувствительности аппарата искусственных нейронных сетей, вейвлет-обработки и технико-экономического анализа к качеству входной информации. Так как шум в сигналах не всегда корректно проецировать на финансовые ряды, подобные флуктуации можно определить, как случайные вариации показателя.

Для повышения качества входной информации используется вейвлет-преобразование с пороговой обработкой, что является существенной отличительной особенностью предлагаемого решения. Порог обработки в таком случае выбирается согласно адаптивному критерию. После этого сглаженный сигнал, представленный набором аппроксимирующих и детализирующих коэффициентов, передается на блок интеллектуального анализа для мониторинга и прогнозирования. Это позволяет ослабить флуктуационные компоненты по критерию сигнал/шум.

Предварительная вейвлет-обработка и применение аппроксимирующих коэффициентов в качестве входных сигналов искусственной нейронной сети (далее ИНС), повышает точность представления данных и понижает ошибку обучения нейронной сети.

5. Разработан алгоритм прогнозирования значений временных рядов цифровых финансовых активов с применением искусственных нейронных сетей и технико-экономического анализа.

Прогнозирование изменения значений исследуемой функции реализуется нейронной сетью, построенной по правилу многослойного персептрона с применением разработанного алгоритма обучения по методу обратного распространения ошибки.

Система прогнозирования, реализованная на трехслойном персептроне прямого распространения, формирует временной ряд отсчетов значений процесса. Полученный очищенный от помех обработанный выходной временной ряд в реальном времени и обработанный выходной временной ряд прогноза представляют информацию в устройствах отображения и в системах принятий решений с более высокой точностью. Реализация алгоритма с НС прямого распространения осуществляется с меньшими вычислительными затратами. Дополнительным эффектом является также возможность гибкого изменения архитектуры нейронной сети в случае изменения требований на длительность прогноза.

6. Разработан метод управления цифровыми финансовыми активами, базирующийся на осуществлении торговых операций в соответствии с рыночными трендами.

Предложенная методология управления торговыми операциями базируется на двух подходах. Один из них – прогнозирование с помощью искусственной нейронной сети. Нейросеть в зависимости от текущей ситуации на рынке анализирует входной временной ряд, выявляя при этом паттерны и закономерности. На основе полученной информации производится вероятностная оценка каждой из возможных закономерностей и выносится рекомендация к принятию управляющего решения по исполнению торговых операций. Другой подход предусматривает беспрогнозное принятие решения.

При данном подходе предлагается автоматическое принятие управляющих решений при помощи разработанных программных торговых роботов. Для этого предложен трендовый метод управления цифровыми активами, отличающийся принятием управляющего решения в соответствии с трендами, независимо от полярности рынка. Важное преимущество – практически полное отсутствие риска потери покупательской способности актива на не маргинальном рынке. Предлагается реализовать систему одновременно с трендовыми и прогнозными методами управления таким образом, что последний будет корректировать управляющее воздействие в зависимости от текущего тренда рынка. В этом случае повышается общая эффективность автоматизированной системы управления ЦФА, но остается проблема выявления глубины трендов. Чтобы ее нивелировать предлагается рассчитать безопасный расход депозита эмпирически на исторических данных, благодаря синтетических тестам или тестам в режиме реального времени.

7. Разработано программно-методическое обеспечение по управлению ЦФА, отличающееся применением метода трендового управления ЦФА, обеспечивающее возможность нахождения оптимальных параметров робота.

Программно-методическое обеспечение представляет собой программную систему автоматизированного трейдинга, платформу для моделирования и численного исследования торговых стратегий, а также методические описания для их использования при управлении цифровыми активами.

К фундаментальным параметрам разработанного метода в системе автоматизированного управления цифровыми активами относятся: шаг цены, объем задействованного депозита и требуемая доходность.

Теоретическая значимость заключается в совершенствовании научно-методологических основ управления торговыми операциями над ЦФА с использованием методов, моделей и адаптивных алгоритмов для автоматизированных торговых роботов, адекватно учитывающих особенности цифровых финансовых активов, а также сбор, агрегацию и представления временных рядов данных стоимостных показателей, позволяющих выполнять предварительную обработку, прогнозирование и технико-экономический анализ с повышенной точностью представления трендовых структур.

Практическая значимость полученных результатов заключается в возможности применения созданной методологии для проектирования систем управления цифровыми финансовыми активами, обеспечивающих повышение эффективности принимаемых инвестиционных решений по их покупке и продаже с контролем рисков. Разработанная для подтверждения результатов исследования автоматизированная система управления торговыми операциями над ЦФА с применением автономного облачного сервера, обеспечивает более эффективное распределение инвестиций в динамичных условиях конкурентной мировой цифровой экономики и получение 0.3...1% депозитарного объема при выполнении торгового цикла.

Результаты проведенных исследований временных рядов стоимостных показателей активов цифровой экономики, позволяют прогнозировать и выявлять тренды в курсах цифровых финансовых активов. Фрагменты исследований и разработок могут быть использованы в корпоративном секторе, задаче регулирования и для создания гибридного суверенного фонда на базе ЦФА, а также при подготовке квалифицированных научных и технических инженерно-экономических IT кадров в России. Внедрение такого класса систем управления ЦФА и резервирования портфеля высоколиквидных цифровых активов может повысить устойчивость государства и центрального банка к геополитическим и валютным рискам, а также укрепить суверенный фонд РФ.

Результаты исследований могут также использоваться в учебном процессе по направлениям 09.03.01, 01.03.02 и 38.03.01 – «Информатика и вычислительная техника», «Прикладная математика и информатика» и «Экономика» профилей «Финансовые рынки и цифровые технологии», «Математические методы в экономике», «Финансовая безопасность и

финансовые рынки в цифровой экономике» и «Цифровая экономика и большие данные»; по направлениям магистратуры «Экономика» и «Информатика и вычислительная техника» профилей «Экономические риски», «Экономика инноваций», «Управление проектами», «Аппаратное и программное обеспечение вычислительных систем», «Управление бизнесом в цифровой экономике» для бакалавров и магистров по следующим дисциплинам: нейροкомпьютерные системы, теория цифровой обработки информации, адаптивные методы прогнозирования, математические методы и модели поддержки принятия решений, экономико-математические методы прогнозирования, инструментальные методы в экономике.

Внедрение и апробация результатов работы. В результате выполнения работы на базе облачных технологий проведено развертывания системы мониторинга, автоматизированного торгового робота и платформы для синтетических тестов эффективности. Система позволит предложить и внедрить сервис банкинга криптоактивов в условиях реализации стратегии развития цифровой экономики в России. Возможно внедрение в частном корпоративном секторе, а также для решения задач регулятора или государственного контроля за оборотом криптоактивов.

Результаты исследований внедрены в процессе выполнения научно-технических проектов:

- договоры 261ГУ1/2013 от 23.10.2013 и 5032ГУ2/2014 от 26.12.2014 в федеральной программе УМНИК-2013-2014 по теме "Разработка системы автоматизированного управления рекламными кампаниями в сети Интернет" Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере;

- договор мол_а № 16-37-00315 на тему: «Автоматизированная система контроля и прогнозирования стоимостных показателей экономических систем», Российский фонд фундаментальных исследований;

- договор 1113ГС1/21635 от 06.04.2016 в рамках федеральной программы СТАРТ-2015 по теме "Автоматизированная система контроля и прогнозирования стоимостных показателей экономических систем" Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере.

- договор СП-838 2018.5 в рамках получения стипендии Президента РФ 2018-2020 по приоритетным направлениям модернизации российской экономики, тема проекта: «Автоматизированный контроль, анализ и прогнозирование временных рядов в инвестиционно-финансовых системах».

Получены два свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Основные положения диссертационной работы докладывались на международных и всероссийских конференциях с последующей публикацией:

- XVI-XIX Международная научно - практическая конференция "Инновационные, информационные и коммуникационные технологии" (ИНФО – 2019-2022) с пленарным докладом по результатам диссертационных исследований, г. Сочи, Сочинский государственный университет;

- Международная сибирская конференция по управлению и коммуникациям, SIBCON 2015. Государственный омский технический университет. Россия, Омск. 21-23 мая 2015;
- 12-ый Международный симпозиум «Intelligent Systems – 2016», INTELS'16. Россия, Москва. 5-7 октября 2016;
- International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2017. St. Petersburg, Russia. 16-19 May 2017;
- 14th International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering, APEIE. Russia, Novosibirsk. 2-6 October 2018;
- Международная конференция «Информационные технологии в бизнесе и производстве», ITBI2018. Россия, Томск. 17-20 января 2018;
- Международный московский семинар по электронным и сетевым технологиям, MWENT 2018. Россия, Москва. 14-16 марта 2018;
- 13-ая Международная научно-техническая конференция «Динамика систем, механизмов и машин» Евразийского технологического форума. Динамика 2019. IEEE. Россия, Омск. 5-7 ноября 2019;
- 14-ая Международная научно-практическая конференция «Электронные средства и системы управления». Россия, Томск. 28-29.11 2019;
- 14-ая Международная сибирская конференция по управлению и коммуникациям, SIBCON 2019. Государственный омский технический университет. Россия, Омск. 18-20 апреля 2019;
- International IEEE Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon. Russia, Vladivostok. 1-4 October 2019;
- 23rd International Conference on Digital Signal Processing and its Applications, DSPA. 2021;
- Международная конференция «Информационные технологии и нанотехнологии», ИТНТ 2017-2022. Россия, Самара;
- Всероссийская научно-практическая конференция «Информационная безопасность как элемент национальной безопасности», Россия, Нижегородская академия МВД России. 31 марта 2023;
- XX Международная научно-практическая конференция «Инновационные, информационные и коммуникационные технологии» (ИНФО-2023) с пленарным докладом по результатам диссертационных исследований, г. Махачкала, Дагестанский государственный технический университет 03.10.2023.

Общественное признание:

- лауреат премии имени В.А. Дегтярева 2019 в научно-технической сфере в номинации «за достижения в сфере научно-технической деятельности по разработке продукции гражданского и двойного назначения»;
- стипендия администрации Владимирской области «Надежда земли Владимирской», 2008;
- «Свидетельство» о результативной демонстрации научно-технического проекта на Всероссийской выставке НТТМ. Москва, ВВЦ, 2010;
- стипендия Президента Российской Федерации (2011-2012);

- диплом «Лучший инновационный проект» конкурса 2018 г. Акционерное общество «Муромский завод радиоизмерительных приборов»;
- стипендия Президента РФ 2018-2020 по приоритетным направлениям модернизации российской экономики.

Публикации по работе. По результатам выполненных исследований опубликовано 58 работ, в том числе две монографии, 16 статей в рецензируемых научных изданиях, 9 статей в журналах, индексируемых Scopus и Web of science, патент на изобретение и два свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и трёх приложений, изложена на 258 страницах, содержит 107 рисунков, 20 таблиц, список литературы состоит из 290 наименований.

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи диссертационной работы, определены ее научная новизна и практическая значимость, описан общий план исследования, приведены сведения о внедрении результатов работы.

В первой главе представлены результаты анализа процессов ценообразования инвестиционно-финансовых активов цифровой экономики с учетом блокчейн-технологий, применяемых для задач управления торговыми операциями, с позиций математики и экономики, а также проведены постановки задач исследования.

Во второй главе описаны предлагаемые методы исследования временных рядов стоимостных показателей ЦФА, которые базируются на теории цифровой обработки информации, аппарате статистического анализа временных рядов и теории вейвлет-преобразований.

В третьей главе рассмотрены искусственные нейронные сети в задачах прогнозирования временных рядов стоимостных показателей ЦФА и распознавания образов (паттернов) в экономике.

Четвёртая глава посвящена моделям разрабатываемых автоматизированных торговых роботов, а также описаны методы исследования поведения системы при моделировании, проведены тесты и представлены результаты проведенных испытаний.

Пятая глава посвящена техническим особенностям реализации систем, разработанному программно-методическому обеспечению и практическим рекомендациям к применению результатов работы.

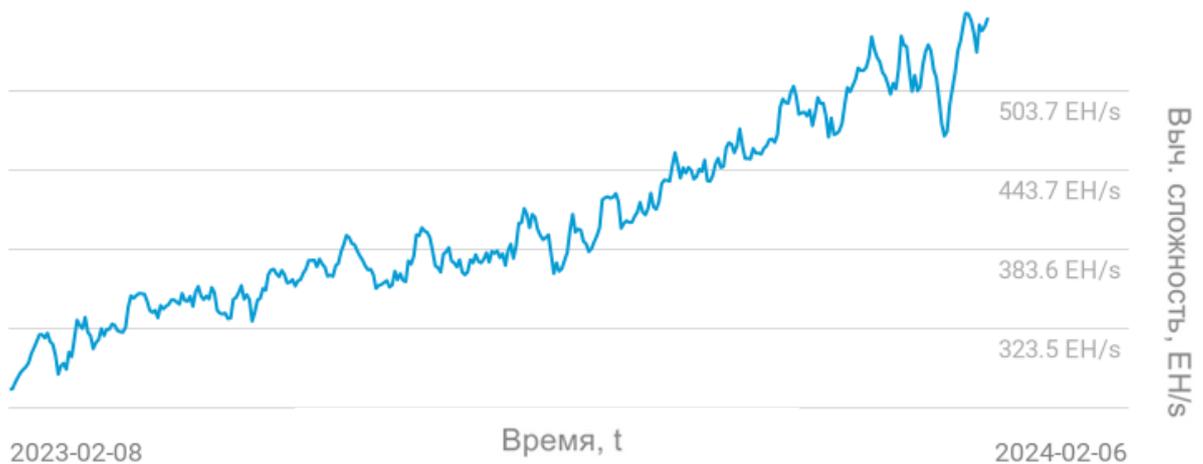
В заключении приведены основные результаты и выводы работы.

II. ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

1. Предложена методология проектирования систем управления цифровыми финансовыми активами. Методология позволяет проектировать системы управления инвестиционно-финансовыми активами цифровой экономики, обеспечивающие динамичное распределение и хеджирование рисков обесценивания ПА.

В феврале 2024 года совокупная вычислительная мощность (хэшрейт) основной blockchain(блокчейн) сети в очередной раз обновила исторический максимум, превысив показатель в 550 миллионов терахэшей в секунду (рисунок 1,а). Динамика развития цифровых активов увеличивается: за последние пять лет рынок вырос более чем в 50 раз и согласно интегратору финансовых рынков coingecko составил 170 триллионов с ежедневным объемом торгов 7 триллионов в рублёвом эквиваленте (рисунок 1,б).

а)



б)

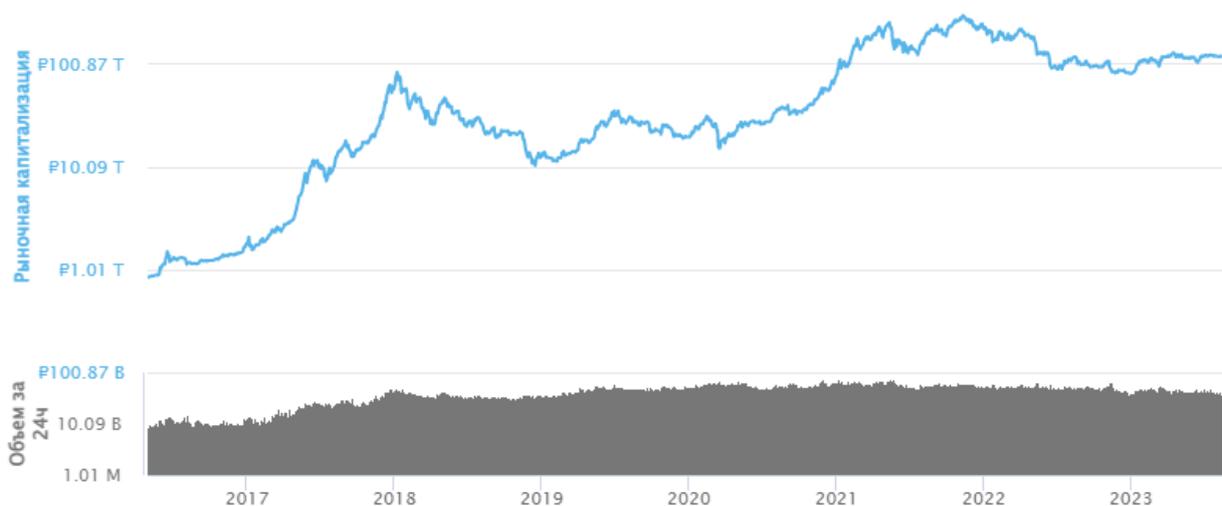


Рисунок 1 – Вычислительная мощность сети (а), капитализация рынков активов цифровой экономики с объемами торгов (б)

Все это предполагает необходимость в инструментах для повышения эффективности принятия решений по управлению ЦФА, адекватно отражающих их особенности развития и учитывающих характерные им условия работы.

Основной задачей при управлении ЦФА является принятие решений по осуществлению торговых операций с депозитарным счетом, что требует формирования методологии проектирования систем управления цифровыми активами, оснащенных комплексом моделей, методов и алгоритмов решения проблем управления экономикой. Решение указанных проблем требует междисциплинарного подхода, интегрирующего знания из экономики, математики и информатики.

Учитывая динамический характер изменения условий рынка необходимо проведение новых исследований и разработок по созданию более совершенных алгоритмов анализа и предсказания временных рядов, отвечающих соответствующим экономическим показателям.

Результаты патентного поиска и анализа литературы по исследуемой теме указывают на необходимость использования достижений новых технологий, таких как, например, в области регрессионного и нейросетевого анализа временных рядов и, в том числе, в сочетании с методами теории вейвлет разложений.

В рамках такого подхода становится возможным обеспечить эффективное внедрение технологий блокчейн, мониторинга и управления активами цифровой экономики.

В качестве объекта управления предлагаемой методологии проектирования систем выступают финансовые активы цифровой экономики (рисунок 2). Исходная информация для принятия решений по управлению ЦФА представляет собой вектор параметров, определяющих чувствительность системы к возмущающим воздействиям внешней среды и закладывающих требования к ожидаемым результатам управления.

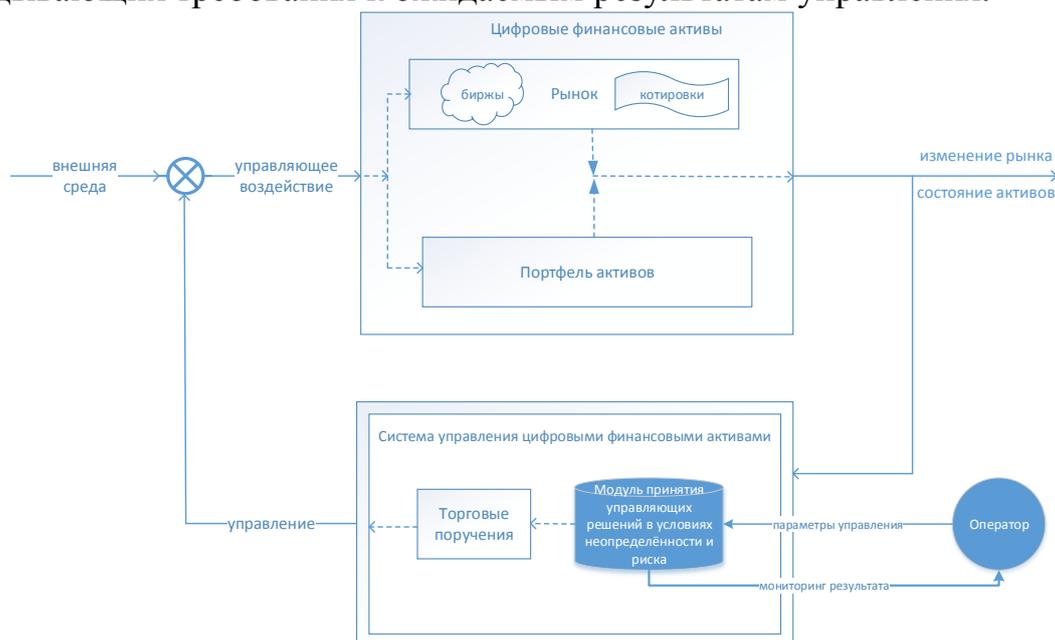


Рисунок 2 – Модель управления цифровыми финансовыми активами

Возмущающим воздействием является состояние рынка с постоянным динамическим изменением, отраженным в котировках и курсах активов цифровой экономики. Управляющая система, реализованная в виде программного кода, посылает управляющее воздействие в виде набора приказов на осуществление торговых поручений. Обратной связью выступает состояние объекта управления, то есть изменения депозитарного актива цифровой экономики, что требует корректировки воздействий управляющей системы в дальнейшем.

Методология проектирования систем управления ЦФА представляет собой последовательность взаимосвязанных этапов исследования, которые представлены на рисунке 3.

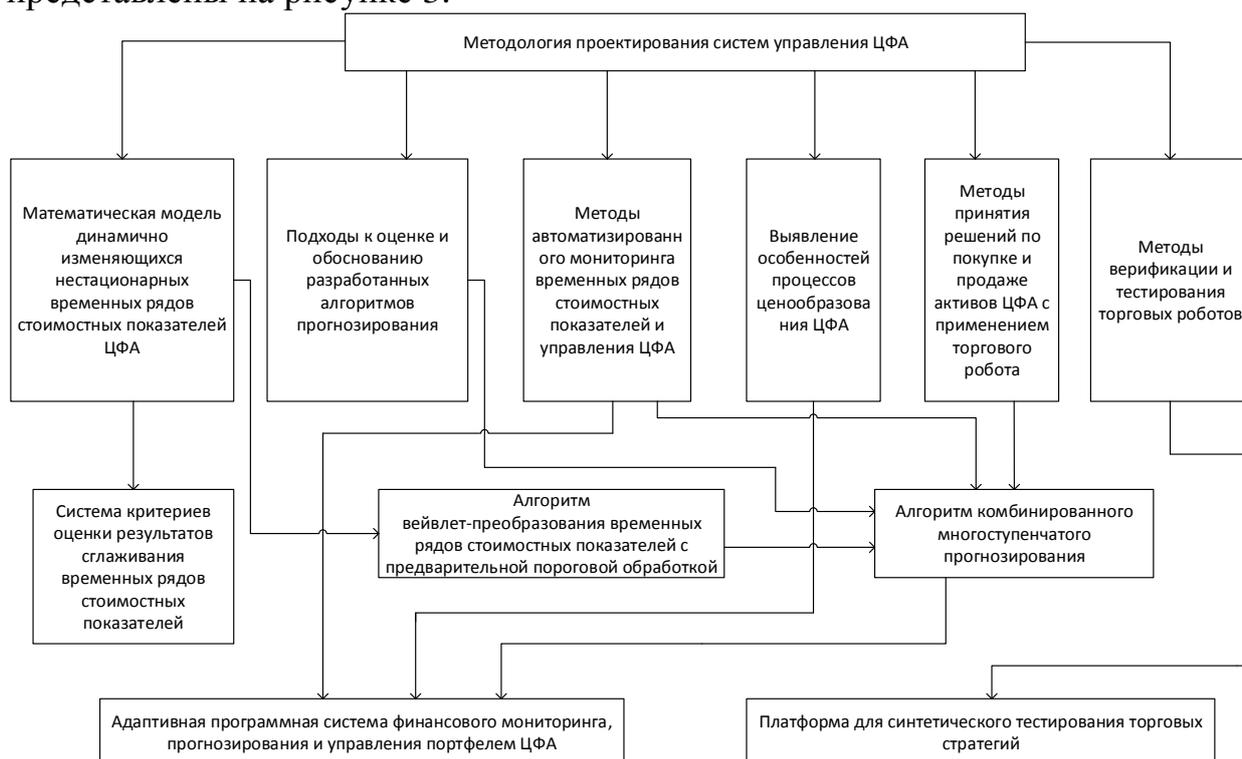


Рисунок 3 – Методология проектирования систем управления ЦФА

Математическая модель динамично изменяющихся нестационарных временных рядов стоимостных показателей ЦФА формирует исходную информацию для предварительной обработки с последующей передачей в систему критериев оценки результатов сглаживания и алгоритм вейвлет-преобразования с предварительной пороговой обработкой для алгоритма комбинированного многоступенчатого прогнозирования. Кроме этого для реализации последнего необходимо учитывать подходы к оценке и обоснованию разработанных алгоритмов прогнозирования, методы автоматизированного мониторинга временных рядов стоимостных показателей и управления ЦФА, методы принятия решений по покупке/продаже с применением роботизированных систем, адекватных специфическим особенностям и закономерностям ценообразования ЦФА.

Методы автоматизированного мониторинга, включающие алгоритм комбинированного многоступенчатого прогнозирования и учитывающие

выявленные особенности процессов ценообразования ЦФА позволяют проектировать адаптивную программную систему финансового мониторинга, прогнозирования и управления портфелем ЦФА. В свою очередь, методы верификации и тестирования торговых роботов позволят разработать платформу для синтетического тестирования торговых стратегий, как приведено на общей структурной схеме методологии на рисунке 3.

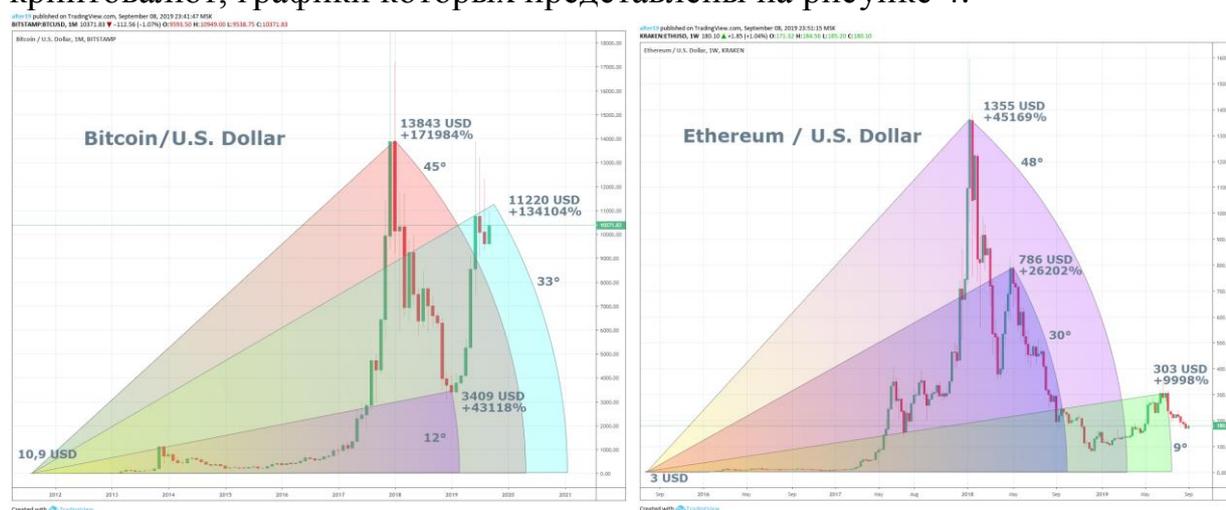
Построенная на основе методологии система генерирует от 12% до 40% прибыли совокупно в базовом и котируемом активе за 1 год, что подтверждает эффективность предложенной методологии.

2. Получены сравнительные результаты исследований группы активов торговых пар ЦФА для повышения эффективности управления ПА в автоматизированных системах управления.

Рынок, как и любой нечеткий процесс, сложно представить определенной математической моделью. Такой процесс затруднительно прогнозировать с целью управления активом, если рассматривать его в виде простого временного ряда безотносительно специфики и природы самого процесса. В случае анализа и прогнозирования временного ряда возможно получать некоторые трендовые направленности и оценивать их динамику. Однако, практически невозможно получить реперные точки смены тренда и разворота. Для этого требуется выявить более сложные структуры, особенности и закономерности, свойственные исследуемому процессу. На рынке ЦФА также существуют специфические закономерности и паттерны.

Так как ЦФА имеют технические свойства криптовалют, то на ценообразование оказывают влияния эмиссионная модель и блокчейн-технологии.

Для выявления особенностей процессов изменения стоимости ЦФА были проведены исследования ценовой направленности основных видов криптовалют, графики которых представлены на рисунке 4.



а)

б)

Рисунок 4 – Исследования динамики и направленности криптоактивов к традиционным фиатным фидуцированным валютам: а) биткоин б) эфириум

Как видно из рисунка 4 ценовая направленность криптовалют к фиатным фидуцированным валютам имеет положительную растущую динамику на длительных интервалах и наклонность около 30-40 градусов относительно исходных точек отсчета начала торгов. Подобные паттерны свойственны всем растущим рынкам, однако они могут быть не всегда отработаны алгоритмами, так как вероятно недостаточное корректирующее движение, требуемое для фиксации сделки и получения прибыли. Например, на росте весь актив был распродан, затем рост продолжился и дальнейшей коррекции недостаточно для откупа. В этом случае более высокую эффективность на длительных временных интервалах демонстрируют стратегии инвестирования, а не краткосрочные торговые операции.

Таким образом, большое значение имеет позиция открытия торговой операции. Если она будет сильно смещена к экстремумам при покупке на волне роста или потенциальной стороне разворота, существенно возрастает риск утраченной прибыли, полной распроданности и остановки или значительной потери времени на вывод ее в прибыль. Кроме чувствительности к позиции пуска системы (начальных торговых операций) необходимо присутствие обоих активов торговой пары в наличие на балансе.

В качестве альтернативы торговых пар ЦФА к фиатным деньгам, были рассмотрены пары ЦФА к ЦФА. Результат исследования и направленности динамики криптоактивов приведен на рисунках 5 и 6.



Рисунок 5 – Результат исследования динамики и направленности криптоактивов: рипл к биткоину



Рисунок 6 – Результат исследования динамики и направленности криптоактивов: лайткоин к биткоину

Здесь, в отличие от рисунка 4 отмечается средняя нулевая полярность, какая встречается на примере центрированных сигналов. Существенно понижается чувствительность системы к фазе рынка в начале запуска или к фактору «удачи попадания в рынок» на старте, так как стоимость актива возвращается в среднее (исходное) положение. В таком случае корректирующее или возвращающее движение осуществляется постоянно, стоимость находится в коридоре, требуя в затяжных торговых циклах лишь больше времени. Последнее несет единственный риск и в целом подобные выводы говорят о более высокой эффективности автоматизированных роботизированных алгоритмах трейдинга на торговых парах ЦФА к ЦФА.

В обоих случаях можно сделать вывод, что система управления ЦФА по умолчанию должна быть утроена таким образом, чтобы выполнять эффективные торговые сделки независимо от направления хода (тренда) цены. Однако, глобальная направленность рынка и момент начала торгов существенно влияют на эффективность торговых операций, поэтому требуется осуществлять дополнительный анализ методами волнового экономико-технического анализа и прогнозирования, в том числе с помощью искусственных нейронных сетей.

С учетом проведенных исследований сделан вывод, что прогнозирование временных рядов стоимостных показателей криптовалют возможно и необходимо применять в качестве вспомогательной функции для анализа и получения рекомендаций по настройке параметров системы. С помощью результатов прогнозирования система в режиме реального времени учитывает выявленные экономические паттерны, закономерностей и их вероятностную оценки; проводит оценку уровней волатильности, силы направленности трендов и других параметров. Все это позволяет своевременно адаптивно корректировать параметры самой системы управления активами.



Рисунок 8 – Результаты технико-экономического анализа

Прогнозирование временных рядов стоимостных показателей в системе автоматизированного финансового мониторинга осуществляется с помощью комбинированного алгоритма, основанного на совместном применении аппарата вейвлет-преобразования и аппарата искусственных нейронных сетей. Кроме этого, математический аппарат включает методы многомасштабного анализа сигналов и временных рядов, методы математической статистики, теории случайных процессов. Проведен анализ торговых пар к традиционным валютам и ЦФА для оценки их влияния на эффективность управления инвестиционным портфелем.

Сравнительные результаты исследований группы активов торговых пар ЦФА позволили выявить преимущество управления цифровыми активами по сравнению с традиционными активами, что обеспечивает более высокую доходность с помощью автоматизированных систем управления.

3. Разработана математическая модель временных рядов, представляющая динамично изменяющиеся нестационарные уровни стоимостных показателей ПА с алгоритмом сглаживания и анализа трендовых и периодических структур с применением вейвлет-обработки, учитывающим широкую вариативность показателей.

Любой экономический показатель является результатом обработки наблюдаемых последовательностей эмпирических данных – временных рядов вида $\{x(kT)\}$, представляемых также решетчатыми функциями

$$x^*(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x(kT)\delta(t - kT). \quad (1)$$

Здесь $x(t)$ и $x^*(t)$ соответственно функции непрерывного и дискретного времени. При этом $x^*(t) = x(kT)$, если $t = kT$, а $\delta(t)$ - символ Кронекера, т.е. $\delta(t) = 1$, если $t = 0$, и $\delta(t) = 0$, если $t \neq 0$. T - период дискретизации.

Обработка временных последовательностей предполагает, в частности, решение задач анализа, аппроксимации, прогнозирования и идентификации экономических моделей. Один из перспективных подходов к решению

подобных задач основывается на методах теории всплесков, обеспечивающих частотно-временное, устраняющее недостатки анализа Фурье, представление динамики локальных характеристик в целом нестационарных процессов. Алгоритм вейвлет-обработки возможно совместить с алгоритмами нейронных сетей.

Дискретное всплеск-преобразование функции $Wx(t)$ – это отображение конечной последовательности $\{x(kT)\}$ на множестве коэффициентов C_{jk}, D_{jk} многочлена, построенного по базисным, соответственно масштабирующим (скейлинг) функциям $\varphi_{jk}(t)$ и всплескам (вейвлетам) $\psi_{jk}(t)$. При этом $\varphi_{jk}(t) = 2^{j/2} \varphi(2^j t - k)$ и $\psi_{jk}(t) = 2^{j/2} \psi(2^j t - k)$, где 2^j – параметр сжатия материнского всплеска $\psi(t)$ и масштабирующей функции, а k – величина их сдвига по оси t . Величина 2^j фактически обозначает частоту.

Многочлен для вейвлет-разложения имеет вид¹

$$x(t) = C_{0,0} \varphi_{0,0}(t) + D_{0,0} \psi_{0,0}(t) + \sum_{k=0}^1 D_{1,k} \psi_{1,k}(t) + \sum_{k=0}^3 D_{2,k} \psi_{2,k}(t) + \sum_{k=0}^7 D_{3,k} \psi_{3,k}(t) + \sum_{k=0}^{15} D_{4,k} \psi_{4,k}(t) + \sum_{k=0}^{31} D_{5,k} \psi_{5,k}(t). \quad (2)$$

Коэффициенты многочлена находятся рекуррентным способом:

$$C_{j-1,k} = 2^{-1/2} (C_{j,2k} + C_{j,2k+1}), D_{j-1,k} = 2^{-1/2} (C_{j,2k} - C_{j,2k+1}),$$

при начальных условиях $C_{6k} = x(k/64)/8$, следующих из соотношения

$$\sum_{k=0}^{63} C_{6,k} \varphi_{6,k}(k/64) = x(k/64), \text{ где } \varphi_{6k}(k/64) = 2^3 \varphi(0) = 8.$$

Многочлен (2) представляет декомпозицию отрезка временного ряда длиной 64 по шести уровням, индексированным буквой j , ($j=0,1,\dots,5,6$). Высшему уровню декомпозиции $j_{max}=6$ отвечает собственно наблюдаемый временной ряд, а нулевому – усредненные по всему интервалу данные. При значениях $0 < j < 6$ усреднение производится по 2^{6-j} блокам данных.

В общем случае материнские всплески, как и функции $\psi_{jk}(t) = 2^{j/2} \psi(2^j t - k)$, считаются ортонормированными. По наглядности и вычислительной сложности безусловным преимуществом обладают всплески Хаара. Его материнский всплеск задается выражением

$$\psi_H(t) = \begin{cases} 1, t \in [0, 1/2), \\ -1, t \in [1/2, 1), \\ 0, t \notin [0, 1). \end{cases}$$

Масштабирующая функция при этом имеет вид

$$\varphi_H(t) = \begin{cases} 1, t \in [0, 1), \\ 0, t \notin [0, 1). \end{cases}$$

Число коэффициентов многочлена (2), как и должно быть, совпадает с длиной временного ряда, т.е. равняется 64. Эти коэффициенты, распределенные по уровням декомпозиции j , разбиваются на 6 групп,

¹См. журнал «УФН, том 171 (2001 г.), №5, с.465-501» и книгу «К. Чуи. Введение в вейвлеты.–М.:Мир,2001».

отвечающих частотам $2^5, 2^4, 2^3, 2^2, 2, 1$. Полученные указанным или другим, более общим способом, коэффициенты многочлена, а возможно, только некоторые из названных коэффициентов, могут являться входами нейронной сети, решающей поставленную задачу анализа, аппроксимации, прогноза или управления.

В процессе вейвлет-обработки из-за широкой вариативности и высокочастотных флуктуаций чтобы повысить достоверность технико-экономического анализа дополнительно требуется обработать детализирующие коэффициенты пороговой обработкой (трешолдинг).

Алгоритм предварительной пороговой обработки детализирующих коэффициентов вейвлет-разложения, алгоритм сглаживания временного ряда стоимостных показателей представлен на рисунке 9.

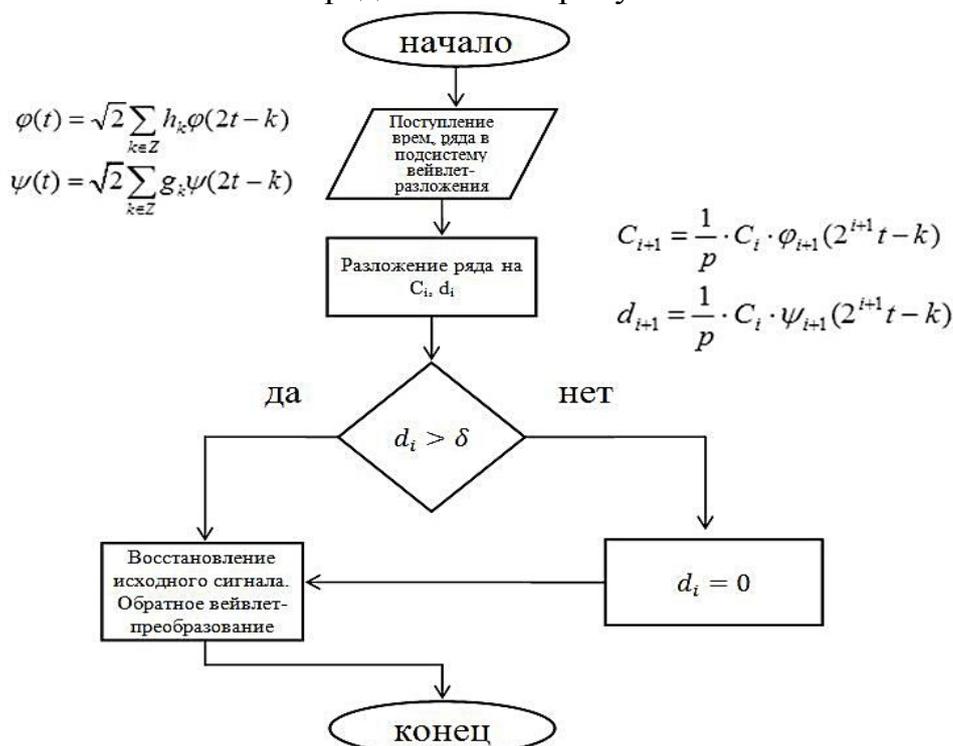


Рисунок 9 – Алгоритм сглаживания, алгоритм пороговой обработки детализирующих коэффициентов

На основании представленных методов была разработана математическая модель предварительной обработки вейвлет-преобразованием отсчетов временных рядов ЦФА. Показано, что предварительная вейвлет-обработка временного ряда стоимостных показателей и применение аппроксимирующих коэффициентов в качестве входных сигналов искусственной нейронной сети (далее ИНС), повышает точность представления данных и понижает ошибку обучения нейронной сети.

Вышеуказанные подходы можно применять в системах управления цифровыми активами, которые становятся все более актуальными с применением блокчейн технологий в экономике.

Алгоритм сглаживания с использованием вейвлет-фильтра при обработке временного ряда стоимостных показателей ЦФА для анализа трендовых и периодических структур (закономерностей) экономических

процессов позволяет снизить погрешность представления данных на 7...9% по сравнению с исходным временным рядом.

4. Разработан метод автоматизированного мониторинга цифровых финансовых активов, базирующийся на вейвлет-преобразовании временных рядов с предварительной пороговой обработкой детализирующих коэффициентов, позволяющий понизить флуктуации высокочастотных компонентов временного ряда для его дальнейшего анализа.

Для понижения высокочастотных флуктуаций, учитывающих широкую вариативность, задачу можно свести к поиску оценок $\overline{d_{ji}}$ истинных коэффициентов детализации d_{ji} . Подобное оценивание, осуществляемое на основе эмпирических коэффициентов d_{ji}^* и заданного значение порога δ_j , представляет собой построение регрессионной модели оценок истинных коэффициентов:

$$\overline{d_{ji}} = d_{ji}^* + \phi(d_{ji}^*, \delta_j),$$

где $\phi(d_{ji}^*, \delta_j)$ - остаточный член функции трешолдинга, записанный в общем виде.

После обработки временного ряда становится возможным точнее выделить трендовые основополагающие движения относительно шумовых и паразитных всплесков. Становится возможным яснее представлять локальные и глобальные тренды, составлять более репрезентативную выборку для обучения искусственной нейронной сети, выявлять волновые закономерности и другие технико-экономические закономерности.

Адаптивный штрафной порог вычисляется как $\delta = \sigma \sqrt{2 \ln N}$,

где N - число отсчетов, $\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (x_k - \hat{x}_k)^2}$ - стандартное отклонение помех временного ряда.

Среднее квадратическое отклонение можно найти с применением критерия, предложенного Донохо и Джонсоном:

$$\sigma = \frac{\text{median}(d_{jk})}{0,6745},$$

$\text{median}(d_{jk})$ - медиана ряда детализирующих коэффициентов последнего уровня разложения j .

Проведена многокритериальная оценка результатов сглаживания и прогнозирования. Результаты сглаживания по различным методам приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты сглаживания с применением различных критериев

	Исходный сигнал до фильтрации	Критерий Штейна	Эвристический критерий Штейна	Минимаксный критерий	Критерий адаптивного штрафного порога
Мощность P вх. сигн.	5,608	5,608	5,608	5,608	5,608
Мощность P вх. шума.	0,215	0,215	0,215	0,215	0,215
ОСШ _{вх}	26,084	-	-	-	-
Мощность P вых. сигн.	-	5,546	5,580	5,521	5,605
Мощность P вых. шума.	-	0,153	0,187	0,128	0,119
ОСШ _{вых}	26,084	36,248	29,839	43,133	46,747
ОСШ _{вых} , дБ	14,16	15,59	14,48	16,48	16,69

В таблице 1, в графе с критерием адаптивного штрафного порога представлены полученные расчетные данные результатов пороговой обработки при сглаживании временных рядов. Полученные очищенные ряды подаются на блоки анализа ИНС и технико-экономического анализа.

Метод автоматизированного мониторинга данных стоимостных показателей ПА цифровой экономики позволяет произвести предварительную обработку временных рядов с трешолдингом и ослабить помеховые компоненты по критерию сигнал/шум, что обеспечивает снижение риска получения недостоверных данных на 7% при технико-экономическом прогнозировании стоимостных показателей.

5. Разработан алгоритм прогнозирования стоимостных показателей, объединяющий технико-экономический анализ, аппараты искусственных нейронных сетей и регрессионного анализа.

Задача прогнозирования заключается в нахождении с необходимой точностью будущих значений временного ряда. При этом нахождение будущих значений временного ряда осуществляется по его предшествующим, полученным из эксперимента, значениям $\tilde{x}(\vartheta) = x(\vartheta) + n(\vartheta)$, $\vartheta \in (-G - D + t, t]$, где $n(\vartheta)$ – погрешность измерения и D – глубина прогноза, требования к которой выбираются исходя из предъявляемой к модели точности.

Регрессионный метод прогнозирования временных рядов Дж. Бокса позволяет свести задачу обучения к задаче минимизации выражения:

$$\langle \|g(\tilde{x}, a) - \hat{x}\|^2 \rangle = E \int_{t-D}^t |g(\tilde{x}(\vartheta), a) - \tilde{x}(\vartheta)|^2 d\vartheta,$$

где E – символ математического ожидания; $g(\tilde{x}(\tau), a) = \sum_{k=1}^m a_k \varphi_k(\tau)$.

Коэффициенты a_k этой функции находятся либо из условия

$$E \int_{t-D}^t |g(\tilde{x}(\vartheta), a) - \tilde{x}(\vartheta)|^2 d\vartheta \rightarrow \min, \text{ либо из условия } E \int_{t-D-G}^t |g(\tilde{x}(\vartheta), a) - \tilde{x}(\vartheta)|^2 d\vartheta \rightarrow \min.$$

Для дискретных временных рядов символы интегралов заменяются суммами. Аппроксимация временного ряда выражением $x(t) = \sum_{k=1}^m a_k \varphi_k(t)$ позволяет решить задачу методом наименьших квадратов.

Достоинством такого подхода является, с одной стороны, возможность учесть присущую временному ряду его естественную динамику, но с другой стороны в этом случае возникают проблемы выбора уравнения. Путем решения этой проблемы является представление ряда уравнениями в нормальной форме Коши.

Горизонт прогнозирования любой модели зависит от того, насколько достоверно эта модель воспроизводит динамику временного ряда или системы, порождающей наблюдаемый процесс. Поэтому в этой части работы исследуется вопрос о горизонте прогнозирования на основе модели искусственной нейронной сети. Проблема заключается в том, насколько точно динамика процесса может быть представлена весовыми коэффициентами сети. Поэтому обратные связи формируются алгоритмами обучения методом обратного распространения ошибки.

При решении задач прогноза выходами сети в пределах одного цикла её функционирования являются результаты предсказания временного ряда или процесса на заданное число шагов вперёд, начиная с 1 и кончая $p_{\text{вых.сл.}}$ (число нейронов в выходном слое сети).

Разработанный алгоритм обучения методом обратного распространения ошибки при прогнозировании изменения значений исследуемой функции, реализуемый нейронной сетью, построенной по правилу многослойного персептрона пошагово приведен в таблице 2.

Таблица 2 – Алгоритм обучения многослойного персептрона

Этап обучения	Шаги алгоритма
1. Определение выходов (прямой проход)	$y_j = \begin{pmatrix} \varphi(\mathbf{w}_{j1}^T y_{j-1} + w_{01}^j) \\ \varphi(\mathbf{w}_{j2}^T y_{j-1} + w_{02}^j) \\ \vdots \\ \varphi(\mathbf{w}_{jp_j}^T y_{j-1} + w_{0p_j}^j) \end{pmatrix}, j = 1, 2, \dots; y_0 = C_m$ <p>где $\varphi(\cdot)$ – функция активации, вектор y_0 – это входная последовательность временного ряда $x(n)$.</p>
2. Определение ошибок (обратный проход)	$\mathbf{e}_{j-1} = \mathbf{W}_j \Phi_j \mathbf{e}_j, e_j = \varphi(s_j) - y_j,$ $s_j = \mathbf{W}_j^T y_{j-1} + w_{j0} = (s_{j1}, s_{j2}, \dots, s_{jp_j})^T, \text{ где}$ $w_j = (w_{j1}, w_{j2}, \dots, w_{jp_j}) - \text{матрица весовых синаптических коэффициентов.}$
3. Коррекция синаптических коэффициентов	$w_{jl}(q+1) = w_{jl}(q) - \alpha h_{jl}(s_{jl}) e_{jl} y_{j-1},$ $w_{j0}(q+1) = w_{j0}(q) - \alpha \Phi_j e_j,$ $\Phi_j \equiv \text{diag} \left(\frac{\partial \varphi(s_{j1})}{\partial s_{j1}}, \frac{\partial \varphi(s_{j2})}{\partial s_{j2}}, \dots, \frac{\partial \varphi(s_{jp_j})}{\partial s_{jp_j}} \right) = \frac{\partial \varphi^T(s_j)}{\partial s_j}, h_{jl}(s_{jl}) = \frac{\partial \varphi(s_{jl})}{\partial s_{jl}},$ <p>α - шаг настройки, выбирается в диапазоне $0 < \alpha < 1$.</p>

Структурная схема, реализующая нейросетевое прогнозирование изменений значений параметров функции с её предварительной вейвлет-обработкой, представлена на рисунке 10.

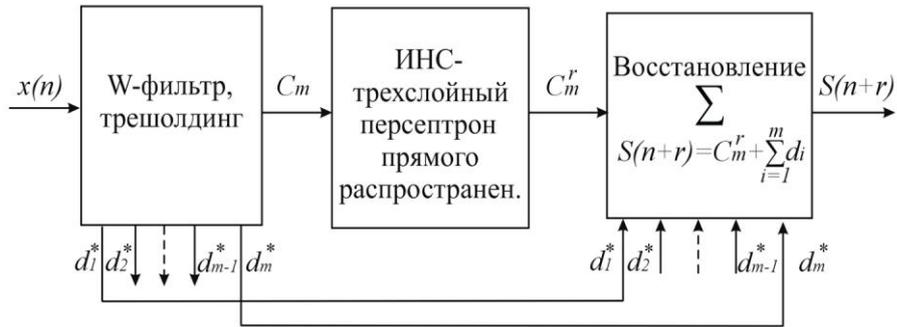


Рисунок – 10 Структурная схема нейросетевого прогнозирования изменений значений функции

Система прогнозирования, реализованная на трехслойном персептроне прямого распространения, получает на вход временной ряд $x(n)$ отсчетов значений процесса.

Число нейронов во входном слое персептрона влияет на число анализируемых входных аппроксимирующих коэффициентов временного ряда $C_m(n)$, соответственно на время анализа предыдущих значений отсчетов исследуемой функции, на общую погрешность прогнозирования. Погрешность прогноза при $r = 10$ достигает $|\bar{\delta}| \leq 5\%$, в случае числа нейронов во входном слое $p_{вх} = 64$, внутреннем слое $p_{внутр} = 10$, выходном слое $p_{вых} = 10$. При уменьшении числа нейронов во входном слое до $p_{вх} = 32$, погрешность повышается до $|\bar{\delta}| \leq (7...10)\%$.

Выходные сигналы с нейронной сети в виде аппроксимирующих коэффициентов C_m^{*r} (где r -номер выхода нейронной сети, в соответствии с числом периодов прогноза $r \in [1, 10]$) также поступает на r -й блок восстановления выходного временного ряда прогноза. На выходе r -х блоков восстановления формируется выходные сигналы прогноза в виде временного ряда $s(n+r)$:

$$s(n+r) = \frac{1}{p} \left[\sum_n x(n) \psi_1(2t-n) + \sum_n \sum_{i=2}^m C_{i-1} \cdot \psi_1(2^i t - n) + \sum_n C_m^{*r} \right], \quad (15)$$

где r – число периодов времени прогноза, время прогноза определяется выражением $t_{прогн.} = rT$.

В полученном выражении (15) благодаря предварительной вейвлет-обработке в W-фильтре, существенно ослабляются флуктуации входного сигнала $x(n)$ за счет формирования аппроксимирующих коэффициентов m -го уровня C_m и подавляются компоненты шума, имеющие место во входном сигнале, путем обработки детализирующих коэффициентов алгоритмом сглаживания, что заметно снижает погрешность представления информации.

Полученный очищенный от помех обработанный выходной временной ряд в реальном времени и обработанный выходной временной ряд прогноза представляют информацию в устройствах отображения и в системах принятий решений с более высокой точностью. Разработанный алгоритм нейросетевого

прогнозирования изменения параметров временного ряда может быть реализован в различных программных средах, таких как MatLab, Scilab, NeurophStudio и Python.

Ошибки прогноза зависят от того, насколько размеры входного слоя ИНС соответствуют характерному значению интервала временного ряда, по которому можно восстановить его динамику, что подтверждается графиками на рисунках 11 и 12.

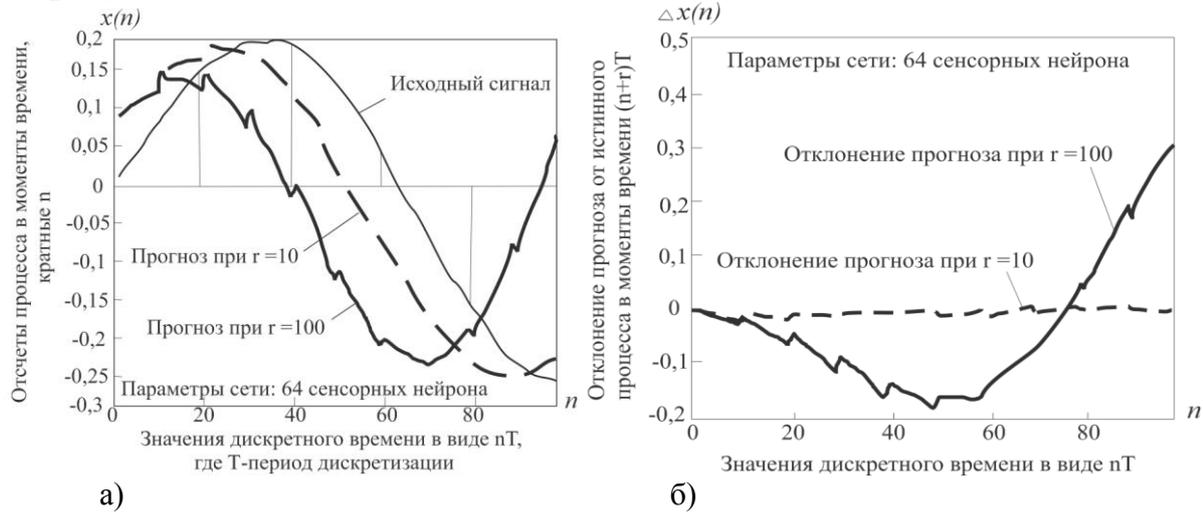


Рисунок – 11 Результаты отклонения прогноза от исследуемого процесса при размере сенсорного слоя 64 нейрона

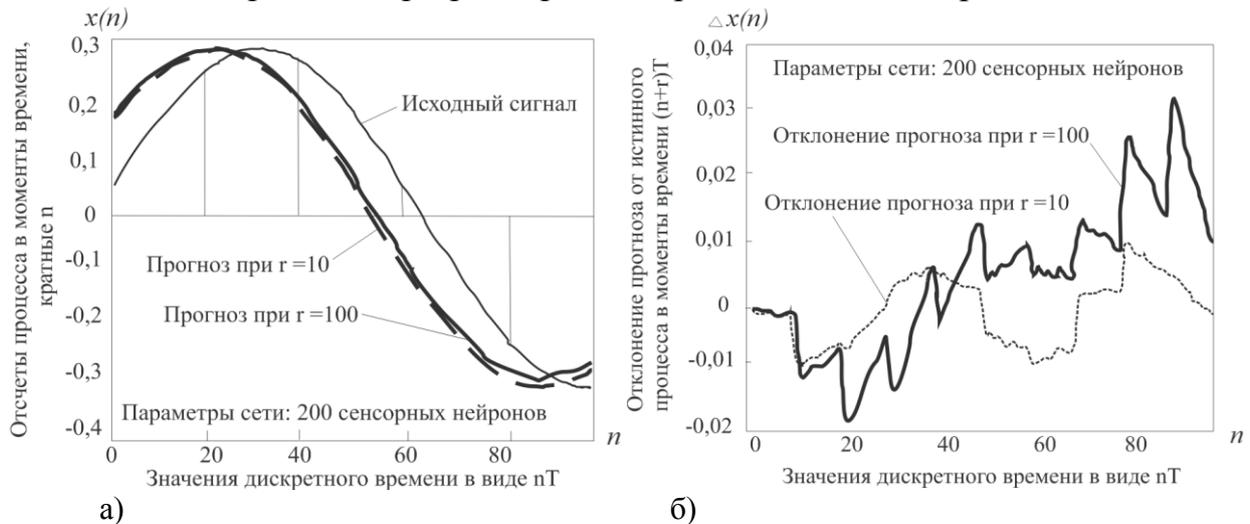


Рисунок – 12 Результаты отклонения прогноза от исследуемого процесса при размере сенсорного слоя 200 нейронов

Из рисунков 11 и 12 видно, что увеличение числа нейронов в первом (сенсорном) слое способствует увеличению горизонта и уменьшению отклонения прогноза от исследуемого процесса. Если для сети с 64-мя сенсорными нейронами (110 нейронов внутренний слой и 10 нейронов выходной слой) горизонт предсказания может быть принят равным в пределах $10T$ - $20T$ (рисунок 11), то в случае 200 сенсорных нейронов (110 нейронов внутренний слой и 10 нейронов выходной слой), горизонт увеличивается до $100T$ (рисунок 12).

Результат моделирования и применения разработанного алгоритма заключается в повышении параметров результата прогнозирования изменений значений исследуемых функций по показателям длительности и погрешности получения прогноза, а также быстродействия, адаптивности системы при изменяющихся условиях.

Чтобы повысить эффективность всей системы прогнозирования стоимостных показателей необходимо рассматривать временной ряд как экономический процесс, в котором с разной вероятностью через произвольные временные интервалы появляются технические фигуры. В таком случае, ИНС позволит получить не только направление, но и возможно опорные реперные точки разворота и/или изменения динамики движения цены. Для этого предлагается использоваться волновой технико-экономический анализ.

Алгоритм автоматизации правил технико-экономического анализа (рисунки 13-14) методом волновой разметки в комбинированном алгоритме на базе ИНС позволяет получить динамичную вероятностную оценку текущей рыночной ситуации.

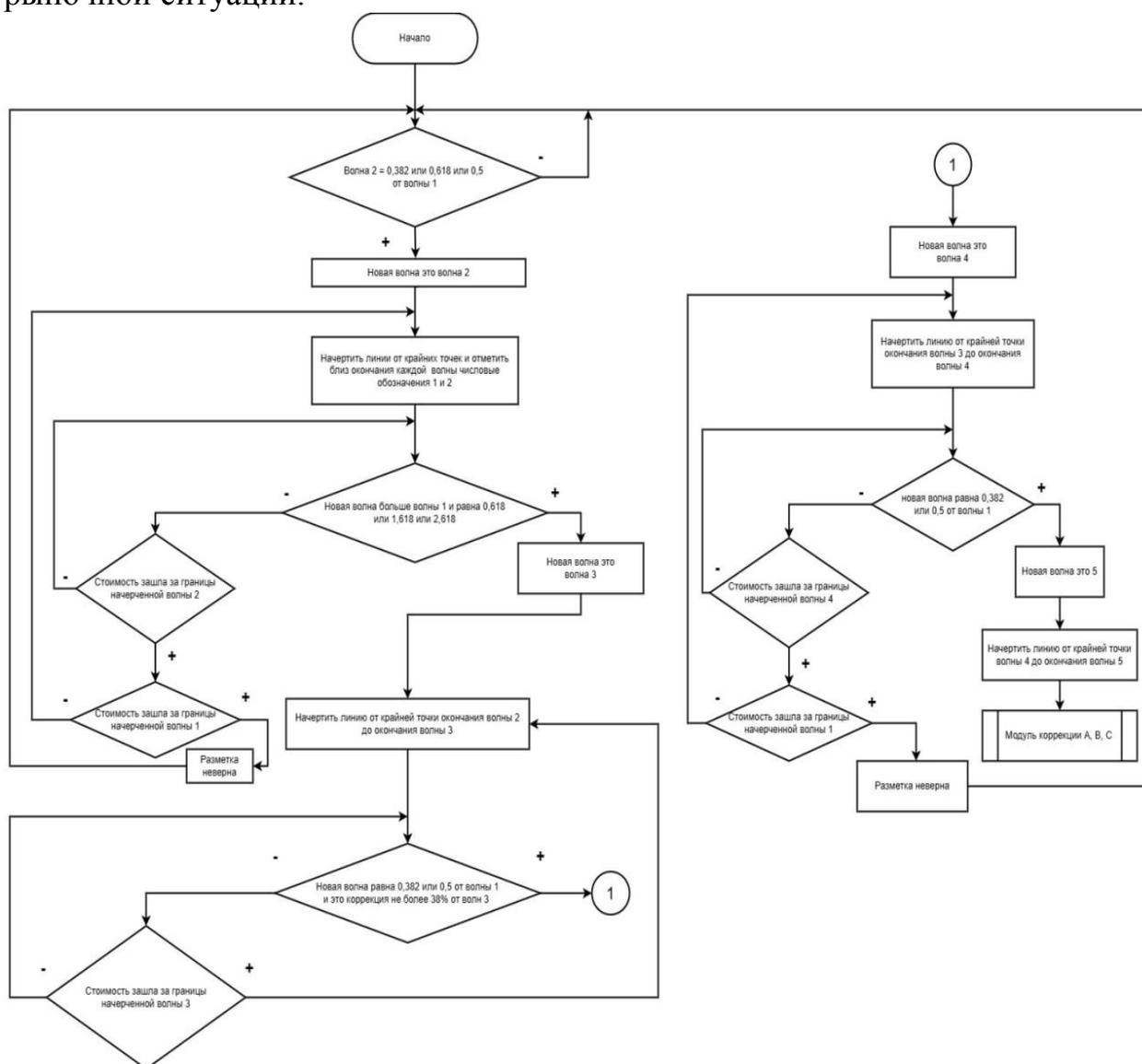


Рисунок 13 – Алгоритм построения волн основного импульса

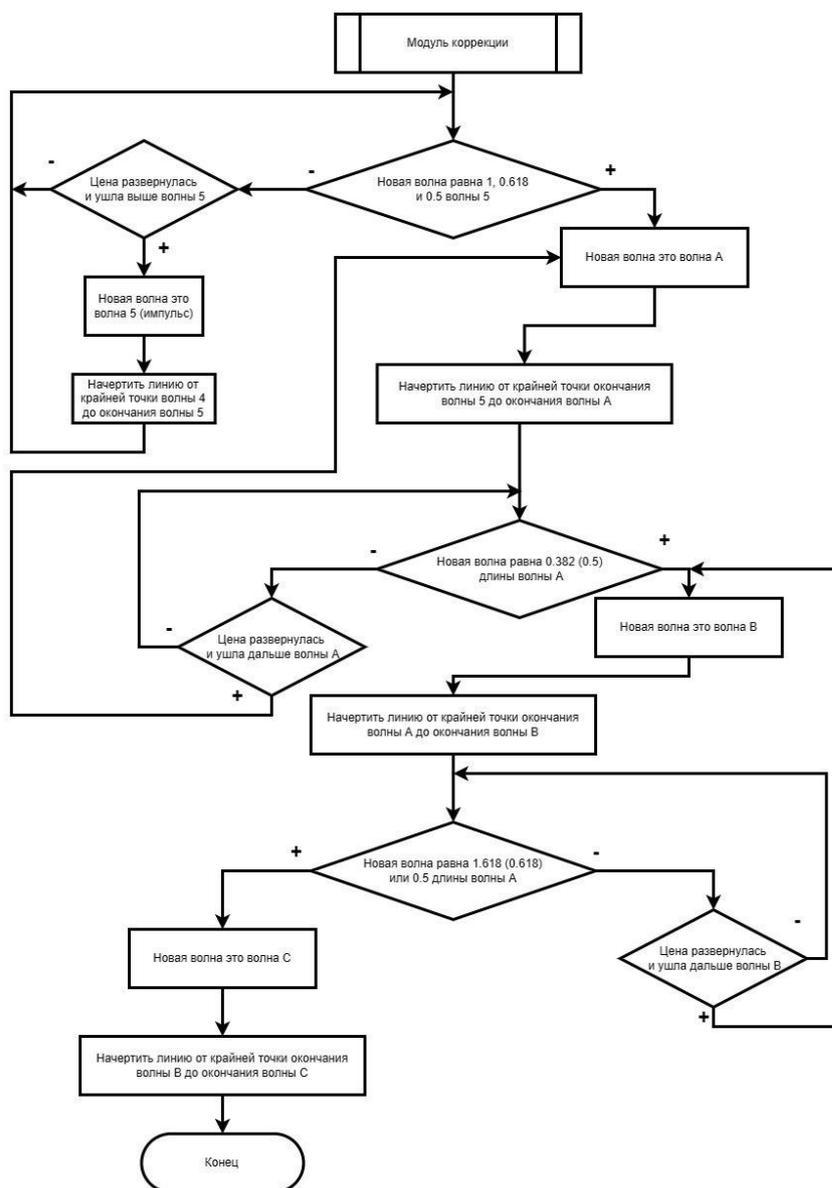


Рисунок 14 – Алгоритм выявления коррекционных волн

В результате выполнения алгоритма волновой разметки становится возможным проведения технико-экономического анализа для повышения эффективности прогноза.

Алгоритм прогнозирования на основе структурной схемы с обратной связью представлен в таблице 3.

Таблица 3 – Алгоритм прогнозирования по схеме с обратной связью

Операция	Выполняемое действие
1	Формируется массив данных $x(t) = x(n \cdot \Delta t)$
2	Задаются параметры обучения: шаг настройки $\alpha < 1$, $\alpha \in \{0,1; 0,2; \dots, 0,9\}$ и число итераций в циклах обучения
3	Осуществляется выбор блока данных обучения $D(k)$
4	С помощью алгоритма обратного распространения ошибки производится N циклов обучения – по формулам типа $w(k+1) = w(k) - \alpha G(k)$, $k = 0, 1, \dots, N$, определяются коэффициенты нейронной сети
5	Задается глубина (число блоков) предсказания M ($= 10$)

6	Осуществляется выбор блока данных предсказания $D(l+1) = D(k+1)$
7	Осуществляется предсказание блока данных $\hat{Y}(l+1)$
8	Осуществляется модификация блока данных: $D(l+1) \rightarrow [\bar{D}(l+1); \hat{Y}(l+1)]$
9	Осуществляется переход к следующему шагу предсказания: $l = l+1$, $l = 1, 2, \dots, M-1$
10	Осуществляется переход к операции 7, если $l < M$
11	По достижении условия $l = M$ осуществляется переход к операции 3 с заменой $k \rightarrow k+l$, $l \leq M$

Алгоритм прогнозирования на основе структурной схемы с нейронной сетью прямого распространения представлен в таблице 4.

Таблица 4 – Алгоритм прогнозирования на основе ИНС

Операция	Выполняемое действие
1	Формируется массив данных $x(t) = x(n \cdot \Delta t)$
2	Задаются параметры обучения: шаг настройки $\alpha < 1$, $\alpha \in \{0,1; 0,2; \dots, 0,9\}$ и число итераций в циклах обучения
3	Осуществляется выбор блока данных обучения $D(k)$
4	С помощью алгоритма обратного распространения ошибки производится N циклов обучения – по формулам типа $w(k+1) = w(k) - \alpha G(k)$, $k = 0, 1, \dots, N$, определяются коэффициенты нейронной сети
5	Осуществляется выбор блока данных предсказания $D(k+1)$
6	Осуществляется предсказание блока данных $\hat{Y}(k+1)$
7	Осуществляется переход к следующему шагу предсказания: $k = k+1$
8	Осуществляется переход к операции 3

Из таблиц 3-4 видно, что реализация алгоритма с НС прямого распространения осуществляется с меньшими вычислительными затратами.

Алгоритм прогнозирования, реализованный на базе ИНС совместно с предварительной wavelet-обработкой позволяет повысить точность прогнозирования изменений данных временного ряда стоимостных показателей до 77-86% и расширить горизонт предсказания на 20-30% по сравнению с известными системами и методами.

6. Разработан метод трендового управления ЦФА, отличающийся принятием управляющего решения в соответствии с трендами, независимо от полярности рынка.

Стратегия реализуется двумя подходами к управлению: первый предусматривает беспрогнозное принятие решения в соответствии с трендами. Общая концептуальная схема управления активом в исследуемой работе представлена на рисунке 15 в виде brnp-диаграммы.

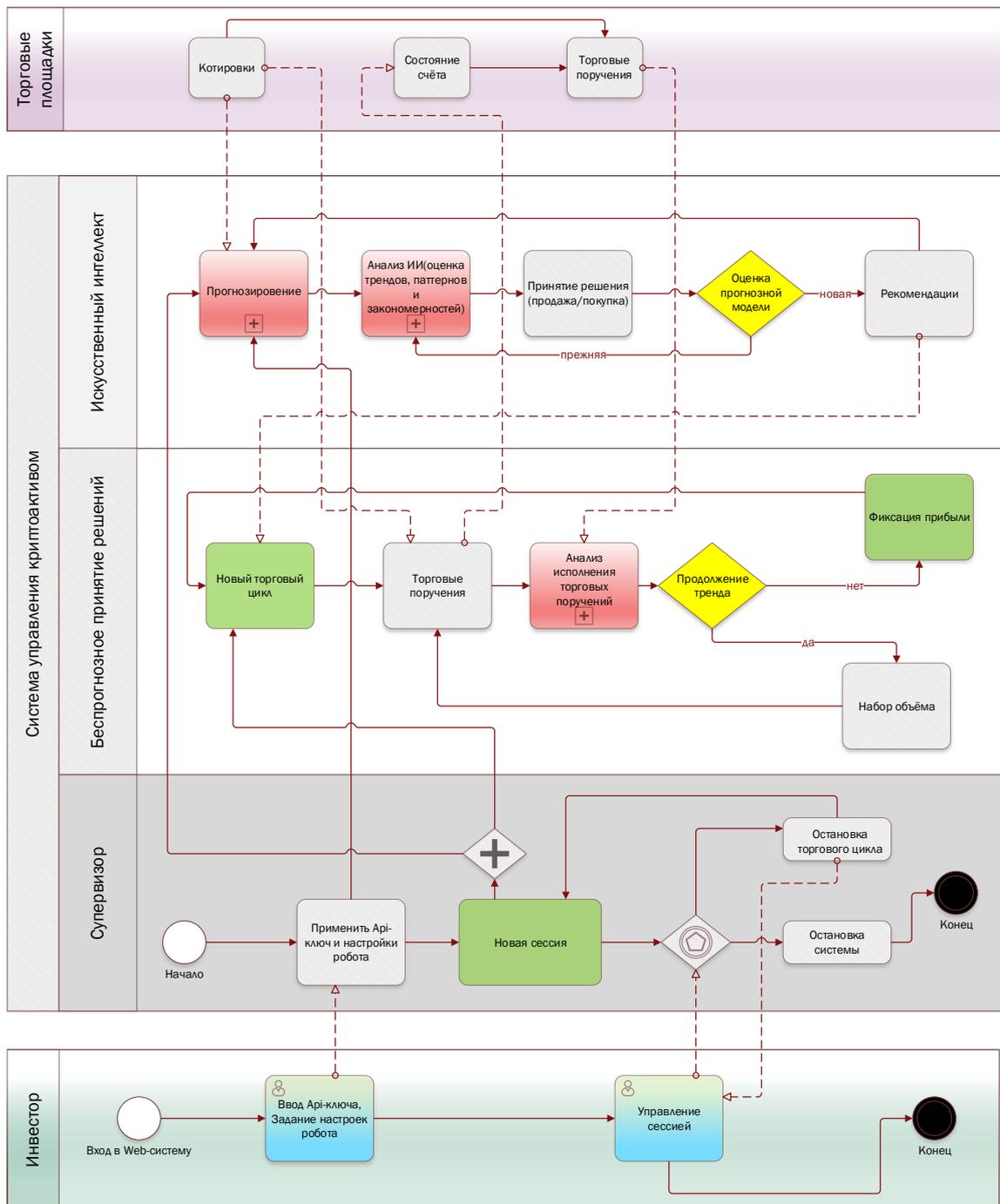


Рисунок 15 – Общая концептуальная схема управления активом

Реализация такого подхода эффективна в том случае, если созданная система не чувствительна к полярности движения рынка хотя бы в стартовом околонулевом моменте инициализации. Фундаментальный недостаток такого подхода заключается в том, что эффективность неизменно сокращается при долгосрочном однополярном движении рынка. В таком случае если полярность тренда отрицательная, то при дальнейшем обесценивании актива система будет вынуждена простаивать до тех пор, пока тренд не сменит полярность и не достигнет уровней основных сделок цикла. При достаточной ликвидности актива, этот риск при оптимизированных параметрах можно свести к минимуму. В противном случае, если тренд положительной

полярности и возникли многократные интенсивные импульсы вверх, на которых выполнялась полная распродажа, существует риск остановки системы и невозможности открытия нового цикла, вызванного вероятностью закрепления рынка выше уровней основных сделок цикла.

Второй подход к управлению ЦФА реализуется с помощью прогнозирования и анализа ИИ на базе искусственной нейронной сети. Нейросеть в зависимости от текущей ситуации на рынке анализирует входной временной ряд, выявляя при этом паттерны и закономерности. На основе полученной информации производится вероятностная оценка каждой из возможных закономерностей и выносятся рекомендации к принятию решения, которое может быть исполнено автоматически, если оператор системы делегирует право управления активом и доступ к нему.

Исходя из обоснованного выше предположения, что рынок невозможно предсказать, была предложена беспрогнозная модель принятия решения в общей концепции (рисунок 15) системы автоматизированного управления цифровыми активами. Ее реализация не должна быть чувствительна к полярности рынка, т.е. эффективной при любом движении рынка, как при падении, так и при росте. Управление активом при сформировавшемся тренде является технически и математически решаемой задачей на спотовом рынке цифровых активов. Если это падение, то необходимо осуществлять покупку актива с заданной периодикой, учитывая дальнейшее возможное движение вниз таким образом, чтобы не израсходовать базовый актив раньше, чем завершится тренд. При этом требуется вести подсчет средней цены покупки с учетом объемов каждой сделки на всех этапах (операций), то есть среднее взвешенное ряда исполненных торговых операций.

После расчёта средневзвешенной стоимости купленного актива, становится возможным выставить контрордер на продажу с учетом потенциальной прибыли, например, в 5%. Если же цена продолжает снижаться, то выполняется следующий ордер покупки, при этом ордер на продажу отменяется, рассчитывается новая средняя, и выставляется соответственно новый ордер на продажу. Аналогично функционирует стратегия при возрастающем тренде, только ордера набора объема – продажи, а фиксация прибыли осуществляется покупкой (контрордер). Приведенная модель имеет важное преимущество – практически полное отсутствие риска, так как реализована на не маржинальном рынке и рисков потерь при усреднении не несет, а существует только риск неполученной прибыли. При этом существует два фундаментальных ограничения, это невозможность предсказать глубину тренда и направление. Так как применяемый подход исключает возможность прогноза, то глубину тренда определить невозможно, как и направление. Однако, можно реализовать систему таким образом, что будет использоваться две стратегии одновременно, переключаясь в зависимости от текущего тренда рынка. В этом случае решается проблема направленности рынка. Но проблему глубины детерминировать также практически невозможно, однако можно рассчитать безопасный расход

депозита эмпирически на исторических данных благодаря синтетических тестам или тестам в режиме реального времени.

Программная реализация модели безпрогнозного принятия решения представлена в виде снимка экрана на рисунке 16, отражающего процесс автоматизированного управления криптоактивом в режиме реального времени на активном биржевом счете.



Рисунок 16 – Визуализация открытого торгового цикла

Как показано на снимке (рисунок 16), движение стоимости криптоактива попадает в коридор, границы которого отражают уровни, при достижении которых, выполнится торговая операция. При пересечении с зеленой линией – покупка, при пересечении с красной – продажа. После этого – новый расчет ордеров продажи и покупки, и, стоимостные границы изменяются (пересчитываются). Состояние робота, цепочка сделок и направление тренда можно отслеживать в поле Status интерфейса робота (рисунок 17).

Status							
	Date	Balance	Price	Trend	Buy	Sell	Result
1	2020-03-23 18:36:33	399792.302 0.57042657	0.00000608	↓	0.00000608 x 9384.17678413	0.0000062 x 39979.2302	409176.47878413 (9384.17678413) 0.51338391 (0.05704266)
2	2020-03-23 20:20:16	409176.47878413 0.51338391	0.00000596	↓	0.00000596 x 10341.74584373	0.00000638 x 9183.08728161	419518.22462786 (10341.74584373) 0.45177784 (0.06160607)
3	2020-03-24 06:49:52	419518.22462786 0.45177784	0.00000578	↓	0.00000578 x 11727.75301867	0.00000626 x 19384.51242853	431245.97764653 (11727.75301867) 0.38401117 (0.06776668)
4	2020-03-25 12:24:22	431245.97764653 0.38401117	0.00000611	412.25691381 0.00307585 ✓	0.00000549 x 13291.45342115	0.0000061 x 31041.41873271	400204.55891381 (31041.41873271) 0.57350242 (0.18949126)
5	2020-03-30 07:29:07	400204.55891381 0.57350242	0.00000604	↓	0.00000604 x 9489.69923965	0.00000617 x 40020.45589138	409694.25815346 (9489.69923965) 0.51615218 (0.05735024)
6	2020-03-30 09:50:23	409694.25815346 0.51615218	0.00000592	↓	0.00000592 x 10458.03589676	0.00000635 x 9286.34854166	420152.29405022 (10458.03589676) 0.45421392 (0.06193826)
7	2020-03-30 10:23:58	420152.29405022 0.45421392	0.00000574	↓	0.00000574 x 11859.62833653	0.00000622 x 19602.48587443	432011.92238675 (11859.62833653) 0.38608183 (0.06813209)
8	2020-03-30 18:05:39	432011.92238675 0.38608183	0.00000546	↓	0.00000546 x 13440.91211473	0.00000607 x 31390.4708449	445452.83450149 (13440.91211473) 0.31272628 (0.07335555)

Рисунок 17 – Цепочка сделок торгового робота

Как видно из рисунка 17, 25 марта произошло закрытие торгового цикла продаж с зафиксированной прибылью 412 единиц базового и 0.003 единицы котироваемого актива, что подтверждается списком сделок.

К фундаментальным параметрам разработанной системы автоматизированного управления цифровыми активами относятся: шаг цены, объем задействованного депозита и требуемая доходность.

Предлагается следующая классификация роботизированных автоматических систем для торговых операций на рынке ЦФА. Модель А – исходная модель робота без адаптивной подстройки параметров. Модель В – робот с адаптивной подстройкой параметров согласно текущей обстановке на рынке (волатильность, технические индикаторы, активность в СМИ и др.). Модель С – гибридный робот, поддерживающий экстремальные скачки котировок и адаптированный к совершению большого количества сделок за краткосрочный интервал времени – HFT (high frequency trading, высокочастотный трейдинг).

Дополнительно исследуются вопросы мониторинга стоимостных показателей и контроля стабильности и отказоустойчивости роботов, осуществляющих торговые операции в режиме реального времени. Разработана платформа для моделирования и проведения синтетических тестов поведения робота на исторических временных рядах стоимостных показателей.

Метод трендового управления цифровым активом обеспечивает получение 0.3...1% депозитарного объема при выполнении торгового цикла.

7. Разработано программно-методическое обеспечение по управлению ЦФА, которое реализует возможность нахождения оптимальных параметров робота.

Программно-методическое обеспечение представляет собой программную систему автоматизированного трейдинга, платформу для моделирования и численного исследования торговых стратегий, а также методические описания для их использования при управлении цифровыми активами. Это обеспечивает возможность нахождения оптимальных параметров робота, учитывающих динамику рынка.

Существуют инструменты, которые позволяют трейдерам осуществлять торги напрямую, такие как автоматические роботы и высокоинтенсивный (высокочастотный) трейдинг. Роботы используются для автоматизации процесса купли/продажи на биржах, а также минимизации денежных потерь. Подобное программное обеспечение разрабатывается на основе открытого API-интерфейса биржи. Робот позволяет исключить человеческий фактор: он не устаёт, не подвержен влиянию эмоций; позволяет учесть большой объем данных, влияющих на принятие решений; работает непрерывно 24/7/365 и может обрабатывать все движения рынка. Для реализации выбранного подхода трейдер может запустить несколько торговых роботов, реализующих различные стратегии с разными параметрами, осуществляющих управление множеством активов, подключенных к разным биржам.

Поэтому одним из ключевых пунктов реализации практической стороны исследований, является отладка и тестирование прототипа торгового робота. Для этого была проведена разработка, компиляция и тестирование программного кода робота. Также для повышения надежности и отказоустойчивости системы, необходим выделенный автономный сервер с возможным переходом на облачные технологии (Yandex облако, Google Cloud, Amazon Web Services - AWS).

Высокая эффективность разрабатываемой автоматизированной системы подтверждена предварительным тестированием прототипа робота, статистические результаты анализа функционирования которого представлены в работе. Полученный результат достигается при установке робота на облачную виртуальную машину-сервер с бесперебойным, круглосуточным режимом работы, управляемым с помощью персонального компьютера или мобильного устройства из любой точки мира через Интернет.

Автономный торговый робот инструментально реализуется специально разработанным программным обеспечением, которое функционирует при помощи облачных технологий. Логика робота, основанная на разработанных алгоритмах, написана на языке программирования Go с интерфейсом Angular. Приложение, запущенное на облачном вычислителе с активированным торговым роботом, получает доступ к депозитарному счету на бирже посредством API (application programming interface, программный интерфейс приложения). Возможно конфигурирование api-запросов для подключения к новой бирже следуя технической документации. Система предусматривает одновременное функционирование множества торговых роботов на виртуальном сервере. Благодаря этому, оператор имеет возможность активировать управление различных депозитарных счетов разных бирж с разными торговыми парами одновременно на одном сервере. Таким образом, система легко масштабируется и не требует существенных затрат для расширения.

Полученные в результате разработки торговые роботы необходимо подвергнуть тестированию как в режиме реального времени, так и с помощью синтетических тестов. Разработанная модель управления ориентирована на среднечастотный и низкочастотный трейдинг, сделки могут совершаться на длительных интервалах времени и торговый цикл длится от минуты до нескольких недель. Такие «плавающие» интервалы являются мешающим фактором для эмпирического поиска оптимальных параметров и конфигураций в режиме реального времени. Разработанная платформа позволяет рассчитывать эффективность настроек робота при разных рыночных условиях, например, в условиях низкой или напротив, высокой, волатильности, а также в случаях затяжных трендовых движений, резких всплесков и других случайных событий. При этом проводить такие тесты возможно, как на реальных исторических значениях, так и на синтетических сгенерированных временных рядах. В случае синтетически сгенерированных временных рядов осуществляется моделирование движения рынка. Симулируя реальные рыночные состояния возможно оценить эффективность

той или иной настройки работа практически на любой возможной трендовой динамике. Однако, становится затруднительным смоделировать рыночную симуляцию, идентичную реальной поведенческой модели, так как рынки постоянно находятся в состоянии неопределённости, а механизмы симуляции для такого моделирования четко определены, хоть и снабжены элементами случайности.

Применив настройки на определенных исторических значениях котировок, можно предсказать подобные паттерны в будущем на основании накопленного опыта и тем самым определить эффективность разработанной системы в перспективе. Таким образом, в первом случае создается «искусственный» рынок, а во втором исследуются разработанные модели в разных конфигурациях на базе исторических значений (рисунок 18).



Рисунок 18 – Визуализация торговой сессии в платформе для моделирования и численного исследования

Разработанная система автоматизированного управления депозитом цифровых активов реализована для бесперебойного выполнения операций в режиме реального времени, останавливаясь только по требованию оператора в случае, например, обновления системы или действий над портфелем.

Высокая отказоустойчивость, а также стабильный продублированный канал связи является обязательным требованием для успешного и эффективного применения практической стороны реализуемого исследования. Современные облачные технологии предлагают подходящие вычислительные независимые динамически адаптивно масштабируемые мощности для выполнения программных процессов постоянно в режиме реального времени.

В итоге система имеет клиент-серверную архитектуру, как представлено на рисунке 19, в которой пользователь с любого устройства (мобильный компьютер или смартфон) при помощи браузера сможет получить актуальный прогноз по интересующему финансовому инструменту. Хранение временных рядов данных и обращение к ним осуществляется посредством специализированной базы данных Influx DB, основным назначением которой

является хранение больших объемов данных с метками времени, например, данных мониторинга.

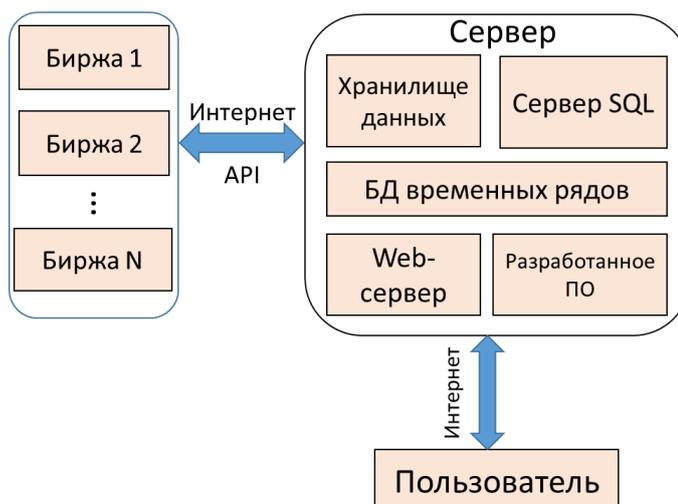


Рисунок 19 – Архитектура системы

Связь системы с биржей устанавливается с помощью api протокола, в котором прописаны конкретные команды биржи для каждого инструмента. Производя расчет на облачном вычислителе, система посылает команду на совершение сделки. Это может быть отмена ордера или выставление нового, который система только что рассчитала в зависимости от состояния рынка и ранее выполненных сделок. На рисунке 20 представлена схема обмена данными внутри системы и с подключаемыми пользователями.



Рисунок 20 – Схема взаимодействия компонент системы

Для управления, администрирования, контроля и запуска новой сессии требуется команда оператора. Оператор выполняет функции запуска и остановки системы, корректировки параметров. Остановка системы может быть вызвана необходимостью обновления ядра программного обеспечения, так и при пополнении и выводе депозита, подстройке параметров или в случае сбоя. Последнее может быть вызвано ошибочным ответом биржи, например, с указанием несуществующей цены или проблемами со связью, другой непредвиденной технической ситуацией на рынке.

После запуска сессии система работает до тех пор, пока оператор не выполнит остановку. При этом система пошлет команду бирже и активные

выставленные ордера будут автоматически сняты. Корректировка вектора параметров допускается только на остановленной системе. Также при изменении депозита требуется делать остановку и разбалансировку, хотя система может работать дальше и без этого. В дальнейшем программные обновления позволят менять параметры динамично в активной сессии и осуществлять снятие и пополнение средств «на горячую».

Для контроля за состоянием системы и выполнением биржевых сделок используются два инструмента. Первый инструмент – это web-интерфейс системы для непосредственного мониторинга (контроля и управления), второй – подсистема оповещений о выполненных сделках или ошибках. Подсистема уведомлений имеет только функцию оповещения, однако управление возможно добавить в качестве опции в перспективе. В качестве подсистемы оповещения может использоваться мессенджер с доступным, открытым и подходящим API набором команд, например, Telegram.

Программно-методическое обеспечение системы управления инвестиционно-финансовыми активами цифровой экономики позволяет производить численное исследование и моделирование синтетических тестов торговых стратегий на исторических значениях стоимостных показателей для оценки реакции системы и ее эффективности при разных настройках, что обеспечивает возможность адаптивной подстройки параметров работы с учетом динамики рынка (волатильности, волн, закономерностей и др.).

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Получены результаты исследования группы цифровых валют, отличающиеся сравнительным анализом криптоактивов, позволяющие провести оценку их влияния на эффективность управления инвестиционным портфелем. Рассмотрен как материнский биткоин, так и его производные единицы.

2. Создана методология проектирования систем управления цифровыми финансовыми активами, отличающаяся применением гибридного метода беспрогнозного принятия решений, позволяющая повысить доходность ПА и минимизировать риски потери покупательской способности актива.

3. Разработана математическая модель временных рядов, информационных функций и сигналов, отличающаяся возможностью обработки динамично изменяющихся нестационарных временных рядов уровней стоимостных показателей ПА, позволяющая представить трендовые структуры и закономерности.

4. Разработан алгоритм сглаживания временного ряда с использованием вейвлет-обработки для анализа трендовых и периодических структур в экономических процессах, который позволяет снизить погрешность представления данных на 7...9% по сравнению с исходным рядом.

5. Создан метод автоматизированного мониторинга, отличающийся возможностью регистрации и предварительной обработки временных рядов

данных стоимостных показателей ПА, позволяющий ослабить случайные вариационные компоненты по критерию сигнал/шум.

6. Метод автоматизированного мониторинга данных стоимостных показателей ПА позволяет произвести предварительную обработку временных рядов с трешолдингом, что обеспечивает снижение риска получения недостоверных данных на 7% при прогнозировании стоимостных показателей.

7. Разработан алгоритм прогнозирования значений временных рядов, отличающийся объединением подходов искусственного интеллекта, регрессионного анализа и технико-экономического анализа, позволяющий повысить эффективность выявления закономерностей изменения рынка.

8. Алгоритм прогнозирования, реализованный на базе ИНС совместно с предварительной вейвлет-обработкой позволяет повысить точность прогнозирования стоимостных показателей до 77-86% и расширить горизонт предсказания на 20-30% по сравнению с известными системами и методами. Помимо прогнозирования тренда временных рядов стоимостных показателей, становится возможным прогнозирование экономико-технических фигур и паттернов.

9. Метод трендового управления цифровыми валютами при выполнении торгового цикла обеспечивает прирост депозитарного объема в интервале от 0,3 до 1 % в зависимости от задаваемых параметров.

10. Методология позволяет проектировать системы управления цифровыми финансовыми активами, обеспечивающие динамичное распределение и хеджирование рисков обесценивания ПА. Реализованная система генерирует от 12% до 40% прибыли совокупно в базовом и котируемом активе за 1 год.

11. Программно-методическое обеспечение системы управления цифровыми финансовыми активами позволяет производить численное исследование и моделирование синтетических тестов торговых стратегий на исторических значениях стоимостных показателей для оценки реакции системы и ее эффективности при разных условиях, что обеспечивает возможность адаптивной регулировки параметров работы с учетом динамики рынка (волатильности, волн, закономерностей и др.).

Проведенные исследования позволяют предупреждать и минимизировать финансовые риски потери покупательской способности инвестиционного ПА. Для своевременного формирования управляющих решений возможно использование полученных результатов исследований в других прикладных направлениях, где применим анализ временных рядов.

Реализованный подход управления инвестициями ориентирован применительно непосредственно к спотовому рынку новейшего класса активов цифровой экономики, что позволяет контролировать финансовые риски. К потенциально слабым сторонам системы можно отнести возможные удлинения временных интервалов торговых циклов, что приводит к затяжному закрытию цикла, но как правило исключает потери. Это связано с

циклической активностью рынков и является неизбежным повторяющимся нестационарным случайным явлением.

Реализованная система работает в реальном времени на криптоактивах в тестовом режиме с 2017 года. В третьем квартале 2018 программное обеспечение доработано для осуществления торговых операций без использования стороннего программного обеспечения. В штатном режиме система введена в строй автономно с января 2019 г.

Предложенная в работе структурная схема реализации нейросетевого прогнозирования изменений параметров временных рядов и непрерывных функций с предварительной вейвлет-обработкой обеспечивает возможность более эффективного мониторинга исследуемых процессов в экономических системах. Также, в дальнейшем с помощью ИНС становится возможным прогнозировать временной ряд экономического процесса, выявляя технико-экономические фигуры с динамической вероятностной оценкой. В таком случае, ИНС позволит получить не только направление, но и опорные реперные точки разворота и изменения тренда движения цены.

Благодаря адаптивному web-интерфейсу, возможно вести удаленный мониторинг с любого устройства с доступом в глобальную сеть Интернет, независимо от вида операционной системы.

С помощью разработанных алгоритмов исследованы массивы стоимостных показателей и проведена оценка экономического эффекта разработки. В работе задействован аппарат статистического анализа, вейвлет-обработки, реализованы искусственные нейронные сети и множество программных комплексных решений с применением последних языков программирования, web-разработки и облачных вычислений.

Продолжаются научно-исследовательские работы по созданию гибридной и высокочастотной HFT (high frequency trading, высокочастотный трейдинг) модели автоматической системы управления для всё увеличивающегося обращения активов цифровой экономики. Это позволяет повысить эффективность разработанной и исследованной беспрогнозной модели, нивелируя временные и расчетные задержки. Техническое совершенствование существующих торговых платформ и сетевых линий связи, которые в настоящее время накладывают определённые ограничения, позволит более полно раскрыть потенциал реализованной модели управления.

Применение реализованных и продолжающихся исследований дает возможность проводить эффективные биржевые операции в режиме реального времени на основе взаимодействия с мировыми торговыми площадками. Также, результаты исследований сопутствуют более повсеместной интеграции технологии блокчейн, повышению инвестиционной культуры и решению проблемы эффективного управления активами цифровой экономики в России.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых научных изданиях

1. Проскуряков А.Ю. Моделирование и верификация алгоритмов роботизированных торговых систем для управления криптоактивами. // Экономика строительства. 2023. № 8. С. 42-47. http://www.econom-journal.ru/archive/?ELEMENT_ID=53480 – 0,375 п. л.
2. Проскуряков А.Ю., Ермолаев В.А., Бейлекчи Д.В. Сглаживание и предсказание экономических процессов с неопределенными параметрами // Цифровая экономика, 2(23)2023, Москва, 2023, с.58-64. DOI: 10.34706/DE-2023-02-07. – 0,4375 п. л. (авт. – 0,15 п. л.)
3. Проскуряков А.Ю., Ермолаев В.А. Об инвариантности и чувствительности параметров математических моделей экономических систем // Развитие территорий. 2023;(2 (32)):8-14. <https://doi.org/10.32324/2412-8945-2023-2-08-14>. – 0,4375 п. л. (авт. – 0,22 п. л.).
4. Проскуряков А.Ю. Аспекты создания методологии управления цифровыми финансовыми активами // Статистика и Экономика. 2023;20(4):44-54. <https://doi.org/10.21686/2500-3925-2023-4-44-54>. – 0,6875 п. л.
5. Проскуряков А.Ю. Инструментальные особенности реализации систем управления торговыми операциями над ЦФА. // Инновации и инвестиции. 2023. № 7. С. 421-427. – 0,4375 п. л. <http://www.innovazia.ru/upload/iblock/a27/4buabop51gb25r6rwoi7grga629lbyue/%E2%84%967%202023%20%D0%98%D0%B8>
6. Проскуряков А.Ю. О вариационном подходе и принципе максимума в теории динамических систем // Вестник Российского экономического университета имени Г. В. Плеханова. 2023;(5):14-24. – 0,6875 п. л.
7. Проскуряков А.Ю. Моделирование экономических систем цифровых финансовых активов: задачи стабилизации и управления в условиях неопределенности // Научно-технические технологии. 2023. Т. 24. № 4. С. 73–80. DOI: <https://doi.org/10.18127/j19998465-202304-08>. – 0,5 п. л.
8. Проскуряков А.Ю. Функционально-дифференциальные модели экономических игр с запаздыванием в условиях цифровых технологий / А.Ю. Проскуряков, В.А. Ермолаев // Журнал «РИСК: Ресурсы, Информация, Снабжение, Конкуренция», 2021. – №1. – С. 99-102. – 0,25 п. л. (авт. – 0,13 п. л.)
9. Проскуряков А.Ю. Построение моделей систем обмена информацией с дискретным и распределённым запаздыванием и задержанной обратной связью / В.А. Ермолаев, Ю.А. Кропотов, А.Ю. Проскуряков // Компьютерная оптика – 2020. – Т. 44, № 3. – С. 454-465. – DOI: 10.18287/2412-6179-СО-655. – 0,75 п. л. (авт. – 0,25 п. л.)
10. Проскуряков А. Ю. Исследование вопросов моделирования систем обмена информацией с дискретным и распределённым запаздыванием и задержанной обратной связью / А.Ю. Проскуряков, А.А. Белов, В.А. Ермолаев, Ю.А. Кропотов // Системы управления, связи и безопасности. 2019. – №3. – С. 220-238. – DOI: 10.24411/2410-9916-2019-10311. – 1,1875 п. л. (авт. – 0,3 п. л.)

11. Проскуряков А.Ю. Прогнозирование изменений параметров временных рядов в цифровых информационно-управляющих системах / А.Ю. Проскуряков, А.А. Белов, Ю.А. Кропотов // Информационные системы и технологии. 2019. №6(116). С. 55-65. – 0,6875 п. л. (авт. – 0,23 п.л.)

12. Проскуряков А.Ю. Обработка временных рядов с применением вейвлет-преобразований для повышения точности представления информации / А.Ю. Проскуряков, Ю.А. Кропотов, А.А. Белов // Вестник Брянского государственного технического университета. 2018. № 8 (69). С. 67-75. – 0,5625 п. л. (авт. – 0,19 п.л.)

13. Проскуряков А.Ю. Метод прогнозирования изменений параметров временных рядов в цифровых информационно-управляющих системах / А.Ю. Проскуряков, Ю.А. Кропотов, А.А. Белов // Компьютерная оптика. 2018. том. 42. № 6. С. 1093-1100. – 0,5 п. л. (авт. – 0,17 п.л.)

14. Проскуряков А.Ю., Белов А.А., Кропотов Ю.А. Прогнозирование изменений параметров временных рядов в цифровых информационно-управляющих системах // Системы управления, связи и безопасности, 2017. – №2. – С.1-17. – 1,06 п. л. (авт. – 0,36 п. л.)

15. Проскуряков А.Ю., Белов А.А., Кропотов Ю.А. Обработка и прогнозирование временных рядов в цифровых системах телекоммуникаций и информационных системах управления // Вестник Брянского государственного технического университета, 2017. – №4(57). – С.65-74. ISSN: 1999-8775. – 0,63 п. л. (авт. – 0,21 п. л.)

16. Проскуряков А.Ю., Белов А.А., Кропотов Ю.А. Методы оценивания периода временного ряда дискретного представления непрерывной функции // Известия высших учебных заведений. Физика, 2015. – Том 58.- №8/2. – С. 297-300. – 0,25 п. л. (авт. – 0,1 п. л.)

Статьи в изданиях, индексируемых БД SCOPUS

17. Proskuryakov, A.Y., Beylekchi, D.V., Uvaisov, S. U. Predictive-Free Methods for Digital Financial Asset Management and Delayed Functional-Differential Economic Game Models. 7th IEEE International Conference on Information Technology and Nanotechnology. Proceedings of ITNT 2021. 1-4. 10.1109/ITNT52450.2021.9649433. – 0,25 п. л. (авт. – 0,08 п. л.)

18. Proskuryakov, A., Ermolaev, V., Kropotov, Y. Modeling of neural systems and networks by functional differential equations, 2020 International Conference on Information Technology and Nanotechnology (ITNT), Samara, Russia, 2020, pp. 1-4, doi: 10.1109/ITNT49337.2020.9253228. – 0,25 п. л. (авт. – 0,08 п. л.)

19. Proskuryakov, A.Y., Kropotov, Y.A., Kolpakov, A.A., Belov, A.A. Conditional local approximation in the representation of a discrete process by interpolation polynomials, 2019 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), Tomsk, Russia, 2019, pp. 1-4, doi: 10.1109/SIBCON.2019.8729569. – 0,25 п. л. (авт. – 0,07 п. л.)

20. Proskuryakov, A.Y., Kropotov, Y.A. Research and Forecasting of Changes in the Parameters of Time Series and Continuous Functions in Information

Systems, 2018 3rd Russian-Pacific Conference on Computer Technology and Applications (RPC), Vladivostok, Russia, 2018, pp. 1-4, doi: 10.1109/RPC.2018.8482226. – 0,25 п. л. (авт. – 0,12 п. л.)

21. Proskuryakov, A.Y. Kropotov, Y.A., Belov A.A. The method of reducing the noise influence and time-series samples fluctuations on the accuracy of information representation, MWENT – Proceedings Volume 2018-March, Pages 1-5. DOI: 10.1109/MWENT.2018.8337273. – 0,31 п. л. (авт. – 0,11 п. л.)

22. Proskuryakov, A. Y. Processing and forecasting of time series in systems with dynamic parameters, 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), St. Petersburg, Russia, 2017, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICIEAM.2017.8076366. – 0,25 п. л.

23. Proskuryakov A.Y. Forecasting the change in the parameters of time series and continuous functions / A.Y. Proskuryakov, Y.A. Kropotov // Procedia Engineering, 3rd International Conference “Information Technology and Nanotechnology”, ITNT-2017, 25-27 April 2017, Samara, Russia, Volume 201, Pages 789-800. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.09.628. – 0,75 п. л. (авт. – 0,38 п. л.)

24. Proskuryakov, A.Y. Intelligent System for Time Series Forecasting. XII International Symposium Intelligent Systems 2016, 5-7 October 2016, Moscow, Russia. Procedia Computer Science. [<http://dx.doi.org/10.1016/j.procs.2017.01.122>] Volume 103, 2017, Pages 363–369. – 0,44 п. л.

25. Proskuryakov A. Y. Estimation methods for the period of time series of continuous process discrete representation / A.Y. Proskuryakov, A.A. Belov, Y.A. Kropotov // Proceedings 25th Int. Crimean Conference “Microwave & Telecommunication Technology” (CriMiCo’2015). 6—12 September, Sevastopol, Crimea. P. 391-392. ISBNs: 978-1-4673-9413-0, 978-1-4673-9414-7, 978-1-4673-9415-4. IEEE Cat. Nr. CFP 15788. – 0,25 п. л. (авт. – 0,1 п. л.)

Монографии

26. Автоматизированные системы управления промышленными производствами: монография / Е. П. Догадина, А. Н. Коноплёв, А. А. Белов, Ю. А. Кропотов, А. Ю. Прокураков – М.-Берлин: Директ-Медиа, 2017. – 343 с. ISBN 978-5-4475-8776-5. – 21,44 п. л. (авт. – 4,28 п. л.)

27. Прокураков А.Ю., Белов А.А., Кропотов Ю.А. Алгоритмы автоматизированных систем экологического мониторинга промышленных производств: моногр. - М.-Берлин: Директ-Медиа, 2015. - 121 с. ISBN 978-5-4475-5245-9. – 7,56 п. л. (авт. – 2,52 п. л.)

Патенты и свидетельства о государственной регистрации

28. Свидетельство 2019611940. Система автоматического управления депозитом с помощью автономного облачного сервера в инвестиционно-финансовых задачах цифровой экономики: программа для ЭВМ / А.Ю. Проскуряков, И.С. Меньшов, А.Е. Миловидов (RU); правообладатель: ФГБОУ ВО Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых. № 2019610521; заявл. 22.01.2019. опубл. 07.02.2019.

29. Свидетельство 2017615394. Автоматизированная система контроля и прогнозирования стоимостных показателей экономических систем: программа для ЭВМ / А.Ю. Проскуряков (RU); правообладатель: ООО "Формат". № 2017611057; заявл. 30.01.2017; опубл. 16.05.2017.

30. Патент на изобретение № 2600099. Способ нейросетевого прогнозирования изменения значений функции с её предварительной вейвлет-обработкой и устройство его осуществления. /Белов А.А., Ермолаев В.А., Кропотов Ю.А., Проскуряков А.Ю. Заявка № 2015110284/08 (016173) от 23.03.2015. Приоритет изобретения 23 марта 2015 г. Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации от 22 сентября 2016 г.

ПРОСКУРЯКОВ АЛЕКСАНДР ЮРЬЕВИЧ

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
УПРАВЛЕНИЯ ТОРГОВЫМИ ОПЕРАЦИЯМИ С
ЦИФРОВЫМИ ВАЛЮТАМИ

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора экономических наук