ISSN 1998-0663 (print), ISSN 2587-8166 (online)
English version: ISSN 2587–814X (print), ISSN 2587–8158 (online)

Т. 15 № 4 – 2021

БИЗНЕС-ИНФОРМАТИКА

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ НИУ ВШЭ

СОДЕРЖАНИЕ

Е.А. Коробов, Ю.В. Семернина, А.С. Усманова, К.А. Одинокова

Роботизированное формирование инвестиционного портфеля на российском облигационном рынке на основе модифицированной стратегии скольжения по кривой доходности 7

Г.Н. Жукова, М.В. Ульянов

К вопросу о восстановлении символьных последовательностей, кодирующих зашумленные периодические функции.....22

Г.А. Калугина, А.В. Ряпухин

Методы цифрового маркетингового позиционирования на мировом рынке гражданских пассажирских самолетов.....36

А.В. Сигал

Использование последовательностей Фишберна для адекватного моделирования по выборочным данным.....50

Е.Д. Копнова, Л.А. Родионова

Моделирование связей между институциональной и фактической глобализацией в странах мира.....61

Ю.Ф. Тельнов, В.А. Казаков, А.В. Данилов

Технология проектирования инновационных процессов создания продукции и услуг сетевого предприятия с использованием i4.0-системы, основанной на знаниях.....76

Издатель:
Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»

Подписной индекс Объединенного каталога «Пресса России» – Е79128

Выпускается ежеквартально

Журнал включен в Перечень российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук

Заместитель главного редактора
Е.П. Зараменских

Компьютерная верстка
О.А. Богданович

Администратор веб-сайта
И.И. Хрусталева

Адрес редакции:
119049, г. Москва, ул. Шаболовка, д. 26-28
Тел./факс: +7 (495) 772-9590 *28509
http://bijournal.hse.ru
E-mail: bijournal@hse.ru

За точность приведенных сведений и содержание данных, не подлежащих открытой публикации, несут ответственность авторы

При перепечатке ссылка на журнал «Бизнес-информатика» обязательна

Тираж:
русскоязычная версия – 150 экз.,
англоязычная версия – 150 экз.,
онлайн-версии на русском и английском – свободный доступ

Отпечатано в типографии НИУ ВШЭ
г. Москва, Измайловское шоссе, д. 44, стр. 2

© Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»

О ЖУРНАЛЕ

«Бизнес-информатика» – рецензируемый междисциплинарный научный журнал, выпускаемый с 2007 года Национальным исследовательским университетом «Высшая школа экономики» (НИУ ВШЭ). Администрирование журнала осуществляется Высшей школой бизнеса НИУ ВШЭ. Журнал выпускается ежеквартально.

Миссия журнала – развитие бизнес-информатики как новой области информационных технологий и менеджмента. Журнал осуществляет распространение последних разработок технологического и методологического характера, способствует развитию соответствующих компетенций, а также обеспечивает возможности для дискуссий в области применения современных информационно-технологических решений в бизнесе, менеджменте и экономике.

Журнал публикует статьи по следующей тематике: моделирование социальных и экономических систем, цифровая трансформация бизнеса, управление инновациями, информационные системы и цифровые технологии в бизнесе, анализ данных и системы бизнес-интеллекта, математические методы и алгоритмы бизнес-информатики, моделирование и анализ бизнес-процессов, поддержка принятия управленческих решений.

В соответствии с решением президиума Высшей аттестационной комиссии Российской Федерации журнал включен в Перечень российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук. Журнал «Бизнес-информатика» включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук (Перечень ВАК) по следующим научным специальностям и соответствующим отраслям науки: 05.13.10 – Управление в социальных и экономических системах (технические науки); 05.13.11 – Математическое и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей (технические науки); 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (технические науки); 05.25.05 – Информационные системы и процессы (технические науки); 08.00.05 – Экономика и управление народным хозяйством (по отраслям и сферам деятельности) (экономические науки); 08.00.13 – Математические и инструментальные методы экономики (экономические науки).

Журнал входит в базы Scopus, Web of Science Emerging Sources Citation Index (WoS ESCI), Russian Science Citation Index на платформе Web of Science (RSCI), EBSCO.

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор), свидетельство ПИ № ФС77-66609 от 08 августа 2016 г.

Международный стандартный серийный номер (ISSN): 1998-0663 (на русском), 2587-814X (на английском).

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

Зараменских Евгений Петрович
Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, Россия

ЧЛЕНЫ РЕДКОЛЛЕГИИ

Абдульраб Абиб
Национальный институт прикладных наук, Руан, Франция

Авдошин Сергей Михайлович
Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, Россия

Акопов Андраник Сумбатович
Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, Россия

Алескеров Фуад Тагиевич
Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, Россия

Афанасьев Александр Петрович
Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича РАН, Москва, Россия

Афанасьев Антон Александрович
Центральный экономико-математический институт РАН, Москва, Россия

Бабкин Эдуард Александрович
Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Нижний Новгород, Россия

Баландин Сергей Игоревич
Ассоциация FRUCT, Хельсинки, Финляндия

Баранов Александр Павлович
Главный научно-исследовательский вычислительный центр Федеральной налоговой службы, Москва, Россия

Барахнин Владимир Борисович
Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий, Новосибирск, Россия

Беккер Йорг
Университет Мюнстера, Мюнстер, Германия

Белов Владимир Викторович
Рязанский государственный радиотехнический университет, Рязань, Россия

Вестнер Маркус
Регенсбургский университет прикладных наук, Регенсбург, Германия

Гаврилова Татьяна Альбертовна
Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

Глотен Эрве
Тулонский университет, Ла-Гард, Франция

Голосов Алексей Олегович
Компания «ФОРС – Центр разработки», Москва, Россия

Грибов Андрей Юрьевич
Компания «КиберПлат», Москва, Россия

Громов Александр Игоревич
Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, Россия

Гурвич Владимир Александрович
Ратгерский университет (Университет Нью-Джерси), Ратгерс, США

Демидова Лилия Анатольевна
Рязанский государственный радиотехнический университет, Рязань, Россия

Джейкобс Лоренц
Университет Цюриха, Цюрих, Швейцария

Дискин Иосиф Евгеньевич
Всероссийский центр изучения общественного мнения, Москва, Россия

Ефимушкин Владимир Александрович
Центральный научно-исследовательский институт связи, Москва, Россия

Зандкуль Курт
Университет Ростока, Росток, Германия

Иванников Александр Дмитриевич
Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН, Москва, Россия

Ильин Николай Иванович
Федеральная служба охраны Российской Федерации, Москва, Россия

Исаев Дмитрий Валентинович
Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, Россия

Калягин Валерий Александрович
Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Нижний Новгород, Россия

Кравченко Татьяна Константиновна
Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, Россия

Кузнецов Сергей Олегович
Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, Россия

Лугачев Михаил Иванович
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

Лин Квей-Жей
Технологический институт Нагои, Нагоя, Япония

Мальцева Светлана Валентиновна
Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, Россия

Мейор Питер
Комиссия ООН по науке и технологиям, Женева, Швейцария

Миркин Борис Григорьевич
Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, Россия

Моттль Вадим Вячеславович
Тульский государственный университет, Тула, Россия

Назаров Дмитрий Михайлович
Уральский государственный экономический университет, Екатеринбург, Россия

Пальчунов Дмитрий Евгеньевич
Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

Пардалос Панайот (Панос)
Университет Флориды, Гейнсвилл, США

Пастор Оскар
Политехнический университет Валенсии, Валенсия, Испания

Посегга Йоахим
Университет Пассау, Пассау, Германия

Самуйлов Константин Евгеньевич
Российский университет дружбы народов, Москва, Россия

Сюняев Али Рашидович
Технологический институт Карлсруэ, Карлсруэ, Германия

Таратухин Виктор Владимирович
Университет Мюнстера, Мюнстер, Германия

Триболе Жозе
Университет Лиссабона, Лиссабон, Португалия

Ульянов Михаил Васильевич
Институт проблем управления им В.А. Трапезникова РАН, Москва, Россия

Ускенбаева Раиса Кабиевна
Международный университет информационных технологий, Алматы, Казахстан

Цуканова Ольга Анатольевна
Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург, Россия

Чхартишвили Александр Гедеванович
Институт проблем управления им В.А. Трапезникова РАН, Москва, Россия

Штраус Кристина
Университет Вены, Вена, Австрия

ISSN 1998-0663 (print), ISSN 2587-8166 (online)
English version: ISSN 2587–814X (print), ISSN 2587–8158 (online)

Vol. 15 No 4 – 2021

BUSINESS INFORMATICS

HSE SCIENTIFIC JOURNAL

CONTENTS

E.A. Korobov, Y.V. Semernina, A.S. Usmanova , K.A. Odinokova

Robotizing bond portfolio selection on the Russian debt market on the basis of a modified strategy of riding the yield curve.....7

G.N. Zhukova, M.V. Ulyanov

To the question of restoring symbol sequences encoding noisy periodic functions.....22

G.A. Kalugina, A.V. Ryapukhin

Methods of digital marketing positioning in the global civil passenger aircraft market.....36

A.V. Sigal

Using Fishburne's sequences in suitable modeling used for sample data 50

E.D. Kopnova, L.A. Rodionova

Modeling the links between institutional and actual globalization in the countries of the world 61

Yu.F. Telnov, V.A. Kazakov, A.V. Danilov

Technology for designing innovative processes for creating products and services of a network enterprise using an i4.0 knowledge-based system 76

Publisher:
National Research University
Higher School of Economics

The journal is published quarterly

The journal is included into the list of peer reviewed scientific editions established by the Supreme Certification Commission of the Russian Federation

Deputy Editor-in-Chief
E. Zaramenskikh

Computer Making-up:
O. Bogdanovich

Website Administration:
I. Khrustaleva

Address:
26-28, build. 4, Shablovka Street
Moscow 119049, Russia

Tel./fax: +7 (495) 772-9590 *28509
http://bijournal.hse.ru
E-mail: bijournal@hse.ru

Circulation:
English version – 150 copies,
Russian version – 150 copies,
online versions in English and Russian – open access

Printed in HSE Printing House
44, build. 2, Izmaylovskoye Shosse,
Moscow, Russia

© National Research University
Higher School of Economics

ABOUT THE JOURNAL

Business Informatics is a peer reviewed interdisciplinary academic journal published since 2007 by National Research University Higher School of Economics (HSE), Moscow, Russian Federation. The journal is administered by HSE Graduate School of Business. The journal is published quarterly.

The mission of the journal is to develop business informatics as a new field within both information technologies and management. It provides dissemination of latest technical and methodological developments, promotes new competences and provides a framework for discussion in the field of application of modern IT solutions in business, management and economics.

The journal publishes papers in the areas of, but not limited to: modeling of social and economic systems, digital transformation of business, innovation management, information systems and technologies in business, data analysis and business intelligence systems, mathematical methods and algorithms of business informatics, business processes modeling and analysis, decision support in management.

The journal is included into the list of peer reviewed scientific editions established by the Supreme Certification Commission of the Russian Federation.

The journal is included into Scopus, Web of Science Emerging Sources Citation Index (WoS ESCI), Russian Science Citation Index on the Web of Science platform (RSCI), EBSCO.

International Standard Serial Number (ISSN): 2587-814X (in English), 1998-0663 (in Russian).

EDITORIAL BOARD

DEPUTY EDITOR-IN-CHIEF

Evgeny P. Zaramenskikh
National Research University Higher School of Economics, Moscow, Russia

EDITORIAL BOARD

Habib Abdulrab
National Institute of Applied Sciences, Rouen, France

Sergey M. Avdoshin
National Research University Higher School of Economics, Moscow, Russia

Andranik S. Akopov
National Research University Higher School of Economics, Moscow, Russia

Fuad T. Aleskerov
National Research University Higher School of Economics, Moscow, Russia

Alexander P. Afanasyev
Institute for Information Transmission Problems (Kharkevich Institute), Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Anton A. Afanasyev
Central Economics and Mathematics Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Eduard A. Babkin
National Research University Higher School of Economics, Nizhny Novgorod, Russia

Sergey I. Balandin
Finnish-Russian University Cooperation in Telecommunications (FRUCT), Helsinki, Finland

Vladimir B. Barakhnin
Federal Research Center of Information and Computational Technologies, Novosibirsk, Russia

Alexander P. Baranov
Federal Tax Service, Moscow, Russia

Jörg Becker
University of Munster, Munster, Germany

Vladimir V. Belov
Ryazan State Radio Engineering University, Ryazan, Russia

Alexander G. Chkhartishvili
V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Vladimir A. Efimushkin
Central Research Institute of Communications, Moscow, Russia

Tatiana A. Gavrilova
Saint-Petersburg University, St. Petersburg, Russia

Hervé Glotin
University of Toulon, La Garde, France

Alexey O. Golosov
FORS Development Center, Moscow, Russia

Andrey Yu. Gribov
CyberPlat Company, Moscow, Russia

Alexander I. Gromoff
National Research University Higher School of Economics, Moscow, Russia

Vladimir A. Gurvich
Rutgers, The State University of New Jersey, Rutgers, USA

Laurence Jacobs
University of Zurich, Zurich, Switzerland

Liliya A. Demidova
Ryazan State Radio Engineering University, Ryazan, Russia

Iosif E. Diskin
Russian Public Opinion Research Center, Moscow, Russia

Nikolay I. Ilyin
Federal Security Guard of the Russian Federation, Moscow, Russia

Dmitry V. Isaev
National Research University Higher School of Economics, Moscow, Russia

Alexander D. Ivannikov
Institute for Design Problems in Microelectronics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Valery A. Kalyagin
National Research University Higher School of Economics, Nizhny Novgorod, Russia

Tatiana K. Kravchenko
National Research University Higher School of Economics, Moscow, Russia

Sergei O. Kuznetsov
National Research University Higher School of Economics, Moscow, Russia

Kwei-Jay Lin
Nagoya Institute of Technology, Nagoya, Japan

Mikhail I. Lugachev
Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

Svetlana V. Maltseva
National Research University Higher School of Economics, Moscow, Russia

Peter Major
UN Commission on Science and Technology for Development, Geneva, Switzerland

Boris G. Mirkin
National Research University Higher School of Economics, Moscow, Russia

Vadim V. Mottl
Tula State University, Tula, Russia

Dmitry M. Nazarov
Ural State University of Economics, Ekaterinburg, Russia

Dmitry E. Palchunov
Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia

Panagote (Panos) M. Pardalos
University of Florida, Gainesville, USA

Óscar Pastor
Polytechnic University of Valencia, Valencia, Spain

Joachim Posegga
University of Passau, Passau, Germany

Konstantin E. Samouylov
Peoples' Friendship University, Moscow, Russia

Kurt Sandkuhl
University of Rostock, Rostock, Germany

Christine Strauss
University of Vienna, Vienna, Austria

Ali R. Sunyaev
Karlsruhe Institute of Technology, Karlsruhe, Germany

Victor V. Taratukhin
University of Munster, Munster, Germany

José M. Tribolet
Universidade de Lisboa, Lisbon, Portugal

Olga A. Tsukanova
Saint-Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, St. Petersburg, Russia

Mikhail V. Ulyanov
V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Raissa K. Uskenbayeva
International Information Technology University, Almaty, Kazakhstan

Markus Westner
Regensburg University of Applied Sciences, Regensburg, Germany

DOI: 10.17323/2587-814X.2021.4.7.21

Роботизированное формирование инвестиционного портфеля на российском облигационном рынке на основе модифицированной стратегии скольжения по кривой доходности*

Е.А. Коробов[a]
E-mail: korobovea@yandex.ru

Ю.В. Семернина[b]
E-mail: ysemernina@yandex.ru

А.С. Усманова[b]
E-mail: alina.brosalova@yandex.ru

К.А. Одинокова[b]
E-mail: odinokova.kristina93@mail.ru

[a] Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского
Адрес: 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, д. 83

[b] Саратовский государственный технический университет им. Ю.А. Гагарина
Адрес: 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, д. 77

Аннотация

Современное состояние глобального рынка долговых ценных бумаг характеризуется исторически низким средним уровнем процентных ставок, тенденциями по выравниванию доходностей облигаций с разными сроками до погашения, возрастанием частоты возникновения инверсии кривой процентных ставок и масштабным трендом автоматизации принятия финансовых решений. Внимание исследователей в данной сфере сосредоточено на построении моделей, описывающих состояние долгового рынка в целом или отдельных его инструментов, а также на управлении рисками. При этом в профильной литературе крайне мало работ затрагивает тематику компьютерных алгоритмов формирования облигационных портфелей, базирующихся на традиционных или современных инвестиционных стратегиях. Цель данного исследования состоит в модификации алгоритма применения стратегии скольжения по кривой доходности, задействующего, во-первых, среднюю доходность облигаций за период инвестирования вместо традиционной доходности облигаций к погашению, во-вторых, разработанный алгоритм расчета рыночного спреда по облигациям и, в-третьих, альтернативные показатели оценки рисков (коэффициенты компенсации), позволяющие объективно оценить ценовой риск, риск ликвидности и риск транзакционных издержек, а также

* Статья опубликована при поддержке Программы НИУ ВШЭ «Университетское партнерство»

общий риск. Модификация стратегии скольжения по кривой доходности и разработка алгоритма расчета рыночного спреда осуществлялись с использованием метода прямого измерения результата, предполагающего применение рассматриваемой стратегии к данным по облигационным выпускам российских эмитентов долгового рынка Московской биржи. Отбор финансовых инструментов осуществлялся во всех сегментах российского облигационного рынка: государственных облигаций, субфедеральных и муниципальных облигаций, корпоративных облигаций. Модифицированный алгоритм позволил получить дополнительную доходность по каждому из отобранных облигационных выпусков, что свидетельствует о высокой эффективности разработки в сравнении с традиционной стратегией. Программные реализации этого алгоритма могут быть интегрированы в любые роботизированные и полуроботизированные биржевые торговые приложения.

Ключевые слова: модифицированная стратегия скольжения по кривой доходности; роботизированное формирование облигационного портфеля; алгоритм расчета рыночного спреда по облигациям; коэффициенты компенсации; ценовой риск облигации; риск ликвидности облигации; риск транзакционных издержек облигации; общий риск облигации; инвестиционные программные приложения.

Цитирование: Коробов Е.А., Семернина Ю.В., Усманова А.С., Одинокова К.А. Роботизированное формирование инвестиционного портфеля на российском облигационном рынке на основе модифицированной стратегии скольжения по кривой доходности // Бизнес-информатика. 2021. Т. 15. № 4. С. 7–21. DOI: 10.17323/2587-814X.2021.4.7.21

Введение

Развитие финансовых технологий и финансовых рынков в последние десятилетия привело к тому, что на сегодняшний день практически все решения о покупке или продаже финансовых инструментов осуществляются через специализированные электронные приложения. Программная архитектура последних во многом определяется теми финансовыми задачами, которые ставит перед собой участник рынка. Такие спекулятивные стратегии, как скальпинг, интрадей- или свинг-трейдинг сегодня реализуются, главным образом, путем создания торговых роботов для высокочастотной торговли. Участие человека при принятии решения о покупке или продаже того или иного финансового инструмента, в этом случае, хотя и может присутствовать, но обычно сведено к минимуму.

Воплощение инвестиционных стратегий на рынке сегодня предполагает работу трех типов программных систем:

- полностью роботизированных приложений, исключающих участие человека (первый тип);
- полуроботизированных комплексов, когда программа формирует варианты инвестирования, а человек принимает решение о реализации того или иного варианта (второй тип);
- нероботизированных систем, в которых и весь финансовый анализ, и принятие решения осуществляет сам инвестор (третий тип).

Все три типа инвестиционных приложений активно развивались в последние годы. Так к первому виду программ можно отнести набирающие популярность после финансового кризиса 2008 года робо-эдвайзеры, работающие с использованием искусственных нейронных сетей и разветвленных графовых моделей принятия решений. Алгоритмы их работы [1–4], базирующиеся на классических принципах портфельного инвестирования Г. Марковица, У. Шарпа и Дж. Тобина, показали свою эффективность в условиях растущего рынка в период с февраля 2009 г. по февраль 2020 г. «Черный лебедь» в виде обвала фондовых индексов в марте 2020 г. привел к тому, что многие финтех-провайдеры были вынуждены перевести работу своих робо-эдвайзеров в ручной режим управления, что лишний раз свидетельствует об ограничениях применимости систем искусственного интеллекта для принятия финансовых решений.

К полуроботизированным инвестиционным приложениям можно, например, отнести торговые системы, в которых инвестор совершает сделки на основе данных, полученных от интегрированного скринера, работающего с такими инструментами, как акции, биржевые ПИФы, ETF, облигации и т.д. «Интеллектуальность» скринеров обычно сводится к расчету основных экономических показателей финансового инструмента или организации-эмитента и их фильтрации по заданному критерию.

К нероботизированным приложениям относится большинство торговых терминалов, предостав-

ляемых биржевыми брокерами и банками своим клиентам для совершения сделок на финансовом рынке.

Все вышеизложенные тенденции приходится принимать во внимание, в первую очередь, таким институциональным инвесторам, как паевые инвестиционные фонды, а также более консервативным участникам рынка – коммерческим банкам, государственным и негосударственным пенсионным фондам, страховым компаниям и некоторым частным инвесторам, перед которыми стоит задача формирования низкорискованных портфелей финансовых активов. Львиную долю вложений в таких портфелях, как правило, составляют государственные и корпоративные облигации. Одной из возможных универсальных стратегий отбора финансовых инструментов на облигационном рынке является стратегия скольжения по кривой доходности.

В современной российской научной литературе активные стратегии инвестирования на облигационном рынке практически не анализируются и, тем более, не модифицируются. Наиболее распространенным подходом к инвестированию на облигационном рынке является применение стратегии «купи и держи» («buy and hold»), что, в частности, в определенной степени прослеживается в работах Н.Ф. Коробова и А.А. Белоглазова [5], А.А. Пономарева [6], Н.В. Поповой [7], П.А. Лашевского [8], И.А. Дарушина [9], А.Н. Задорожной [10], В.В. Назаровой и И.П. Левичева [11], И.А. Фрейдиной [12], М.В. Фомина, Ю.В. Лахно и А.П. Пышнограя [13] и других авторов.

Некоторые исследователи затрагивают проблематику формы кривой процентных ставок (кривой доходности облигаций), однако они не рассматривают ее использование в рамках стратегии скольжения по кривой доходности (например, подобный подход характерен для работ А.Ю. Михайлова [14], А.Н. Буренина [15], С.В. Бешенова и В.А. Лапшина [16]).

Непосредственно стратегия скольжения по кривой доходности в специализированной отечественной финансово-экономической литературе практически не рассматривается, а в зарубежной литературе ее наиболее полное описание представлено в фундаментальных работах Ф.Дж. Фабоцци [17–19]. Также развернутое рассмотрение данной стратегии с анализом ее практического использования можно найти в работах В. Гальвани и С. Лэндона [20], Д. Биери и Л. Чинкарини [21], Р. Кокса и Дж. Фелтона [22], З. Вей, В. Ксианхуа и В. Гуофу [23].

Оценка эффективности применения стратегии скольжения по кривой доходности в условиях низких процентных ставок представлена в исследовании Международного валютного фонда [24].

Компьютерные модели формирования и оценки облигационных портфелей в работах отечественных и зарубежных исследователей представлены также достаточно скудно. К российским работам по данной тематике можно отнести публикации [25, 26].

Выбор стратегии скольжения по кривой доходности в качестве объекта роботизации обусловлен одновременным сочетанием двух факторов: с одной стороны, в условиях низких процентных ставок и инвертированного характера кривой доходности данная стратегия (при условии достаточного кредитного качества эмитентов облигаций) обладает определенной «устойчивостью» к характерным для этого рынка рискам, прежде всего, к риску роста процентных ставок, вероятность реализации которого при текущей рыночной конъюнктуре объективно достаточно высока (особенно при применении стратегии на коротком участке кривой доходности), а, с другой стороны, она относится к группе формализуемых инвестиционных стратегий, что позволяет сформировать однозначные алгоритмы ее автоматизации. Кроме того, стратегия скольжения по кривой доходности доступна не только институциональным, но и частным инвесторам, отличительной особенностью которых является незначительный объем инвестиционного портфеля, априори предполагающий ограниченный уровень его диверсификации (в разрезе отдельных облигационных выпусков).

Исходным условием, определяющим возможность применения данной стратегии, является наличие положительной разницы между доходностью облигаций с большим сроком до погашения и доходностью облигаций с меньшим сроком до погашения (по сути, речь идет о наличии «классического» восходящего наклона кривой доходности облигаций). В качестве дополнительных условий ее применения необходимо отметить достаточный уровень рыночной ликвидности облигационного выпуска и адекватный уровень транзакционных издержек.

В настоящее время в условиях глобального снижения среднего уровня процентных ставок происходит «сближение» доходностей облигаций с разными сроками до погашения (минимизация разницы в доходности облигаций на разных участках кривой), а частота возникновения инверсии

кривой доходности облигаций значительно возрастает. Данные тенденции приводят к потребности в трансформации подхода к рассмотрению стратегии скольжения по кривой доходности: ее применение в классической интерпретации сопряжено с принятием инвесторами повышенного риска процентных ставок, риска ликвидности и риска транзакционных издержек, при этом получаемая доходность в общем случае не «компенсирует» принятия перечисленных рисков.

Целью данного исследования является создание модификации традиционного алгоритма применения стратегии скольжения по кривой доходности, учитывающей форму кривой процентных ставок, а также разработка автоматизированного алгоритма расчета рыночного спреда на российском облигационном рынке, позволяющего корректно оценить принимаемый инвесторами риск ликвидности. Полученные алгоритмы можно будет использовать в инвестиционных приложениях первого и второго типа.

1. Методы

Модификацию стратегии скольжения по кривой доходности и разработку автоматизированного алгоритма расчета рыночного спреда предполагается осуществлять с использованием метода прямого измерения результата. Этот метод подразумевает применение модифицированной стратегии скольжения по кривой доходности к реальным данным (на основе информации, полученной с российского биржевого рынка облигаций на конкретный момент времени – «рыночный срез» на конкретную дату) и не предполагает построения предсказательных, описательных или имитационных моделей в отношении отечественного облигационного рынка в целом или его отдельных сегментов в частности.

Данный метод применяется, исходя из следующих предположений:

1. издержки инвесторов при приобретении и продаже облигаций включают два вида комиссий (комиссию биржи и комиссию брокера, прочие виды издержек не учитываются);
2. облигации включаются в инвестиционный портфель в течение одной торговой сессии;
3. в качестве расчетных цен приобретения и/или продажи облигаций рассматриваются цены закрытия соответствующей торговой сессии вне зависимости от объема совершенных сделок, при этом в случае отсутствия реальных сделок в течение торговой сессии облигационный выпуск признается не обладающим достаточным уровнем ликвидности и не включается в состав облигационного портфеля (критерий одной сделки);
4. при расчете показателей доходности по облигационным выпускам учитывается накопленный купонный доход на момент совершения соответствующей сделки;
5. кредитное качество эмитентов облигаций принимается неизменным в течение всего анализируемого периода (в рамках проводимых расчетов оно отдельно не оценивается и не анализируется).

Предлагаемая модификация стратегии скольжения по кривой доходности подразумевает использование:

1. средней доходности облигаций за период инвестирования вместо традиционной доходности облигаций к погашению;
2. разработанного авторского алгоритма расчета рыночного спреда по облигациям;
3. альтернативных показателей оценки рисков (коэффициенты компенсации), позволяющих объективно оценить ценовой риск, риск ликвидности и риск транзакционных издержек, а также общий риск.

Предложенные в рамках рассматриваемой модификации количественные показатели являются универсальными для облигационного рынка и могут быть применены в отношении любых купонных и дисконтных облигаций. Обобщающий характер используемых показателей обусловлен выбранным подходом к их построению: при их расчете используются фиксированные параметры облигационных выпусков, как правило, определяемые в момент эмиссии последних, данные о рыночных сделках с облигациями и их рыночных котировках, а также информация о времени владения облигациями (периоде инвестирования).

При использовании стратегии скольжения по кривой доходности в рамках традиционного подхода предполагается применение классической формулы для расчета доходности облигаций к погашению:

$$Y_M = \frac{(P_S - P_P)}{P_P} \cdot \frac{365}{t_M} \cdot 100\%, \qquad (1)$$

где Y_M – доходность облигаций к погашению;

P_S – цена продажи или цена погашения облигаций;

P_P – цена приобретения облигаций;

t_M – количество дней, оставшихся до погашения облигаций.

Необходимо подчеркнуть, что для классического варианта стратегии скольжения по кривой доходности обязательным является строгое неравенство:

$$Y_{LT} > Y_{ST}, \quad (2)$$

где Y_{LT} – доходность к погашению облигаций с большим сроком до погашения;

Y_{ST} – доходность к погашению облигаций с меньшим сроком до погашения.

Кроме того, дополнительно должно соблюдаться еще одно строгое неравенство:

$$Y_M > Y_E, \quad (3)$$

где Y_E – требуемая (ожидаемая) доходность инвестирования.

В рамках рассматриваемой модификации стратегии скольжения по кривой доходности предлагается ориентироваться на альтернативный показатель – доходность за период владения облигациями, что обусловлено наличием у инвесторов объективной возможности продать облигации, не дожидаясь их погашения. Расчет данного показателя осуществляется по следующей формуле:

$$Y_{t_H} = \frac{(P_S + C_S + \sum_{i=1}^{n} C_{R_i} - P_P - C_P - \sum_{j=1}^{k} T_j)}{P_P + C_P} \cdot \frac{365}{t_H} \cdot 100\%, \quad (4)$$

где Y_{t_H} – доходность за период владения облигациями;

C_S – накопленный купонный доход на момент продажи облигаций;

C_{R_i} – выплаченный эмитентом купонный доход за соответствующий купонный период (при условии наличия таких выплат за период владения облигациями);

n – общее количество купонных периодов по облигациям;

C_P – накопленный купонный доход на момент покупки облигаций;

T_j – величина транзакционных издержек;

k – общее количество видов транзакционных издержек;

t_H – количество дней владения облигациями.

В отличие от традиционного подхода показатель доходности за период владения облигациями необходимо рассчитывать регулярно, к примеру, по итогам каждой торговой сессии, а не только в момент приобретения облигаций. Такой подход изначально подразумевает более высокий уровень торговой активности инвесторов по сравнению с традиционным.

Для оценки эффективности модифицированной стратегии скольжения по кривой доходности целесообразно использовать показатель средней доходности за период инвестирования, учитывающей как периоды владения отдельными облигационными выпусками, так и периоды отсутствия позиций по облигациям:

$$\overline{Y} = \frac{\sum_{l=1}^{m} Y_{t_{H_l}} t_{H_l} + \sum_{q=1}^{v} Y_{t_{0_q}} t_{0_q}}{\sum_{l=1}^{m} t_{H_l} + \sum_{q=1}^{v} t_{0_q}}, \quad (5)$$

где $\overline{Y}$ – средняя доходность за период инвестирования;

$Y_{t_{H_l}}$ – доходность за l-й период владения облигациями (период наличия позиций по облигациям);

m – количество периодов владения облигациями;

$Y_{t_{0q}}$ – доходность за период отсутствия позиций по облигациям (например, за счет размещения средств на денежном рынке);

t_{0_q} – длительность периода отсутствия позиций по облигациям;

v – количество периодов отсутствия позиций по облигациям.

Концептуально важно заметить, что для модифицированной стратегии скольжения по кривой доходности соотношение между доходностями облигаций разной длительности приобретает вид:

$$Y_{LT} \geq Y_{ST}. \quad (6)$$

Таким образом, предлагаемая модифицированная стратегия является результативной даже в условиях «плоской» кривой доходности облигаций.

В свою очередь для оценки ценового риска предлагается использовать изменение рыночной цены облигации при росте процентных ставок на 1%:

$$\Delta_+ = \left| P_{S_{Y+1\%}} - P_P \right|, \quad (7)$$

где Δ_+ – изменение рыночной цены облигации при росте процентных ставок на 1%;

$P_{S_{Y+1\%}}$ – рыночная цена облигации при росте процентных ставок на 1%.

Значение $P_{S_{Y+1\%}}$ рассчитывается на основании формулы (4) путем подбора такого численного значе-

ния этого показателя, при котором значение доходности облигации увеличится ровно на 1% ($Y_{M+1\%}$). Это позволяет получить точные результаты (в абсолютном выражении), что является основным преимуществом данного показателя по сравнению, к примеру, с использованием классической или модифицированной дюрации, которая является, как минимум, менее точной. В общем случае она предполагает приближенный расчет величины купонной ставки; не учитывает ежедневного начисления накопленного купонного дохода; не принимает во внимание его выплату по окончании купонного периода или уплату покупателем в момент продажи облигаций; предполагает полную симметричность изменений цен облигаций как в условиях роста, так и в условиях снижения процентных ставок (последняя проблема в определенной степени может быть решена за счет использования показателя выпуклости облигаций, однако в условиях ограниченной ликвидности данный показатель обладает ограниченной репрезентативностью).

В качестве показателя риска, учитывающего начисление текущих доходов по облигациям, предлагается применять авторский коэффициент компенсации ценового риска, определяемый по формуле:

$$K_{CP} = \frac{\Delta_+}{C_D}, \quad (8)$$

где K_{CP} – коэффициент компенсации ценового риска;

C_D – величина купона, начисляемого ежедневно.

Значение коэффициента компенсации ценового риска может быть интерпретировано как точное количество дней, за которое величина начисляемого по облигациям купона полностью компенсирует расчетное снижение цены облигаций (от их текущих рыночных цен) при росте среднего уровня процентных ставок на 1%.

Еще одним индикатором, позволяющим оценить уровень риска, принимаемого инвесторами на облигационном рынке, выступает коэффициент компенсации риска ликвидности, рассчитываемый по формуле:

$$K_{CL} = \frac{\overline{S}}{C_D}, \quad (9)$$

где K_{CL} – коэффициент компенсации риска ликвидности;

$\overline{S}$ – средняя величина рыночного спреда по облигационному выпуску.

Значение коэффициента компенсации риска ликвидности предлагается интерпретировать как количество дней, за которое величина начисляемого по облигациям купона полностью компенсирует величину среднего рыночного спреда по облигациям.

Средняя величина рыночного спреда (в абсолютном или относительном выражении) за определенный период времени объективно отражает уровень ликвидности облигаций и является более репрезентативной по сравнению с традиционно используемым спредом на конкретный момент времени (как правило, на момент открытия позиции по облигациям). Дело в том, что средняя величина рыночного спреда учитывает каждое изменение рыночных котировок облигаций (как котировок на покупку, так и котировок на продажу) в ходе рыночных торгов, то есть она отражает среднюю фактически наблюдаемую разницу между ними. Безусловным преимуществом данного показателя является возможность его систематического расчета, особенно если средний спред вычисляется за достаточно продолжительный временной интервал (например, месяц).

Традиционно используемый рыночный спред, рассчитываемый на конкретный момент времени, обладает двумя серьезными недостатками: во-первых, он не всегда может быть определен (в частности, при полном отсутствии котировок на покупку или котировок на продажу облигаций), и, во-вторых, значение рыночного спреда на конкретный момент времени может значительно отклоняться от его средних значений в любую сторону.

Кроме того, классический вариант расчета рыночного спреда в абсолютном выражении обычно не учитывает объема лучших выставленных заявок на покупку и продажу облигаций, т.е. спред «механически» рассчитывается как разница между лучшей заявкой на продажу и лучшей заявкой на покупку по следующей формуле:

$$S_M = B_S - B_P, \quad (10)$$

где S_M – рыночный спред по облигационному выпуску в конкретный момент времени;

B_S – цена лучшей заявки на продажу по облигационному выпуску на конкретный момент времени;

B_P – цена лучшей заявки на покупку по облигационному выпуску на конкретный момент времени.

Широкое распространение такого подхода связано с тем, что на практике корректный расчет средней величины рыночного спреда «вручную» является чрезвычайно сложной и трудоемкой задачей,

в частности, её решение предполагает регулярный мониторинг инвестором рыночного стакана котировок по каждому облигационному выпуску, фиксацию происходящих в них изменений и расчет рыночного спреда по каждому облигационному выпуску в конкретный момент времени. При формировании диверсифицированного облигационного портфеля данная задача объективно является невыполнимой без использования автоматизированных алгоритмов.

В рамках данного исследования был разработан и реализован на языке Lua в интеграции с торговым терминалом QUIK (Quickly Updatable Information Kit – «быстро обновляемый информационный пакет») алгоритм расчета рыночного спреда по облигационным выпускам, предполагающий выполнение следующих шагов:

1. отбор облигационных выпусков в пользовательском режиме (на этом этапе инвестор может выбрать произвольный перечень облигационных выпусков эмитенты которых удовлетворяют его с точки зрения кредитного качества; прочие критерии формирования данного перечня облигационных выпусков могут быть заданы произвольно);
2. настройка периода фиксации рыночных котировок выбранных облигационных выпусков (по умолчанию задается полная продолжительность основной торговой сессии, при необходимости – может быть изменена произвольно);
3. настройка условий фиксации рыночных котировок выбранных облигационных выпусков (по умолчанию – только при одновременном наличии рыночных котировок на покупку и на продажу облигаций; при необходимости – при наличии рыночных котировок на покупку облигаций, при наличии рыночных котировок на продажу облигаций и постоянная фиксация);
4. запись рыночных котировок в информационной системе (осуществляется в специализированном регистре, созданном в информационной базе);
5. выбор периода расчета рыночного спреда (по умолчанию равен 20 торговым дням; при необходимости – может быть установлен произвольно);
6. расчет среднего рыночного спреда по облигационному выпуску для выбранного периода, осуществляемый по формуле:

$$\overline{S} = \frac{\sum_{l=1}^{w} S_{M_l} t_l}{\sum_{l=1}^{w} t_l}, \qquad (11)$$

где w – количество периодов ценовой стабильности рыночных котировок облигаций (в течение этого периода величина рыночного спреда остается неизменной);

S_{M_l} – значение рыночного спреда в течение l-го периода ценовой стабильности рыночных котировок облигаций;

t_l – продолжительность периода ценовой стабильности рыночных котировок облигаций (рассчитывается с точностью до 1 секунды);

7. вывод рассчитанных значений среднего рыночного спреда в отчет (форма отчета – настраивается в пользовательском режиме).

Использование критерия одной сделки в сочетании с применением разработанного алгоритма позволяет намного точнее оценивать риск ликвидности, характерный для облигационного выпуска при использовании стратегии скольжения по кривой доходности.

С позиции автоматизации основным преимуществом предложенного алгоритма фиксации и последующего расчета рыночного спреда по облигациям является регулярное получение объективной информации о средней фактической (реально наблюдаемой) величине рыночного спреда по обращающимся облигационным выпускам и, при необходимости, формирование массива исторических данных о его величине, что, в конечном счете, позволяет значительно точнее охарактеризовать уровень ликвидности облигационных выпусков, рассматриваемых в качестве потенциальных инструментов инвестирования.

Дополнительным индикатором, отражающим уровень принимаемого инвесторами риска, выступает коэффициент компенсации транзакционных издержек K_{CT}:

$$K_{CT} = \frac{\sum_{j=1}^{k} T_j}{C_D}. \qquad (12)$$

Экономическая интерпретация данного показателя в значительной степени аналогична предыдущим: он показывает количество дней, за которое величина начисляемого по облигациям купона, полностью компенсирует величину транзакционных издержек, которые несет инвестор при совершении сделок на облигационном рынке.

На основании перечисленных выше показателей можно вычислить общий коэффициент компенсации K_{CG}:

$$K_{CG} = K_{CP} + K_{CL} + K_{CT}. \quad (13)$$

Данный показатель позволяет получить представление о том, за какой период (количество дней) величина начисляемого по облигациям купона полностью компенсирует ценовой риск и риск ликвидности, а также величину транзакционных издержек. В общем случае, чем больше значение всех перечисленных выше коэффициентов компенсации, тем выше уровень принимаемого инвесторами риска, и наоборот.

Очевидно, что в рамках модифицированной стратегии скольжения по кривой доходности оптимальными являются максимизация средней доходности за период инвестирования и минимизация общего коэффициента компенсации.

2. Результаты

Применение метода прямого измерения результата в отношении модифицированной стратегии скольжения по кривой доходности было осуществлено на российском биржевом облигационном рынке по состоянию на 30 июня 2020 г.

Облигационный портфель формируется при требуемом (ожидаемом) уровне доходности, равном 7,00% годовых на 90 дней.

В качестве объектов инвестирования рассматриваются облигационные выпуски с датой погашения, находящейся в интервале с 13 по 27 декабря 2020 года. Отбор облигационных выпусков осуществляется во всех сегментах российского облигационного рынка: государственные облигации, субфедеральные и муниципальные облигации, корпоративные облигации (перечень облигаций, обращающихся на российском биржевом рынке и имеющих необходимый срок погашения, представлен в *таблице 1*).

В сформированный перечень облигационных выпусков был включен один выпуск государственных

Таблица 1.

Облигационные выпуски, обращающиеся на российском биржевом рынке с датой погашения с 13 по 27 декабря 2020 г., размещенные не позднее 30 июня 2020 г.[1]

№ п/п	Сегмент облигационного рынка	Наименование облигационного выпуска	Дата погашения облигационного выпуска	Номинальный объем выпуска, млрд руб.
1	Государственные облигации	ГСО–36002–ППС	16.12.2020 г.	15,00000
2	Корпоративные облигации	Офир–КО–П02	14.12.2020 г.	0,10000
3		ДОМ.РФ–20–об	15.12.2020 г.	5,00000
4		Сбербанк–001–41R–бсо	15.12.2020 г.	3,00000
5		ФПК Гарант–Инвест–001Р–03	16.12.2020 г.	1,00000
6		Агронова–Л–1–об	17.12.2020 г.	5,00000
7		РСГ–Финанс–4–боб	17.12.2020 г.	2,00000
8		СофтЛайн Трейд–001Р–01	17.12.2020 г.	3,00000
9		Банк ВТБ–Б–1–48	18.12.2020 г.	10,00000
10		УОМЗ ПО–2–боб	18.12.2020 г.	1,50000
11		Пассажирский порт–1–обн	22.12.2020 г.	0,00009
12		Банк ВТБ–Б–1–11	23.12.2020 г.	5,00000
13		Магнит–003Р–03	24.12.2020 г.	10,00000
14		ЧТПЗ–001Р–01–боб	24.12.2020 г.	5,00000
15		Сбербанк–001–179R–бсо	25.12.2020 г.	3,00000
16		ГПБ–25–боб	26.12.2020 г.	5,00000

[1] RusBonds, интернет-проект информационного агентства «Финмаркет» (https://www.rusbonds.ru/srch_simple.asp)

облигаций и 15 выпусков корпоративных облигаций (в сегменте субфедеральных и муниципальных облигаций в течение этого периода облигационные выпуски не погашались).

Для сокращения перечня потенциальных объектов инвестирования выступает критерий одной сделки, предполагающий совершение не менее одной сделки в течение торговой сессии, в ходе которой происходит формирование облигационного портфеля (данные по сделкам, совершенным 30 июня 2020 г. на отечественном биржевом рынке представлены в *таблице 2*, «полужирным» шрифтом в ней отмечены те облигационные выпуски, по которым не было совершено ни одной сделки в течение торговой сессии).

Использованный критерий одной сделки позволил сократить количество облигационных выпусков с 16 до 9, при этом по последним был осуществлен расчет доходности за предполагаемый период владения (при условии владения облигациями вплоть до погашения), исходя из средней величины комиссии брокера в размере 0,01% от суммы сделки и комиссии биржи в размере 0,01% от суммы сделки (результаты расчетов представлены в *таблице 3*).

Таким образом, 7 из 9 отобранных облигационных выпусков (они выделены «полужирным» шрифтом в *таблице 3*) не целесообразно использовать в рамках модифицированной стратегии скольжения по кривой доходности: их расчетная доходность за предполагаемый период владения с учетом накопленного купонного дохода и величины транзакционных издержек составляет менее 7,00% годовых.

В отношении двух облигационных выпусков, имеющих уровень доходности, превышающий требуемый (ожидаемый), определены коэффициенты компенсации (для случая продажи облигационных выпусков) по состоянию на 30 июня 2020 г.

Расчет коэффициентов компенсации предваряет моделирование изменчивости рыночных цен облигаций при росте процентных ставок на 1% (с приме-

Таблица 2.

Количество сделок, совершенных по отобранным облигационным выпускам 30 июня 2020 г. на Московской бирже (в режиме торгов «Рыночные сделки Т+»)[2]

№ п/п	Наименование облигационного выпуска	Объем сделок, руб.	Объем сделок, штук	Количество сделок, штук
1	**ГСО-36002-ППС**	**0**	**0**	**0**
2	**Офир-КО-П02**	**0**	**0**	**0**
3	**ДОМ.РФ-20-об**	**0**	**0**	**0**
4	**Сбербанк-001-41R-бсо**	**0**	**0**	**0**
5	ФПК Гарант–Инвест–001Р–03	63 526,60	63	10
6	**Агронова-Л-1-об**	**0**	**0**	**0**
7	РСГ–Финанс–4–боб	1 438 103,50	1 439	50
8	СофтЛайн Трейд–001Р–01	683 453,75	1 336	35
9	Банк ВТБ–Б–1–48	9 276 796,40	9 229	27
10	УОМЗ ПО–2–боб	143 036,00	141	5
11	**Пассажирский порт-1-обн**	**0**	**0**	**0**
12	**Банк ВТБ-Б-1-11**	**0**	**0**	**0**
13	Магнит–003Р–03	177 337,70	174	13
14	ЧТПЗ–001Р–01–боб	122 784,00	120	2
15	Сбербанк–001–179R–бсо	4 090 890,60	4 221	23
16	ГПБ–25–боб	1 773 540,40	1 747	10

[2] Московская биржа ММВБ-РТС (https://www.moex.com/ru/marketdata/bulletins/#/date=2020-06-30)

нением итерационных методов подбора значений), а также вычисление и проверка значимости средней величины облигационного рыночного спреда по облигационным выпускам на основании малых выборок с последующей проверкой по критерию Бартлетта (результаты расчетов представлены в *таблице 4*).

Для обоих облигационных выпусков значения общего коэффициента компенсации K_{CG} меньше предполагаемого периода инвестирования (90 дней), поэтому отобранные облигационные выпуски могут быть включены в состав облигационного портфеля в рамках модифицированной стратегии скольжения по кривой доходности. Удельные веса каждого выпуска облигаций определяются обратно пропорционально значениям общего коэффициента компенсации, т.е. удельный вес облигационного выпуска ФПК Гарант-Инвест-001Р-03 при таком подходе составит 38,9%, а удельный вес выпуска РСГ-Финанс-4-боб – 61,1%.

Таблица 3.

Расчетная доходность за предполагаемый период владения отобранных облигаций (при условии владения облигациями вплоть до погашения)

№ п/п	Наименование облигационного выпуска	Доходность за предполагаемый период владения, % годовых
1	ФПК Гарант–Инвест–001Р–03	9,90
2	РСГ–Финанс–4–боб	10,94
3	**СофтЛайн Трейд-001Р-01**	**6,07**
4	**Банк ВТБ-Б-1-48**	**4,47**
5	**УОМЗ ПО-2-боб**	**6,11**
6	**Магнит-003Р-03**	**3,69**
7	**ЧТПЗ-001Р-01-боб**	**5,12**
8	**Сбербанк-001-179R-бсо**	**6,65**
9	**ГПБ-25-боб**	**4,43**

Оценка эффективности реализуемой инвестиционной стратегии осуществляется по состоянию на 18 сентября 2020 г.

Указанная дата является датой пересмотра облигационного портфеля и принятия ключевого инвестиционного решения о закрытии имеющихся позиций по облигациями или о продолжении инвестирования (соответствующие расчеты представлены в *таблице 5*).

Модифицированная стратегия скольжения по кривой доходности облигаций позволила получить дополнительную доходность по каждому из отобранных облигационных выпусков, причем с учетом долей облигационных выпусков средний прирост по доходности составил 1,45%. С учетом величины требуемой (ожидаемой) доходности 7,00%, разница в доходности инвестирования является очень значительной: прирост доходности составил 20,71% от величины требуемой доходности.

Таблица 4.

Расчетные значения коэффициентов компенсации для отобранных облигационных выпусков

№ п/п	Наименование облигационного выпуска	K_{CP}, дней	K_{CL}, дней	K_{CT}, дней	K_{CG}, дней
1	ФПК Гарант–Инвест–001Р–03	13,5	27,1	1,2	41,8
2	РСГ–Финанс–4–боб	14,7	10,6	1,3	26,6

Таблица 5.

Сравнительный анализ доходности отобранных облигационных выпусков[3]

№ п/п	Наименование облигационного выпуска	Доходность за предполагаемый период владения (при условии владения облигациями вплоть до погашения), % годовых	Доходность за предполагаемый период владения (при условии продажи 18 сентября 2020 г.), % годовых	Отклонение, % годовых
1	ФПК Гарант–Инвест–001Р–03	9,90	10,77	+0,86
2	РСГ–Финанс–4–боб	10,94	12,75	+1,82

[3] Московская биржа ММВБ-РТС (https://www.moex.com/ru/marketdata/bulletins/#/date=2020-09-18)

Необходимо отметить, что в перспективе полная роботизация описанной выше последовательности действий при формировании инвестиционного портфеля на облигационном рынке позволит институциональным и частным инвесторам с минимальными временными затратами эффективно решать целый ряд взаимосвязанных прикладных задач портфельного инвестирования, в частности, задачу обоснованного отбора потенциальных инструментов инвестирования, задачу структурирования инвестиционного портфеля, а также задачу выбора оптимального момента для открытия и закрытия позиций по облигационным выпускам.

Заключение

По итогам проведенного исследования были получены следующие результаты.

1. Разработанная модифицированная стратегия скольжения по кривой доходности может использоваться как в условиях классической формы кривой процентных ставок, так и в случае плоской кривой процентных ставок.
2. Предложенный показатель доходности за период владения облигациями, учитывающий накопление и выплату купонных доходов по ним, а также величину транзакционных издержек, имеющих индивидуальный характер для каждого инвестора, является более точным и объективным показателем по сравнению с традиционным показателем доходности облигаций к погашению.
3. Совместное применение критерия одной сделки в сочетании с разработанным алгоритмом расчета среднего рыночного спреда позволяют участникам облигационного рынка более корректно оценить уровень рыночной ликвидности облигаций и, соответственно, более точно рассчитать коэффициент компенсации риска ликвидности.
4. Предложенные коэффициенты компенсации (коэффициент компенсации ценового риска, коэффициент компенсации риска ликвидности, коэффициент компенсации транзакционных издержек и общий коэффициент компенсации) дают возможность не только комплексно охарактеризовать уровень риска, присущий облигациям по выбранным критериям, но и позволяют структурировать облигационный портфель (например, обратно пропорционально значениям коэффициентов общей компенсации).

Созданные на основании вышеперечисленных результатов алгоритмы формирования портфелей финансовых инструментов и их программные реализации могут быть встроены в роботизированные и полуроботизированные торговые терминалы и инвестиционные приложения для использования институциональными и частными инвесторами на облигационном рынке. ■

Литература

1. Zhengyao J., Xu D., Liang J. A deep reinforcement learning framework for the financial portfolio management problem // Working paper arXiv: 1706.10059v2, 2017. [Электронный ресурс]: https://arxiv.org/pdf/1706.10059.pdf (дата обращения 22.12.2020).
2. Xiu G., Chan L. An algorithm for trading and portfolio management using Q-learning and Sharpe ratio maximization // Proceedings of the International Conference on Neural Information Processing. P. 832–837. [Электронный ресурс]: http://www.cse.cuhk.edu.hk/~lwchan/papers/iconip00-qsr.pdf (дата обращения 22.12.2020).
3. Almahdi S., Yang S. An adaptive portfolio trading system: A risk-return portfolio optimization using recurrent reinforcement learning with expected maximum drawdown // Expert Systems with Applications. 2017. No 87. P. 267–279. DOI: 10.1016/j.eswa.2017.06.023.
4. Heaton J., Polson N., Witte J. Deep learning for finance: Deep portfolios // Applied Stochastic Models in Business and Industry. 2016. Vol. 33. No 1. P. 3–12. [Электронный ресурс]: http://www.ssrn.com/abstract=2838013 (дата обращения: 04.01.2021). DOI: 10.2139/ssrn.2838013.
5. Коробов Н.Ф., Белоглазов А.А. Управление портфелем корпоративных облигаций // Вестник Таганрогского института управления и экономики. 2005. № 2. С. 28–30.
6. Пономарев А.А. Оптимизация доходности инвестиционного портфеля субфедеральных облигаций // Известия Российского государственного педагогического университета им. А.И. Герцена. 2007. № 24. С. 69–72.
7. Попова Н.В. Влияние частоты купонных платежей на цену облигации // Финансы: проблемы и решения. 2012. № 3. С. 40–44.
8. Лашевский П.А. Классификация инфраструктурных облигаций // Теория и практика общественного развития. 2013. № 10. С. 381–383.
9. Дарушин И.А. Оценка риска реинвестирования облигации. Дополняющая дюрация // Финансы и кредит. 2014. № 24 (600). С. 9–18.
10. Задорожная А.Н. Влияние ковенантов на доходность корпоративных облигаций // Финансы и кредит. 2015. № 7 (631). С. 34–44.
11. Назарова В.В., Левичев И.П. Разработка модели повышения эффективности управления инвестиционным портфелем // Экономический журнал Высшей школы экономики. 2017. Т. 21. № 3. С. 451–481.

12. Фрейдина И.А. Международный опыт финансирования инфраструктурных проектов // Экономическая политика. 2017. Т. 12. № 4. С. 196–203. DOI: 10.18288/1994-5124-2017-4-08.

13. Фомин М.В., Лахно Ю.В., Пышнограй А.П. Муниципальные облигации как инструмент развития инфраструктуры // Вопросы государственного и муниципального управления. 2019. № 2. С. 185–210.

14. Михайлов А.Ю. Временная структура ставок государственных облигаций // Финансовая аналитика: проблемы и решения. 2015. № 38. С. 42–52.

15. Буренин А.Н. Пределы макроэкономической политики под углом зрения экономических кризисов // Экономическая политика. 2019. Т. 14. № 1. С. 76–91. DOI: 10.18288/1994-5124-2019-1-76-91.

16. Бешенов С.В., Лапшин В.А. Параметрическая иммунизация процентного риска на основе моделей срочной структуры процентных ставок // Экономический журнал Высшей школы экономики. 2019. Т. 23. № 1. С. 9–31. DOI: 10.17323/1813-8691-2019-23-1-9-31.

17. Fabozzi F.J. Bond markets, analysis and strategies; 9th ed. New York: Pearson, 2014.

18. Fabozzi F.J. Fixed income mathematics: Analytical and statistical techniques; 4th ed. New York: McGraw-Hill Education, 2006.

19. Fabozzi F.J. Fixed income analysis; 2nd ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2007.

20. Galvani V., Landon S. Riding the yield curve: A spanning analysis // Review of Quantitative Finance and Accounting. 2013. Vol. 40, No 1, P. 135–154. DOI: 10.1007/s11156-011-0267-7.

21. Bieri D.S., Chincarini L.B. Riding the yield curve: Diversification of strategies // Working paper SSRN 547682. April 12, 2004. [Электронный ресурс]: https://ssrn.com/abstract=547682 (дата обращения: 14.02.2021). DOI: 10.2139/ssrn.547682.

22. Cox R.A.K., Felton J.M. Performance from riding the yield curve: 1980–1992 // Journal of Business and Economic Perspectives. 1994. Vol. 20. P. 128–132.

23. Wei Z., Xianhua W., Guofu W. An empirical research on the investment strategy of bond portfolios based on the changes of yield curves // Management Review. 2007. Vol. 6. P. 128–136.

24. Riding the yield curve: Risk taking behavior in a low interest rate environment / Chami R. [et al.] // International Monetary Fund Working Paper No 20/53. March 2020. [Электронный ресурс]: https://www.imf.org/-/media/Files/Publications/WP/2020/English/wpiea2020053-print-pdf.ashx (дата обращения: 10.01.2021).

25. A complex algorithm for selecting instruments to finance mergers and acquisitions / A. Yakunina [et al.] // Proceedings of the Third Workshop on Computer Modelling in Decision Making (CMDM 2018). Advances in Computer Science Research. February 2019. P. 31–35. [Электронный ресурс]: https://www.atlantis-press.com/article/55913498.pdf (дата обращения: 23.01.2021). DOI: 10.2991/cmdm-18.2019.6.

26. Improving the tools used in computer modelling of the bond liquidity assessment on the russian market / Y.V. Semernina [et al.] // Proceedings of the Workshop on Computer Modelling in Decision Making (CMDM 2016), Saratov, Russia, November 10–11, 2016. Vol. 1726. P. 100–108. [Электронный ресурс]: http://ceur-ws.org/Vol-1726/paper-10.pdf (дата обращения: 23.01.2021).

Об авторах

Коробов Евгений Александрович

заведующий лабораторией информационных систем в экономике, Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского, 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, 83;

E-mail: korobovea@yandex.ru

ORCID: 0000-0001-7198-5941

Семернина Юлия Вячеславовна

доктор экономических наук, доцент;

профессор кафедры «Финансы и банковское дело», Социально-экономический институт, Саратовский государственный технический университет им. Ю.А. Гагарина, 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77;

E-mail: ysemernina@yandex.ru

ORCID: 0000-0003-2098-795X

Усманова Алина Сергеевна

кандидат экономических наук;

доцент кафедры «Финансы и банковское дело», Социально-экономический институт, Саратовский государственный технический университет им. Ю.А. Гагарина, 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77;

E-mail: alina.brosalova@yandex.ru

ORCID: 0000-0002-8488-0425

Одинокова Кристина Анатольевна

преподаватель кафедры «Финансы и банковское дело», Социально-экономический институт, Саратовский государственный технический университет им. Ю.А. Гагарина, 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77;

E-mail: odinokova.kristina93@mail.ru

ORCID: 0000-0002-8191-1337

Robotizing bond portfolio selection on the Russian debt market on the basis of a modified strategy of riding the yield curve

Eugene A. Korobov [a]
E-mail: korobovea@yandex.ru

Yulia V. Semernina [b]
E-mail: ysemernina@yandex.ru

Alina S. Usmanova [b]
E-mail: alina.brosalova@yandex.ru

Kristina A. Odinokova [b]
E-mail: odinokova.kristina93@mail.ru

[a] Saratov State University
Address: 83, Astrakhanskaya Street, Saratov 410012, Russia

[b] Yuri Gagarin State Technical University of Saratov
Address: 77, Polytechnicheskaya Street, Saratov 410054, Russia

Abstract

The modern global debt market features historically low average interest rates, convergence of yields on bonds with different maturities, an increase of yield curve inversion emergence frequency and a large-scale trend to automate financial decision making. The researchers' attention in these fields is mainly focused on designing models that describe the state of the debt market as whole or its individual instruments in particular, as well as on risk management methods. At the same time, the specialized literature offers very few works concerning the topic of computer algorithms for bond portfolio selection based on traditional or advanced investment strategies. The aim of the present research is to create a modification of the existing algorithm of riding the yield curve strategy application, employing, first, average bond yield over the holding period instead of traditional bond yield to maturity; second, a developed algorithm for calculating the market spread on bonds; and, third, alternative risk evaluation indicators (compensation coefficients), which allow us to measure objectively price risk, liquidity risk, transaction costs risk and a general risk. The modification and the development of the algorithm for calculating the market spread were carried out using the direct measurement of the result technique, which entails application of the strategy to the data on bond issues received through the Moscow Exchange API. The selection of financial instruments was conducted in all sectors of the Russian debt market: public bonds, sub-federal and municipal bonds, corporate bonds. The modified algorithm enabled us to get extra yield for each selected bond issue, thereby proving the high effectiveness of the technique compared to the traditional strategy. Software implementation of the algorithm can be integrated into any robotized or semi-robotized stock exchange trading application.

Key words: modified riding the yield curve strategy; robotizing bond portfolio selection; algorithm for calculating the market spread on bonds; compensation coefficients; bond price risk; bond liquidity risk; bond transaction costs risk; general bond risk; investment software applications.

Citation: Korobov E.A., Semernina Y.V., Usmanova A.S., Odinokova K.A. (2021) Robotizing bond portfolio selection on the Russian debt market on the basis of a modified strategy of riding the yield curve. *Business Informatics*, vol. 15, no 4, pp. 7–21. DOI: 10.17323/2587-814X.2021.4.7.21

References

1. Zhengyao J., Xu D., Liang J. (2017) *A deep reinforcement learning framework for the financial portfolio management problem*. Working paper arXiv: 1706.10059v2. Available at: https://arxiv.org/pdf/1706.10059.pdf (accessed 22 December 2020).
2. Xiu G., Chan L. (2000) An algorithm for trading and portfolio management using Q-learning and Sharpe ratio maximization. Proceedings of the *International Conference on Neural Information Processing*. pp. 832-837. Available at: http://www.cse.cuhk.edu.hk/~lwchan/papers/iconip00-qsr.pdf (accessed 22 December 2020).
3. Almahdi S., Yang S. (2017) An adaptive portfolio trading system: A risk-return portfolio optimization using recurrent reinforcement learning with expected maximum drawdown. *Expert Systems with Applications,* no 87, pp. 267–279. DOI: 10.1016/j.eswa.2017.06.023.
4. Heaton J., Polson N., Witte J. (2016) Deep learning for finance: deep portfolios. *Applied Stochastic Models in Business and Industry* (electronic journal), vol. 33 (1), pp. 3–12. Available at: http://www.ssrn.com/abstract=2838013 (accessed 25 January 2021). DOI: 10.2139/ssrn.2838013.
5. Korobov N.F., Beloglazov A.A. (2005) Management of corporate bond portfolio. *Bulletin of Taganrog Institute of Management and Economics*, no 2, pp. 28–30 (in Russian).
6. Ponomarev A.A. (2007) Yield optimization of the sub-federal bond portfolio. *Bulletin of the Russian State Pedagogical University*, no 24, pp. 69–72 (in Russian).
7. Popova N.V. (2012) The influence of the coupon payments' frequency on the bond price. *Finance: Problems and Solutions*, no 3, pp. 40–44 (in Russian).
8. Lashevsky P.A. (2013) Classification of infrastructure bonds. *Theory and practice of social development*, no 10, pp. 381–383 (in Russian).
9. Darushin I.A. (2014) Assessment of the bond reinvestment risk. Complementing duration. *Finance and Credit,* no 24 (600), pp. 9–18 (in Russian).
10. Zadorozhnaya A.N. (2015) The influence of covenants on the corporate bond yield. *Finance and Credit*, no 7 (631), pp. 34–44 (in Russian).
11. Nazarova V.V., Levichev I.P. (2017) Development of the model of improving the effectiveness of investment portfolio. *HSE Economic Journal*, vol. 21, no 3, pp. 451–481 (in Russian).
12. Freydina I.A. (2017) International experience in financing infrastructure projects. *Economic policy*, vol. 12, no 4, pp. 196–203 (in Russian). DOI: 10.18288/1994-5124-2017-4-08.
13. Fomin M.V., Lakhno Yu.V., Pyshnograi A.P. (2019) Municipal bonds as an instrument for infrastructure development. *Issues of public and municipal governance*, no 2, pp. 185–210 (in Russian).
14. Mikhailov A.Yu. (2015) Term structure of public bond yield rates. *Financial analytics: problems and solutions*, no 38, pp. 42–52 (in Russian).
15. Burenin A.N. (2019) Limits of macroeconomic policy from the economic crises' point of view. *Economic policy*, vol. 14, no 1, pp. 76–91 (in Russian). DOI: 10.18288/1994-5124-2019-1-76-91.
16. Beshanov S.V., Lapshin V.A. (2019) Parametric immunization of interest rate risk via term structure models. *HSE Economic Journal*, vol. 23, no 1, pp. 9–31 (in Russian). DOI: 10.17323/1813-8691-2019-23-1-9-31.
17. Fabozzi F.J. (2014) *Bond markets, analysis and strategies*; 9th ed. New York: Pearson.
18. Fabozzi F.J. (2006) *Fixed income mathematics: Analytical and statistical techniques*; 4th ed. New York: McGraw-Hill Education.
19. Fabozzi F.J. (2007) *Fixed income analysis*; 2nd ed. New Jersey: John Wiley & Sons.
20. Galvani V., Landon S. (2013) Riding the yield curve: A spanning analysis. *Review of Quantitative Finance and Accounting*, vol. 40, no 1, pp.135–154. DOI: 10.1007/s11156-011-0267-7.
21. Bieri D.S., Chincarini L.B. (2004) *Riding the yield curve: Diversification of strategies.* Working paper SSRN 547682 (April 12, 2004). Available at: https://ssrn.com/abstract=547682 (accessed 14 February 2021). DOI: 10.2139/ssrn.547682.
22. Cox R.A.K., Felton J.M. (1994) Performance from riding the yield curve: 1980-1992. *Journal of Business and Economic Perspectives*, vol. 20, pp. 128–132.
23. Wei Z., Xianhua W., Guofu W. (2007) An empirical research on the investment strategy of bond portfolios based on the changes of yield curves. *Management Review,* vol. 6, pp. 128–136.
24. Chami R., Cosimano T.F., Rochon C., Yung J. (2020) Riding the yield curve: Risk taking behavior in a low interest rate environment. *International Monetary Fund Working Paper*, no. 20/53. Available at: https://www.imf.org/-/media/Files/Publications/WP/2020/English/wpiea2020053-print-pdf.ashx (accessed 10 January 2021).
25. Yakunina A., Varygin S., Nesterenko E., Korobov E., Semernina Y., Yakunin S. (2019) A complex algorithm for selecting instruments to finance mergers and acquisitions. Proceedings of the *Third Workshop on Computer Modelling in Decision Making (CMDM 2018)*, *Saratov, Russia, November 14–17, 2018.* Advances in Computer Science Research, February 2019, pp. 31–35. DOI: 10.2991/cmdm-18.2019.6
26. Semernina Y., Yakunina A., Nesterenko E., Yakunin S., Korobov E. (2016) Improving the tools used in computer modelling of the bond liquidity assessment on the Russian market. Proceedings of the *Workshop on Computer Modelling in Decision Making (CMDM 2016), Saratov, Russia, November 10–11, 2016.* CEUR-WS, vol. 1726, pp. 100–108. Available at: http://ceur-ws.org/Vol-1726/paper-10.pdf (accessed 23 January 2021).

About the authors

Eugene A. Korobov

Head of Laboratory of IT in Economics, Saratov State University, 83 Astrakhanskaya Street, Saratov 410012, Russia;

E-mail: korobovea@yandex.ru

ORCID: 0000-0001-7198-5941

Yulia V. Semernina

Dr. Sci. (Econ.), Associate Professor;

Professor, Department of Finance and Banking, Socio-Economic Institute, Saratov State Technical University, 77 Polytechnicheskaya Street, Saratov 410054, Russia;

E-mail: ysemernina@yandex.ru

ORCID: 0000-0003-2098-795X

Alina S. Usmanova

Cand. Sci. (Econ.);

Associate Professor, Department of Finance and Banking, Socio-Economic Institute, Saratov State Technical University, 77 Polytechnicheskaya Street, Saratov 410054, Russia;

E-mail: alina.brosalova@yandex.ru

ORCID: 0000-0002-8488-0425

Kristina A. Odinokova

Lecturer, Department of Finance and Banking, Socio-Economic Institute, Saratov State Technical University, 77 Polytechnicheskaya Street, Saratov 410054, Russia;

E-mail: odinokova.kristina93@mail.ru

ORCID: 0000-0002-8191-1337

DOI: 10.17323/2587-814X.2021.4.22.35

К вопросу о восстановлении символьных последовательностей, кодирующих зашумленные периодические функции

Г.Н. Жукова [a]
E-mail: galinanzhukova@gmail.com

М.В. Ульянов [b,c]
E-mail: muljanov@mail.ru

[a] Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»
Адрес: 101000, г. Москва, ул. Мясницкая, д. 20

[b] Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук
Адрес: 117997, г. Москва, ул. Профсоюзная, д. 65

[c] Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова
Адрес: 119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1

Аннотация

В бизнес-информатике, одним из предметов исследования которой является анализ данных о процессах в прикладных предметных областях, возникают задачи качественного анализа. Такого рода задачи возникают, например, при качественном исследовании лог-файлов бизнес-процессов, при анализе и прогнозировании временных рядов, и других процессов различной природы. Достаточно часто для представления информации об исследуемых процессах в методах качественного анализа используется символьное кодирование, позволяющее снять излишнюю детализацию числовых описаний. Актуальность данного исследования связана с тем, что при работе с исходными данными исследователи зачастую сталкиваются с наличием шумов и искажений в исходных данных, что существенно затрудняет решение задач качественного анализа. При работе с символьными представлениями исследуемых процессов, которые достаточно часто имеют периодический характер, мы наблюдаем шумы удаления, вставки и замены символов, усложняющие решение задачи определения и анализа периодичности. В статье рассматривается задача восстановления периодических символьных последовательностей, полученных кодированием по отсчетам периодических функций и искаженных шумами вставки, замены и удаления символов. В качестве конкретного примера синтетических данных временных рядов рассматриваются тригонометрические функции. Для кодирования тригонометрических функций используются алфавиты различных мощностей с различной детализацией интервалов отсчетов по модельному времени. В статье представлено экспериментальное исследование зависимости характеристик качества метода восстановления периода и периодически повторяющегося фрагмента, ранее предложенного авторами и усовершенствованного в данном исследовании. Для алфавитов разной мощности при фиксированных интервалах отсчетов по модельному времени приводятся доля последовательностей с удовлетворительно восстановленным

периодом и относительная погрешность определения длины периода. Качество восстановления периодически повторяющегося фрагмента оценивается отношением редакционного расстояния от восстановленной периодической последовательности до исходной последовательности, искаженной шумами.

Ключевые слова: символьная последовательность; мощность алфавита; периодическая последовательность; зашумленная последовательность; шум вставки; шум удаления; шум замены.

Цитирование: Жукова Г.Н., Ульянов М.В. К вопросу о восстановлении символьных последовательностей, кодирующих зашумленные периодические функции // Бизнес-информатика. 2021. Т. 15. № 4. С. 22–35. DOI: 10.17323/2587-814X.2021.4.22.35

Введение

Одним из предметов научных исследований в бизнес-информатике является анализ данных о процессах, регистрируемых в прикладных предметных областях [1]. Веер возникающих задач анализа данных включает в себя и задачи качественного анализа. Они возникают, например, при качественном исследовании лог-файлов бизнес-процессов [1] и связаны, например, с определением соответствия лог-файла модели процесса [2]. Одним из способов представления информации об исследуемых процессах в научных исследованиях является их представление в виде временных рядов. При этом значительная доля задач качественного анализа относится как раз к исследованиям в области временных рядов, и связана как с анализом их периодичности, так и в целом с проблематикой их комплексного анализа и прогнозирования [3–8]. Аналогичные качественные задачи возникают и при анализе других процессов различной природы, представленных временными рядами, например, при экологическом мониторинге и прогнозировании экологических изменений [9].

Наблюдаемые значения исследуемого процесса, являющиеся элементам временного ряда достаточно часто подвержены воздействию случайных искажений, вызванных внешними факторами. «Значения, сопоставляемые элементам получающегося ряда, содержат и ошибки измерения и, в общем случае, подвержены случайным внешним воздействиям. В дальнейшем такого рода ошибки измерений и результаты внешних воздействий трактуются, как шум» [10].

Укажем на некоторые публикации из области бизнес-информатики и менеджмента, в которых так или иначе обсуждается и/или нивелируется влияние шумов на результаты прогнозирования временных рядов. Так авторы отмечают, что при создании моделей и прогнозировании производства и потребления электроэнергии шумы в исходных данных оказывают влияние на прогностическую силу моделей и качество прогнозов [11–13]. Стохастическое прогнозирование рисков в бизнесе [14], в том числе риска операционной прибыли фирм, существенно опирается на предположение о неполноте и зашумленности данных. Авторы работы [15], указывают, что при исследовании поведения клиентов банка методом кластеризации временных рядов учитываются ошибки и разброс исходных данных. В работе [16] при оценке эффективности прогнозирования потоков пассажирских авиаперевозок с использованием множественных показателей ошибок, в частности показано, что шумы исходных данных влияют на качество прогнозирования. Авторы работы [17] пытаются повысить качество прогнозирования туристического спроса с помощью методов глубокого обучения совместно с обработкой изображений визуализации временных рядов, и снизить тем самым влияние ошибок исходных данных на результаты прогнозирования.

Из других предметных областей отметим, например, микроэлектронику, где размытости изображений, связанные с шумами, сильно влияют на качество прогнозирования [18], и наблюдения за биосферой, где авторы отмечают, что биометрические данные (в широком понимании, как данные наблюдения за биосферой) часто имеют пропуски наблюдений, выбросы и разрывы [19]. Для еще одной предметной области – дистанционного зондирования Земли из космоса, приведем цитату из [20]: «Использование временных рядов спутниковых данных для мониторинга земной поверхности

сопряжено с проблемой учета разного рода мешающих факторов, приводящих к частичной потере или искажению информации о динамике спектрально-отражательных характеристик объектов наблюдения. К таким факторам относятся непрозрачные в видимом и ближнем ИК диапазоне атмосферная дымка и облачность, тени от нее, а также шумы прибора».

В целях решения задач качественного анализа, данные временных рядов подвергаются символьному кодированию, позволяющему снять излишнюю детализацию числовых описаний [21–23]. При этом описание элементов временного ряда или шагов бизнес-процесса кодируется словом над конечным алфавитом, которое и является объектом дальнейшего исследования. Более того, такое кодирование является актуальным при качественном анализе больших данных. Это связано с тем, что высокая точность числовых представлений элементов временных рядов приводит не только к неоправданно большим объемам информации, но и трудоемким вычислениям, не улучающим качество получаемых результатов [22, 23].

Очевидно, что при исследовании временных рядов работа с зашумленными данными вызывает значительные трудности. Это приводит к формулировке задачи устранения шума. Для шумоподавления в числовых данных временных рядов используются различные методы сглаживания, такие как методы скользящего среднего, экспоненциального сглаживания и др. [10]. Однако эти методы не применимы при работе с зашумленными символьными последовательностями.

В аспекте символьного кодирования возникающие ошибки, трактуемые как шум, приводят к тому, что в символьных последовательностях возникают шумы вставки, удаления и замены символов. Так, например, ошибки, связанные с настройкой измерительных приборов, неточности при ручном вводе данных и случайные описки или преднамеренное искажение значений отдельных показателей [19], приводят к шуму замены. Ошибки регистрации являются источником шума удаления и шума вставки, эти шумы могут так же возникать и при подготовке данных. Отметим также, что методы выявления периодичности, применяемые для числовых последовательностей [24], неприменимы при работе с символьными представлениями.

Актуальность данного исследования связана с тем, что шумы снижают эффективность анализа временных рядов. В связи с этим в статье рассматривается задача восстановления периодических символьных последовательностей, полученных кодированием по отсчетам периодических функций и искаженных шумами вставки, замены и удаления символов. В качестве конкретного примера синтетических данных временных рядов рассматриваются тригонометрические функции. Для кодирования тригонометрических функций используются алфавиты различных мощностей с различной детализацией интервалов отсчетов по модельному времени.

В статье представлено экспериментальное исследование зависимости характеристик качества метода восстановления периода и периодически повторяющегося фрагмента, ранее предложенного авторами работы [25] и усовершенствованного в данном исследовании. Для алфавитов разной мощности при фиксированных интервалах отсчетов по модельному времени приводятся доля последовательностей с удовлетворительно восстановленным значением длины периода и относительная погрешность определения длины периода. Качество восстановления периодически повторяющегося фрагмента оценивается отношением редакционного расстояния от восстановленной периодической последовательности до исходной последовательности, искаженной шумами.

1. Терминология и обозначения

Далее мы будем использовать обозначения, введенные нами в статье [25], описывающей метод восстановления периодической символьной последовательности.

Обозначим $\sum^{\sigma}$ алфавит мощности $\sigma = \left|\sum\right| \geq 2$. Будем называть словом длины n символьную последовательность $q^{\sigma} = s_1, s_2, ..., s_n$ над конечным алфавитом $\sum^{\sigma}$, где s –произвольный символ из $\sum^{\sigma}$, а подсловом или фрагментом слова q^{σ} назовем любую последовательность символов $s_k, s_{k+1}, ..., s_{l-1}, s_l$, $1 \leq k \leq l \leq n$.

Мы рассматриваем периодические символьные последовательности с периодом p. Во избежание неоднозначности понимания, будем называть периодом p длину повторяющегося подслова (фрагмента), а часть периодической последовательности длины p назовем периодически повторяющимся фрагментом. Если не оговорено иное, периодически повторяющимся фрагментом будем называть фрагмент длины p, начинающийся с первого символа периодического слова.

Введем следующие обозначения: $q^{\sigma}(m, p)$ – периодическое слово, содержащее $m \geq 8$ повторяющихся фрагментов длины p; $\tilde{q}^{\sigma}(m, p)$ – слово над тем же алфавитом, что и $q^{\sigma}(m, p)$, но с внесенным в него шумом; $\overline{q}^{\sigma}(m, p)$ – периодическое слово, полученное на основе анализа $\tilde{q}^{\sigma}(m, p)$ с помощью алгоритма из работы [25] с предлагаемыми в данной статье улучшениями.

Заметим, что слово $\overline{q}^{\sigma}(m, p)$ имеет такую же длину, как $\tilde{q}^{\sigma}(m, p)$ и служит аппроксимацией периодического слова $q^{\sigma}(m, p)$.

2. Постановка задачи

Пусть наблюдается некоторый непрерывный во времени, периодический процесс $g(t)$ от момента t_0 до момента $t_0 + n\Delta t$ в ходе которого через равные промежутки времени Δt измеряется величина $g(t_i)$, $i = 1, n$. Разбивая диапазон измеренных значений величины $g(t)$ на σ равных полусегментов и кодируя значения $g(t_i)$ символами алфавита $\sum^{\sigma}$, мы получаем символьную последовательность $q^{\sigma} = s_1, s_2, ..., s_n$ над этим алфавитом. Заметим, что некоторые символы алфавита $\sum^{\sigma}$ могут при этом не присутствовать в полученной символьной последовательности. Будем считать, что период p наблюдаемой функции g кратен длине интервала Δt между последовательными измерениями, т.е. $p = r\,\Delta t$, где r целое число, благодаря чему при кодировании периодической функции $g(t)$ на сегменте в m периодов получается периодическая символьная последовательность, также содержащая m периодов, при этом $n = mp = mr\,\Delta t$.

Теперь внесем случайные искажения в измеренные значения функции $g(t)$, будем рассматривать шумы вставки, замены и удаления. Вставка нового значения соответствует некоторому сбою в измерениях, когда между запланированными измерениями произошло внеочередное измерение, удаление означает потерю значения при вводе или передаче измерений, заменой считается неправильное измерение или сознательное искажение данных.

После внесения всех искажений мы получаем последовательность с шумом, которую кодируем в том же алфавите $\sum^{\sigma}$ и рассматриваем задачу восстановления периодической символьной последовательности по заданной последовательности с шумом.

В данной статье мы рассматриваем символьные последовательности, полученные кодированием (в отсчетах через Δt) последовательности значений непрерывной периодической функции (в частности, $\sin(t)$) на сегменте с длиной не менее восьми полных периодов ($m \geq 8$) в условиях их искажения шумами различных типов.

При кодировании непрерывной функции существенную роль играет выбор мощности алфавита. Мы кодируем каждую рассматриваемую функцию символами алфавитов мощности от 10 до 60 с шагом 10. Несмотря на то, что при кодировании с помощью разбиения диапазона значений кодируемой функции на равные полусегменты некоторые символы алфавита могут не встретиться в неискаженной периодической символьной последовательности, такие символы могут наблюдаться в последовательности, полученной кодированием искаженной последовательности измеренных значений функции.

Постановка задачи: изучить влияние мощности алфавита, вида функции и уровня шума на качество восстановления периодической символьной последовательности, полученной кодированием значений периодической функции в условиях ее искажения шумами вставки, замены и удаления значений.

3. Кодирование непрерывной периодической функции

Рассмотрим функцию $\sin(t)$ на сегменте $[0 - 16\pi]$, содержащем 8 полных периодов функции $\sin(t)$. Для построения числовой последовательности с периодом p разбиваем интервал $[0 - 16\pi]$ на $8p$ равных полусегментов длины $\Delta t = \frac{2\pi}{p}$ и вычисляем значение функции $\sin(t)$ в середине каждого полусегмента, получая последовательность из $8p$ вещественных чисел $y_1, y_2, ..., y_{8p}$.

В целях символьного кодирования полученных значений в алфавите мощности σ разбиваем область значений синуса – сегмент $[-1, 1]$ на σ последовательных полусегментов $I_1, I_2, ..., I_{\sigma}$ равной длины; при этом число полусегментов равно мощности алфавита. Ставим в соответствие полусегментам $I_1, I_2, ..., I_{\sigma}$ символы алфавита $\sum^{\sigma}$. Каждое число в последовательности $y_1, y_2, ..., y_{8p}$ кодируется символом, соответствующем тому полусегменту I_j, в которое это число попадает, в результате мы получаем символьную последовательность $q^{\sigma}(m, p)$. Заметим, что некоторые символы алфавита $\sum^{\sigma}$ могут не встретиться в этой последовательности.

4. Метод определения периода по периодической последовательности с шумом

Для понимания предлагаемых улучшений метода построения периодически повторяющегося фрагмента приведем краткое описание метода определения периода [25, 26].

Метод предполагает подсчет числа всех подслов длины $k = 10$ в зашумленной последовательности $\tilde{q}^{\sigma} = s_1, s_2, ..., s_n$. Подслова длины 10 в $\tilde{q}^{\sigma}$ берутся со сдвигом на один символ, т.е. рассматриваются подслова $s_1, s_2, ..., s_{10}$, $s_2, s_3, ..., s_{11}$ и т.д. Те подслова, которые встретились не менее 3-х раз, составляют множество R. Каждому подслову из R сопоставляется список номеров позиций символов последовательности $\tilde{q}^{\sigma}$, начиная с которых данное подслово входит в $\tilde{q}^{\sigma}$. Так, в последовательности «*abcabcdabcdeabcabcdabcde*» посдлово «*abcabcdabc*» входит, начиная с номеров позиций 1 и 13.

Далее для каждого подслова длины $k = 10$ подсчитываются разности между номерами последовательных вхождений, после чего из таких разностей строится множество Ω. Каждому элементу множества Ω сопоставлено количество раз, когда наблюдалась такая разность номеров последовательных вхождений первых символов подслов длины 10. Например, в слове «*abcabcdabcdeabcabcdabcde*» разность $r = 13 - 1 = 12$ наблюдается 3 раза (для слов «*abcabcdabc*», «*bcabcdabcd*», «*cabcdabcde*»). За счет внесенного шума разности не всегда равны или даже кратны периоду, но большинство разностей принимает значения, близкие к периоду или к числу, кратному периоду. В связи с этим для каждого значения разности подсчитывается, сколько раз встречалась в Ω разность, близкая к ней. В наших экспериментах близость определялась как попадание в интервал ±20%. Анализ полученных разностей и позволяет получить оценку периода для неизвестной строго периодической последовательности [25].

5. Усовершенствованный метод построения периодически повторяющегося фрагмента

Решением, которое доставляет алгоритм из работы [25] в части построения периодически повторяющегося фрагмента является подслово $\tilde{f}^{\sigma} = s_1, s_2, \ldots, s_{\tilde{p}}$ длины $\tilde{p}$ анализируемого слова $\tilde{q}^{\sigma}(m, p)$, минимизирующее (на множестве полученных вариантов фрагментов) редакционное расстояние от символьной последовательности длины $|\tilde{q}^{\sigma}(m, p)|$, построенной из данного фрагмента, до последовательности $\tilde{q}^{\sigma}(m, p)$.

Построение аппроксимирующего периодически повторяющегося фрагмента $\tilde{f}^{\sigma}$ в работе [25] проводится путем разбиения искаженной последовательности на последовательные подслова длины $\tilde{p}$ (последнее подслово длины меньше $\tilde{p}$ не учитывалось) и выбора такого из них, у которого редакционное расстояние до одного из оставшихся подслов минимально. В случае, если таких подслов несколько, выбирается первое подслово с минимальным редакционным расстоянием до другого подслова.

Предлагаемый нами и описываемый далее метод пытается улучшить фрагмент $\tilde{f}^{\sigma}$ с целью получения меньшего значения редакционного расстояния между искаженной и аппроксимирующей периодической последовательностями. Предлагаемое улучшение достигается за счет использования информации об определенных ранее частотах подслов длины $k = 10$, наблюдаемых в $\tilde{q}^{\sigma}(m, p)$.

Вначале на основе фрагмента $\tilde{f}^{\sigma}$ строится слово $\tilde{f}_4^{\sigma}$, содержащее фрагмен $\tilde{f}^{\sigma}$, записанный четыре раза подряд. Затем каждое подслово фрагмента $\tilde{f}_4^{\sigma}$ длины $k = 10$ ($s_1, s_2, ..., s_{10}$; $s_2, s_3, ..., s_{11}$ и т.д.) проверяется на встречаемость в слове $\tilde{q}^{\sigma}(m, p)$ не менее 3 раз, т.е. на принадлежность множеству R. Первое из проверяемых подслов $\omega_0 = s_{t+1}, s_{t+2}, ..., s_{t+10}$, принадлежащее множеству R, становится стартовым подсловом, с него будет начинаться улучшенный периодический фрагмент. Если такого подслова не нашлось, периодический фрагмент остается без улучшения.

После того, как найдено подслово ω_0, последовательно просматриваются подслова ω из $\tilde{f}_4^{\sigma}$ со сдвигом на один символ, т.е. $\omega = s_{t+h}, s_{t+h+1}, ..., s_{t+h+9}$, $h = 2, 3, ...$, выполняется проверка принадлежности этих подслов множеству R. Если подслово принадлежит R, то соответствующее подслово слова $\tilde{f}_4^{\sigma}$ остается без изменений, иначе начинаем подсчет последовательных подслов (со сдвигом на один символ) не входящих в R.

Поскольку длина ω равна 10, то пока не наберется 10 последовательных подслов, не входящих в R, слово $\tilde{f}_4^{\sigma}$ остается без изменений. Если после менее 10 последовательных ω, не входящих в R очередное ω оказалось входящим в R, то обнуляется счетчик последовательных подслов, не входящих в R. Если же в R не нашлось 10 последовательных подслов ω, но одиннадцатое ω входит в R то начинается поиск

подслова ω^R в R, такого, что первые m символов ω^R совпадают с последними m символами ω^- – последнего из рассматриваемых подслов, входящего в R, $3 \le m \le 9$. Значения m берутся от 9 до 3, т.е. сначала пытаемся найти ω^R, у которого первые 9 символов совпадают с последними 9 символами ω^-, если такое ω^R найдено, то в $\tilde{f}_4^\sigma$ заменяем символ, следующий за последним символом подслова ω^-, на последний символ ω^R.

Если при $m = 9$ подслово ω^R не найдено, переходим к $m = 8$ и т.д. до $m = 3$. Пусть при некотором m от 3 до 9 нашлось ω^R, тогда в $\tilde{f}_4^\sigma$ заменяем на символ, следующий за последним символом подслова ω^-, на $(m + 1)$-й символ ω^R. Если ни для какого m от 3 до 9 не нашлось ω^R, то фрагмент $\tilde{f}_4^\sigma$ остается без улучшения.

В какой-то момент или будут просмотрены $2\tilde{p}$ последовательных подслов ω и не встретится ни разу фрагмент ω_0 или очередное подслово ω совпадет с ω_0. В первом случае в качестве улучшенного фрагмента $\tilde{f}^\sigma$ берем первые $\tilde{p}$ символов $\tilde{f}_4^\sigma$ начиная с первого символа ω_0 (т.е. из $\tilde{f}_4^\sigma$ вырезаем ω_0 и следующие за ним в $\tilde{f}_4^\sigma$ символы, всего $\tilde{p}$ символов). Во втором случае $\tilde{f}^\sigma$ состоит из символов $\tilde{f}_4^\sigma$, начиная с первого вхождения ω_0 до второго ω_0, при этом проверяется возможность того, что в конце периодического фрагмента за счет шума вставки или удаления потерялся или добавился один символ.

Проверка делается следующим образом. Если после очередного ω, входящего в R в $\tilde{f}_4^\sigma$ было 9 последовательных подслов, не входящих в R, после которых нашлось слово из R и это слово совпало с ω_0, то возможно, имел место шум удаления. Для проверки в множестве R ищем ω^R, у которого первые m символов совпадают с последними m символами ω. Если такое слово ω^R найдено и у него символы, начиная с $(m + 2)$-го совпадают с первыми символами , ω_0 то в конец $\tilde{f}^\sigma$ добавляем $(m + 1)$-й символ ω^R.

Кроме того, если после очередного ω, входящего в R в $\tilde{f}_4^\sigma$ было 9 последовательных подслов, не входящих в R, после которых нашлось слово из R и это слово совпало с ω_0, возможно, был шум вставки, от которого пытается избавиться так. Если первый символ ω_0 совпадает с последним символом ω, то в $\tilde{f}^\sigma$ не включаем последний символ перед вторым вхождением ω_0 в $\tilde{f}_4^\sigma$.

Для того, чтобы одновременно с поиском улучшенного фрагмента $\tilde{f}^\sigma$ уточнить значение периода, просматриваются $2\tilde{p}$ последовательных подслов ω слова $\tilde{f}_4^\sigma$, пока на очередном шаге среди ω не встретится слово ω_0, тогда улучшенным фрагментом считается подслово улучшенного $\tilde{f}_4^\sigma$, начиная с первого вхождения ω_0 до второго, если только при этом период получается не менее 3. Если за счет изменений в $\tilde{f}_4^\sigma$ в процессе улучшения не нашлось еще одного ω_0, то после окончания процесса улучшения происходит еще один просмотр $2\tilde{p}$ последовательных подслов ω слова $\tilde{f}_4^\sigma$ начиная с первого вхождения ω_0, при этом если нашлось второе вхождение ω_0, то улучшенным фрагментом считается подслово улучшенного $\tilde{f}_4^\sigma$, начиная с первого вхождения ω_0 до второго. Если второе вхождение ω_0 не нашлось, то в качестве улучшенного фрагмента берутся $\tilde{p}$ последовательных символов улучшенного $\tilde{f}_4^\sigma$, начиная с первого вхождения ω_0.

В случае, если удалось улучшить периодический фрагмент, рассматриваются его циклические сдвиги, и в качестве окончательного фрагмента берется такой сдвиг, у которого минимально редакционное расстояние до начала зашумленной последовательности, т.е. ее первых $\tilde{p}^*$ символов, где $\tilde{p}^*$ – длина улучшенного периодического фрагмента.

Если в результате улучшения фрагмента получено подслово длины больше трех, и редакционное расстояние от периодической последовательности, построенной повторением улучшенного фрагмента, до зашумленной меньше, чем в случае $\tilde{f}^\sigma$ до улучшения, в качестве аппроксимации периодически повторяющегося фрагмента используем улучшенный $\tilde{f}^\sigma$, иначе – исходный.

6. Оценка качества восстановления периода

Оценку точности определения периода и качества восстановления периодического фрагмента будем проводить отдельно. Пусть период последовательности до внесения искажений был равен p, а наш алгоритм определил, что период равен $\overline{p} = \overline{p}\left(\overline{q}^\sigma\right)$, тогда точность δ нахождения периода определяется как

$$\delta = \frac{|p - \overline{p}|}{p}. \qquad (1)$$

Для периодической последовательности, полученной кодированием периодической функции на восьми периодах, мы получаем серию из 100 случайно зашумленных последовательностей, для каждой из них определяем период и находим значение δ, затем вычисляем среднее значение δ и медиану выборки по 100 зашумленным последовательностям.

Качество восстановления периодического фрагмента будем оценивать путем вычисления отношения редакционного расстояния $d\left(\overline{q}^{\sigma}, q^{\sigma}(m,p)\right)$ между восстановленной и исходной периодической символьными последовательностями, к длине исходной периодической последовательности [27]. Обозначим это отношение $\varepsilon\left(\overline{q}^{\sigma}, q^{\sigma}\right)$:

$$\varepsilon\left(\overline{q}^{\sigma}, q^{\sigma}\right) = \frac{d\left(\overline{q}^{\sigma}, q^{\sigma}(m,p)\right)}{mp}. \qquad (2)$$

При таком подходе хорошую оценку будет давать случай, когда полученный алгоритмом период в два-три раза больше исходного, но при этом периодический фрагмент близок к оригиналу, повторенному нужное число раз.

Кроме того, проводилось сравнение исходной и восстановленной последовательностей с зашумленной, в этом случае от каждой периодической последовательности для сравнения были взяты первые n символов, где n – длина зашумленной последовательности.

7. Схема вычислительного эксперимента

В вычислительном эксперименте проводилось исследование предложенного в работах [25, 26] и улучшенного в данной статье метода на следующих функциях:

- $\sin(t)$ на сегменте $[0 - 16\pi]$;
- $\left(t - 8\left\lfloor\frac{t}{8}\right\rfloor + 1\right)\sin(\pi t)$ на сегменте $[0 - 64]$;
- $\left(t - 16\left\lfloor\frac{t}{16}\right\rfloor + 1\right)\sin(\pi t)$ на сегменте $[0 - 128]$;
- $\left|7 - t + 16\left\lfloor\frac{t}{16}\right\rfloor\right|\sin(\pi t)$ на сегменте $[0 - 128]$,

где $\lfloor ... \rfloor$ означает целую часть числа.

Таком образом, для всех функций рассматривался сегмент аргумента, содержащий 8 полных периодов. Кодирование функций производилось в алфавитах $\sum^{\sigma}$ мощности σ от 10 до 60 с шагом 10. Область значений функции разбивалась на σ интервалов, при этом каждый интервал I_j кодировался символом s_j алфавита $\sum^{\sigma}$.

Значения периода p выбирались равными 20, 30 и 50, при этом один период функции разбивался на p равных полусегментов, затем для каждого полусегмента Δt_i находилось значение функции в середине полусегмента, и по этому значению определялся полусегмент I_j, которому это значение принадлежит, после чего на i-ую позицию кодирующего слова записывался символ s_j, кодирующий полусегмент I_j. Так были получены периодические символьные последовательности в алфавитах мощности от 10 до 60.

На основе построенных периодических последовательностей были получены случайные зашумленные последовательности, по 100 последовательностей на каждую чисто периодическую. Шум вносился в соответствии с ранее предложенной нами вероятностной моделью шумов для периодических символьных последовательностей [28].

В первой серии экспериментов вносили шум с общим уровнем 5%, при этом уровни шума вставки, замены и удаления принимали значения от 1 до 5% с шагом 1%, так что сумма уровней шума равна 5%. Во второй серии был внесен шум, равномерно распределенный по типам, т.е. уровень шума вставки, замены и удаления был одинаковым в отдельном эксперименте, принимая значения от 1 до 4% с шагом 1%.

8. Результаты и обсуждение

Результаты экспериментальных исследований по всем четырем функциям приведены на *рисунках 1–4* и в *таблицах 1* и *2*. На *рисунках 1–4* мы показываем числовые последовательности значений функций на двух периодах, содержащие 50 отсчетов на период, при мощности алфавита кодирования 20. На рисунках по оси абсцисс отложены номера отсчетов, а по оси ординат – номера полусегментов кодирования, которым соответствуют символы алфавита мощности 20.

Для всех функций, в качестве примера, показан один вариант внесения шума из исследованных разнообразных вариантов. А именно – вариант с общим уровнем шума в 5%, состоящим из шума удаления в 2% и шума вставки в 3%. На всех рисунках черные точки соответствуют исходной периодической последовательности, полученной из указанной функции, серые точки – это зашумленная последовательность значений функции в отсчетах, а белые с обводкой – это восстановленная исследуемым алгоритмом периодическая последовательность. Пунктир показывает последовательность точек по отсчетам.

Результаты исследования по оценке точности δ определения периода показали, что для всех функций полученные результаты не сильно отличаются друг от друга, т.е. исследуемый метод слабо чувстви-

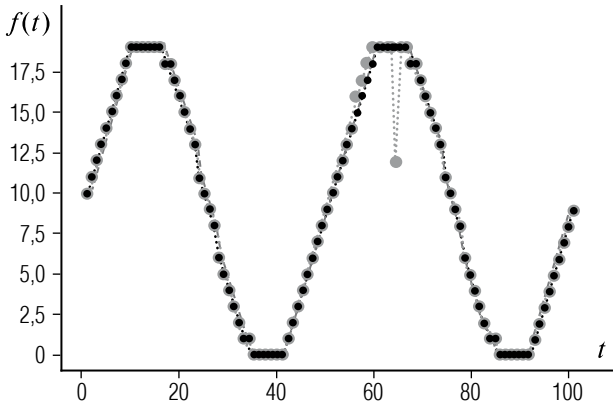

Рис. 1. Два периода функции $\sin(t)$, общий шум 5%, шум удаления 2%, шум вставки 3%, 50 отсчетов на период, мощность алфавита кодирования – 20 символов

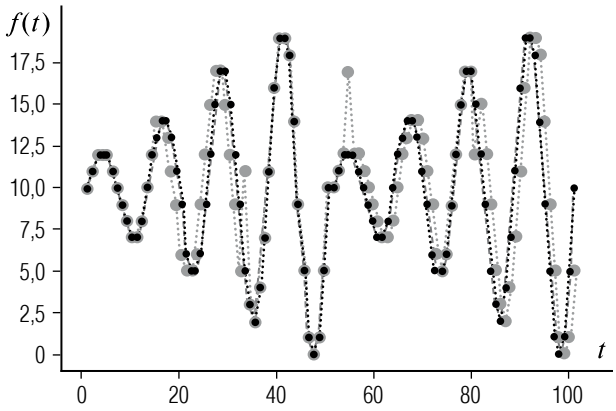

Рис. 2. Два периода функции $\left(t-8\left\lfloor\frac{t}{8}\right\rfloor+1\right)\sin(\pi t)$, общий шум 5%, шум удаления 2%, шум вставки 3%, 50 отсчетов на период, мощность алфавита кодирования – 20 символов

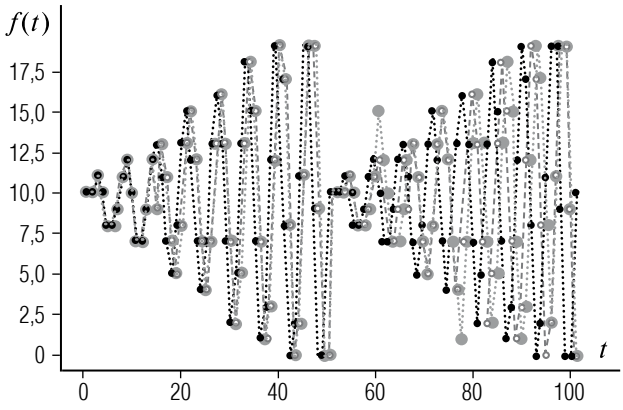

Рис. 3. Два периода функции $\left(t-16\left\lfloor\frac{t}{16}\right\rfloor+1\right)\sin(\pi t)$, общий шум 5%, шум удаления 2%, шум вставки 3%, 50 отсчетов на период, мощность алфавита кодирования – 20 символов

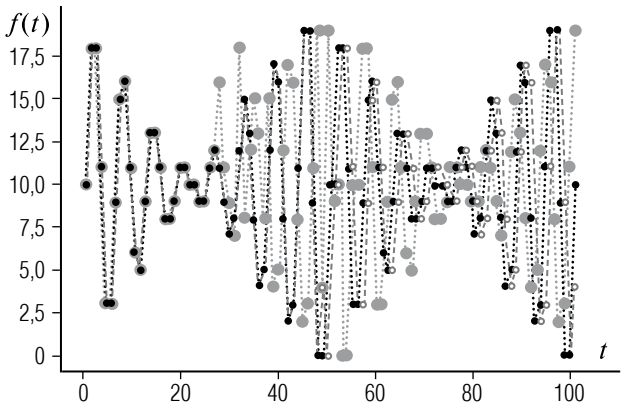

Рис. 4. Два периода функции $\left|7-t+16\left\lfloor\frac{t}{16}\right\rfloor\right|\sin(\pi t)$, общий шум 5%, шум удаления 2%, шум вставки 3%, 50 отсчетов на период, мощность алфавита кодирования – 20 символов

телен к виду периодической функции (по крайней мере для данных четырех функций). С связи с этим мы приводим результаты только для одной функции.

Для лучшей наглядности мы приводим в *таблице 1* не среднее значение δ, усредненное по 100 экспериментам путем внесения случайных шумов с заданным уровнем, а долю последовательностей (из 100 зашумленных) с восстановленным периодом, значение которого не более чем на 2% отличается от исходного периода.

Результаты исследований по качеству восстановления периодически повторяющегося фрагмента улучшенным алгоритмом приведены в *таблице 2.* Значения медианы $\varepsilon\left(\overline{q}^{\sigma}, q^{\sigma}\right)$ приведены для всех четырех исследованных функций при шуме равномерной структуры. При этом в каждую из 100 исходных последовательностей случайно вносился одинаковый уровень шума каждого типа (вставка, удаление, замена) Этот уровень изменялся от 1 до 4% с шагом 1%. Эксперименты были проведены для всех мощностей алфавита – 10, 20, 30, 40 и 50 и всех значений периода. В *таблице 2* приведены результаты для значения периода $p = 50$.

По полученным экспериментальным данным усовершенствованный метод восстановления периода и периодически повторяющегося фрагмента

Таблица 1.

Доля символьных последовательностей с восстановленным периодом, не более чем на 2% отличающимся от исходного, функция –

$$\left(t-8\left\lfloor\frac{t}{8}\right\rfloor+1\right)\sin(\pi t)$$

Уровень шума, %			Мощность алфавита (количество символов)					
удаление	замена	вставка	10	20	30	40	50	60
0	0	5	25	26	33	24	26	31
0	1	4	25	16	22	26	24	26
0	2	3	98	97	94	95	96	93
0	3	2	99	100	98	99	99	100
0	4	1	100	98	100	100	100	100
0	5	0	100	100	100	100	100	100
1	0	4	94	93	94	90	95	96
1	1	3	100	99	96	100	97	97
1	2	2	99	100	99	100	98	97
1	3	1	99	97	97	97	98	99
1	4	0	94	96	97	96	97	95
2	0	3	99	96	99	99	96	97
2	1	2	98	97	99	100	99	98
2	2	1	99	100	99	97	100	97
2	3	0	97	98	97	98	98	98
3	0	2	100	100	98	97	99	100
3	1	1	98	97	98	96	98	98
3	2	0	85	94	91	91	87	90
4	0	1	88	85	88	83	90	88
4	1	0	22	34	28	26	35	31
5	0	0	8	9	7	7	17	12

показывает в целом удовлетворительные результаты. Данные *таблиц 1* и *2* показывают, что метод обладает слабой чувствительностью по мощности кодирующего алфавита и по виду функции как при определении периода, так и при восстановлении периодически повторяющегося фрагмента.

При определении периода (см. *табл. 1*) метод оказывается восприимчивым к разности между уровнями шумов вставки и удаления, поскольку именно эта разность влияет на расстояния между повторяющимися подсловами длины 10 в зашумленной последовательности. Заметим, что наличие только шума замены в 5% приводит к наилучшему наблюдаемому в экспериментах результату. При определении периодически повторяющего фрагмента при шуме равномерной структуры ни вид функции, ни мощность алфавита не оказывают заметного влияния на результаты. Единственный влияющий в этом случае фактор – общий уровень шума.

Заключение

Применение моделей символьных циклов с шумами дает возможность решения задач по вероятностному прогнозированию символьных зашумленных последовательностей и позволяет

Таблица 2.

Влияние уровня шума и мощности алфавита на медиану $\varepsilon\left(\overline{q}^{\sigma}, q^{\sigma}\right)\cdot 100\%$

Суммарный шум %	Мощность алфавита (количество символов)	Значения медианы $\varepsilon\left(\overline{q}^{\sigma}, q^{\sigma}\right)\cdot 100\%$ для различных функций			
		$\sin(t)$	$\left(t-8\left\lfloor\frac{t}{8}\right\rfloor+1\right)\sin(\pi t)$	$\left(t-16\left\lfloor\frac{t}{16}\right\rfloor+1\right)\sin(\pi t)$	$\left\lvert 7-t+16\left\lfloor\frac{t}{16}\right\rfloor\right\rvert\sin(\pi t)$
3%	10	0	0	0	0
	20	0	0	0	0
	30	0	0	0	0
	40	0	0	0	0
	50	0	0	0	0
6%	10	2	2	2	2
	20	2	2	2	2
	30	2	2	2	2
	40	2	2	2	2
	50	2	2	2	2
9%	10	4	4	4	4
	20	6	4	4	4
	30	4	4	4	4
	40	4	4	5	4
	50	4	4	5	4
12%	10	7	6	8	6
	20	8	6	8	6
	30	6	6	6	6
	40	8	8	6	8
	50	8	8	7	6

разрабатывать эффективные методы прогнозирования, реконструкции и аппроксимации данных в форме символьных кодов по фрагментарной, неполной и искаженной информации.

В статье предложен усовершенствованный метод решения задачи восстановления периодической символьной последовательности на основе исходной последовательности, полученной путем внесения шумов вставки, удаления и замены в неизвестную периодическую последовательность. Метод основан на исследовании частотной встречаемости и расстояний между совпадающими подсловами фиксированной длины. В качестве синтетических данных рассматриваются символьные последовательности в алфавитах разной мощности, кодирующие зашумленные периодические функции. Помимо описания усовершенствованного метода нахождения периодически повторяющегося фрагмента статья содержит результаты экспериментального исследования зависимости характеристик качества метода восстановления периода и периодически повторяющегося фрагмента от мощности кодирующего алфавита и уровней шума различных типов. Исследование проводилось для зашумленных символьных кодов периодических функций, являющихся моделями зашумленных (квазипериодических) временных рядов. Такого рода исходные данные часто возникают в задачах анализа и прогнозирования временных рядов в бизнес-информатике и менеджменте.

Вычислительный эксперимент показал, что качество метода зависит не только от общего уровня шума, но и от соотношения уровня шумов. Предложенный метод обладает слабой чувствительностью по мощности кодирующего алфавита и по виду периодической функции, как при определении длины периода, так и при восстановлении периодически повторяющегося фрагмента. Исследование для шума равномерной структуры показало, что единственным фактором, влияющим на качество, является уровень шума, при этом ни вид функции, ни мощность алфавита не оказывают заметного влияния на результаты.

Полученные в статье результаты позволяют дать рекомендации о возможном применении метода при решении задач анализа символьных кодов зашумленных периодических непрерывных функций в алфавитах небольшой мощности, с уровнем шума, не превышающим10–12%. Такого рода задачи возникают при анализе как динамических процессов и временных рядов в бизнес-информатике и менеджменте, так и при анализе бизнес-процессов в условиях неполной и фрагментарной информации. ■

Благодарности

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 19-07-00150 и 19-07-00151.

Литература

1. Andersen B. Business process improvement toolbox. Milwaukee, Wisconsin: ASQ Quality Press. 2007.
2. Mitsyuk A.A., Lomazova I.A., van der Aalst W. Using event logs for local correction of process models // Automatic Control and Computer Sciences. 2017. Vol. 51. No 7. P. 709–723. DOI: 10.3103/S0146411617070306.
3. Keogh E.J., Pazzani M.J. An enhanced representation of time series which allows fast and accurate classification, clustering and relevance feedback // Fourth International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD '98). New York, USA, 27–31 August 1998. P. 239–241. [Электронный ресурс]: https://www.aaai.org/Papers/KDD/1998/KDD98-041.pdf (дата обращения 16.11.2021).
4. Bemdt D.J., Clifford J. Using dynamic time warping to find patterns in time series. AAAI Technical Report // Workshop on Knowledge Discovery in Databases (KDD '94). Seattle, Washington, USA, 31 July – 1 August 1994. P. 359–370. [Электронный ресурс]: https://www.aaai.org/Papers/Workshops/1994/WS-94-03/WS94-03-031.pdf (дата обращения 16.11.2021).
5. Wu Y.-L., Agrawal D., el Abbadi A. A comparison of DFT and DWT based similarity search in time-series databases // Ninth International Conference on Information and Knowledge Management (CIKM' 00). McLean, Virginia, USA, 6–11 November 2000. P. 488–495. DOI: 10.1145/354756.354857.
6. Querying and mining of time series data: Experimental comparison of representations and distance measures / H. Ding [et al.] // VLDB Endowment. Auckland, New Zealand, 23–28 August 2008. Vol. 1. No 2. P. 1542–1552. DOI: 10.14778/1454159.1454226.
7. Kurbalija V., Radovanović M., Geler Z., Ivanović M. The influence of global constraints on DTW and LCS similarity measures for time-series databases // Advances in Intelligent and Soft Computing. 2011. Vol. 101. P. 67–74. DOI: 10.1007/978-3-642-23163-6_10.
8. Dreyer W., Dittrich A.K., Schmidt D. Research perspectives for time series management systems. ACM SIGMOD Record. 1994. Vol. 23. No 1. P. 10–15. [Электронный ресурс]: https://dl.acm.org/doi/abs/10.1145/181550.181553 (дата обращения 16 November 2021).
9. Розенберг Г.С., Шитиков В.К., Брусиловский П.М. Экологическое прогнозирование (функциональные предикторы временных рядов). Тольятти: ИЭВБ РАН, 1994.
10. Скляр А.Я. Анализ и устранение шумовой компоненты во временных рядах с переменным шагом // Кибернетика и программирование. 2019. № 1. С. 51–59. DOI: 10.25136/2306-4196.2019.1.27031.
11. Mauleón I. Aggregated world energy demand projections: Statistical assessment // Energies. 2021. Vol. 14. No 15. P. 1–13. [Электронный ресурс]: https://www.mdpi.com/1996-1073/14/15/4657 (дата обращения 16.11.2021). DOI: 10.3390/en14154657.
12. Suganthi L., Samuel A.A. Energy models for demand forecasting – A review // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2012. Vol. 16. No 2. P. 1223–1240. DOI: 10.1016/j.rser.2011.08.014.
13. Boßmann T., Staffell I. The shape of future electricity demand: Exploring load curves in 2050s Germany and Britain // Energy. 2015. Vol. 90. No 2. P. 1317–1333. DOI: 10.1016/j.energy.2015.06.082.
14. Akca A., Canakoğlu E. Adaptive stochastic risk estimation of firm operating profit // Journal of Industrial and Business Economics. 2021. Vol. 48. No 3. P. 463–504. DOI: 10.1007/s40812-021-00184-z.
15. Abbasimehr H., Shabani M. A new methodology for customer behavior analysis using time series clustering. A case study on a bank's customers // Kybernetes. 2021. Vol. 50. No 2. P. 221–242. DOI: 10.1108/K-09-2018-0506.
16. Fildes R., Wei Y., Ismail S. Evaluating the forecasting performance of econometric models of air passenger traffic flows using multiple error measures // International Journal of Forecasting. 2011. Vol. 27. No 3. P. 902–922. DOI: 10.1016/j.ijforecast.2009.06.002.
17. Bi J.-W., Li H., Fan Zh.-P. Tourism demand forecasting with time series imaging: A deep learning model // Annals of Tourism Research. 2021. Vol. 90. Article no 103255. DOI: 10.1016/j.annals.2021.103255.
18. Neural networks for enhanced stress prognostics for encapsulated electronic packages – A comparison / P. Meszmer [et al.] // Microelectronics Reliability. 2021. Vol. 123, art 114181. DOI: 10.1016/j.microrel.2021.114181.

19. Дещеревский А.В., Журавлев В.И., Никольский А.Н., Сидорин А.Я. Проблемы анализа временных рядов с пропусками и методы их решения в программе WINABD // Геофизические процессы и биосфера. 2016. Т. 15. № 3. С. 5–34.

20. Плотников Д.Е., Миклашевич Т.С., Барталев С.А. Восстановление временных рядов данных дистанционных измерений методом полиномиальной аппроксимации в скользящем окне переменного размера // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 2. С. 103–110.

21. Lin J., Keogh E., Wei L., Lonardi S. Experiencing SAX: A novel symbolic representation of time series // Data Mining and Knowledge Discovery. 2007. Vol. 15. No 2. P. 107–144. DOI: 10.1007/s10618-007-0064-z.

22. Zhukova G., Smetanin Y., Uljanov M. Informative symbolic representations as a way to qualitatively analyses time series // 2019 International Conference on Engineering Technologies and Computer Science: Innovation & Application. Moscow, Russia, 26–27 March 2019. P. 43–47.

23. Lin J., Keogh E., Lonardi S., Chiu B. A symbolic representation of time series, with implications for streaming algorithms // 8th ACM SIGMOD Workshop on Research Issues in Data mining and Knowledge Discovery. San Diego, California, USA, 13 June 2003. P. 2–11. DOI: 10.1145/882082.882086.

24. Нестеренко А.Ю. Алгоритмы поиска длин циклов в последовательностях и их приложения // Фундаментальная и прикладная математика. 2010. Т. 16. № 6. С. 109–122.

25. Жукова Г.Н., Жуков А.В., Сметанин Ю.Г., Ульянов М.В. Метод определения периода зашумленной периодической символьной последовательности, основанный на позициях подслов в последовательности // Современные информационные технологии и ИТ-образование. 2020. Т. 16. № 1. С. 23–32. DOI: 10.25559/SITITO.16.202001.23-32.

26. Ульянов М.В. Подход к идентификации длины цикла в символьных последовательностях с шумом, основанный на энтропии слов // III Международный научно-технический форум «Современные технологии в науке и образовании» (СТНО–2020). Рязань, 4–6 марта 2020 г. Т. 4. С. 120–124.

27. Левенштейн В.И. Двоичные коды с исправлением выпадений, вставок и замещений символов // Доклады АН СССР. 1965. Т. 163. С. 707–710.

28. Жукова Г.Н., Сметанин Ю.Г., Ульянов М.В. Вероятностная модель шумов для периодических символьных последовательностей // Современные информационные технологии и ИТ-образование. 2019. Т. 15. № 2. С. 431–440. DOI: 10.25559/SITITO.15.201902.431-440.

Об авторах

Жукова Галина Николаевна

кандидат физико-математических наук;

доцент департамента программной инженерии, факультет компьютерных наук, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», 101000, г. Москва, ул. Мясницкая, д. 20;

E-mail: galinanzhukova@gmail.com

ORCID: 0000-0003-1835-7422

Ульянов Михаил Васильевич

доктор технических наук, профессор;

ведущий научный сотрудник, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук, 117997, г. Москва, ул. Профсоюзная, д. 65;

профессор кафедры алгоритмических языков, факультет вычислительной математики и кибернетики, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, 119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1;

E-mail: muljanov@mail.ru

ORCID: 0000-0002-5784-9836

To the question of restoring symbol sequences encoding noisy periodic functions

Galina N. Zhukova [a]
E-mail: galinanzhukova@gmail.com

Mikhail V. Ulyanov [b,c]
E-mail: muljanov@mail.ru

[a] National Research University Higher School of Economics
Address: 20, Myasnitskaya Street, Moscow 101000, Russia

[b] Trapeznikov Institute of Control Sciences, Russian Academy of Sciences
Address: 65, Profsoyuznaya Street, Moscow 117997, Russia

[c] Lomonosov Moscow State University
Address: 1, Leninskie Gory, Moscow 119991, Russia

Abstract

In business informatics, one of the research subjects is the analysis of data on processes in applied subject areas; here problems of qualitative analysis arise. Such problems arise, for example, in the qualitative study of log files of business processes, in the analysis and prediction of time series and other processes of a different nature. Quite often, to represent information about the processes under study, the methods of qualitative analysis use symbolic coding, which makes it possible to remove unnecessary detailing of numerical descriptions. The relevance of this study is due to the fact that when working with the raw data, researchers often face the presence of noise and distortions of the data, which significantly complicates the solution of the problems of qualitative analysis. When working with symbolic representations of the processes under study, which quite often have a periodic nature, we observe noise of deletion, insertion and replacement of symbols, which complicate the solution of the problem of revealing and analyzing the periodicity. This article deals with the problem of recovering periodic symbolic sequences obtained by coding from samples of continuous periodic functions and distorted by noise of insertion, replacement and deletion of symbols. Trigonometric functions are considered as a specific example of synthetic time series data. To encode trigonometric functions, alphabets of various cardinalities are used. The article presents an experimental study of the dependence of the quality characteristics of the method of period and a periodically repeating fragment recovery, previously proposed by the authors and improved in this study. For alphabets of different cardinalities at fixed sampling intervals, the fraction of sequences with a satisfactorily reconstructed period and the relative error in determining the period are given. The quality of reconstruction of a periodically repeating fragment is estimated by the edit distance from the reconstructed periodic sequence to the original sequence distorted by noise.

Key words: symbolic sequence; cardinality of an alphabet; periodic sequence; sequence with noise; noise of insertion; noise of deletion; noise of change.

Citation: Zhukova G.N., Ulyanov M.V. (2021) To the question of restoring symbol sequences encoding noisy periodic functions. *Business Informatics*, vol. 15, no 4, pp. 22–35. DOI: 10.17323/2587-814X.2021.4.22.35

References

1. Andersen B. (2007) *Business process improvement toolbox.* Milwaukee, Wisconsin: ASQ Quality Press.
2. Mitsyuk A.A., Lomazova I.A., van der Aalst W. (2017) Using event logs for local correction of process models. *Automatic Control and Computer Sciences*, vol. 51, no 7, pp. 709–723. DOI: 10.3103/S0146411617070306.
3. Keogh E.J., Pazzani M.J. (1998) An enhanced representation of time series which allows fast and accurate classification, clustering and relevance feedback. Proceedings of the *Fourth International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD '98), New York, USA, 27–31 August 1998,* pp. 239–241. Available at: https://www.aaai.org/Papers/KDD/1998/KDD98-041.pdf (accessed 16 November 2021).
4. Bemdt D.J., Clifford J. (1994) Using dynamic time warping to find patterns in time series. *AAAI Technical Report. Workshop on Knowledge Discovery in Databases (KDD '94), Seattle, Washington, USA, 31 July – 1 August 1994,* pp. 359–370. Available at: https://www.aaai.org/Papers/Workshops/1994/WS-94-03/WS94-03-031.pdf (accessed 16 November 2021).
5. Wu Y.-L., Agrawal D., el Abbadi A. (2000) A comparison of DFT and DWT based similarity search in time-series databases. Proceedings of the *Ninth International Conference on Information and Knowledge Management (CIKM' 00), McLean, Virginia, USA, 6–11 November*, pp. 488–495. DOI: 10.1145/354756.354857.
6. Ding H., Trajcevski G., Scheuermann P., Wang X., Keogh E. (2008) Querying and mining of time series data: Experimental comparison of representations and distance measures. Proceedings of the *VLDB Endowment, Auckland, New Zealand, 23–28 August 2008*, vol. 1, no 2, pp. 1542–1552. DOI: 10.14778/1454159.1454226.
7. Kurbalija V., Radovanović M., Geler Z., Ivanović M. (2011) The influence of global constraints on DTW and LCS similarity measures for time-series databases. *Advances in Intelligent and Soft Computing*, vol. 101, pp. 67–74. DOI: 10.1007/978-3-642-23163-6_10.
8. Dreyer W., Dittrich A.K., Schmidt D. (1994) Research perspectives for time series management systems. *ACM SIGMOD Record*, vol. 23, no 1, pp. 10–15. Available at: https://dl.acm.org/doi/abs/10.1145/181550.181553 (accessed 16 November 2021).
9. Rozenberg G.S., Shitikov V.K., Brusilovskij P.M. (1994) *Environmental forecasting (time series functional predictors)*. Tolyatti: IEVB RAS (in Russian).
10. Sklyar A.Ya. (2019) Analysis and elimination of noise component in time series with variable step. *Cybernetics and Programming*, no 1, pp. 51–59 (in Russian). DOI: 10.25136/2306-4196.2019.1.27031.

11. Mauleón I. (2021) Aggregated world energy demand projections: Statistical assessment. *Energies*, vol. 14, no 15, pp. 1–13. Available at: https://www.mdpi.com/1996-1073/14/15/4657 (accessed 16 November 2021). DOI: 10.3390/en14154657.
12. Suganthi L., Samuel A.A. (2012) Energy models for demand forecasting – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, no 2, pp. 1223–1240. DOI: 10.1016/j.rser.2011.08.014.
13. Boßmann T., Staffell I. (2015) The shape of future electricity demand: Exploring load curves in 2050s Germany and Britain. *Energy*, vol. 90, no 2, pp. 1317–1333. DOI: 10.1016/j.energy.2015.06.082.
14. Akca A., Canakoğlu E. (2021) Adaptive stochastic risk estimation of firm operating profit. *Journal of Industrial and Business Economics*, vol. 48, no 3, pp. 463–504. DOI: 10.1007/s40812-021-00184-z.
15. Abbasimehr H., Shabani M. (2021) A new methodology for customer behavior analysis using time series clustering. A case study on a bank's customers. *Kybernetes,* vol. 50, no 2, pp. 221–242. DOI: 10.1108/K-09-2018-0506.
16. Fildes R., Wei Y., Ismail S. (2011) Evaluating the forecasting performance of econometric models of air passenger traffic flows using multiple error measures. *International Journal of Forecasting*, vol. 27, no 3, pp. 902–922. DOI: 10.1016/j.ijforecast.2009.06.002.
17. Bi J.-W., Li H., Fan Zh.-P. (2021) Tourism demand forecasting with time series imaging: A deep learning model. *Annals of Tourism Research,* vol. 90, article no 103255. DOI: 10.1016/j.annals.2021.103255.
18. Meszmer P., Majd M., Prisacaru A., Gromala P.J., Wunderle B. (2021) Neural networks for enhanced stress prognostics for encapsulated electronic packages – A comparison. *Microelectronics Reliability,* vol. 123, article no 114181. DOI: 10.1016/j.microrel.2021.114181.
19. Deshcherevsky A.V., Zhuravlev V.I., Nikolskij A.N., Sidorin A.Ya. (2016) Time series analysis problems with gaps and methods for solving them in the program WINABD. *Geophysical processes and the biosphere*, vol. 15, no 3, pp. 5–34 (in Russian).
20. Plotnikov D.E., Miklashevich T.S., Bartalyov S.A. (2014) Reconstruction of time series of remote sensing data by the method of polynomial approximation in a sliding window of variable size. *Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space*, vol. 11, no 2, pp. 103–110 (in Russian).
21. Lin J., Keogh E., Wei L., Lonardi S. (2007) Experiencing SAX: A novel symbolic representation of time series. *Data Mining and Knowledge Discovery*, vol. 15, no 2, pp. 107–144. DOI: 10.1007/s10618-007-0064-z.
22. Zhukova G., Smetanin Y., Uljanov M. (2019) Informative symbolic representations as a way to qualitatively analyses time series. Proceedings of the *2019 International Conference on Engineering Technologies and Computer Science: Innovation & Application, Moscow, Russia, 26–27 March 2019*, pp. 43–47.
23. Lin J., Keogh E., Lonardi S., Chiu B. (2003) A symbolic representation of time series, with implications for streaming algorithms. Proceedings of the *8th ACM SIGMOD Workshop on Research Issues in Data mining and Knowledge Discovery, San Diego, California, USA, 13 June 2003*, pp. 2–11. DOI: 10.1145/882082.882086.
24. Nesterenko A.Yu. (2010) Algorithms for finding the lengths of cycles in sequences and their applications. *Fundamental and Applied Mathematics*, vol. 16, no 6, pp. 109–122 (in Russian).
25. Zhukova G.N., Zhukov A.V., Smetanin Yu.G., Ulyanov M.V. (2020) The method of estimating the period of a symbolic periodic sequence with noise, based on the sub-words positions in the sequence. *Modern information technologies and IT education*, vol. 16, no 1, pp. 23–32 (in Russian). DOI: 10.25559/SITITO.16.202001.23-32.
26. Ulyanov M.V. (2020) An approach to identifying the cycle length in noisy character sequences based on the entropy of words. Proceedings of the *III International Scientific and Technical Forum "Modern Technologies in Science and Education", Ryazan, 4–6 March 2020*, vol. 4, pp. 120–124 (in Russian).
27. Levenshtejn V.I. (1965) Binary codes with corrected dropouts, insertions and character replacements. *Proceedings of the Academy of Sciences*, vol. 163, pp. 707–710 (in Russian).
28. Zhukova G.N., Zhukov A.V., Smetanin Yu.G., Ulyanov M.V. (2019) Stochastic model of noises for periodic symbol sequences. *Modern information technologies and IT education,* vol. 15, no 2, pp. 431–440. DOI: 10.25559/SITITO.15.201902.431-440 (in Russian).

About the authors

Galina N. Zhukova

Cand. Sci. (Phys.-Math.);

Associate Professor, School of Software Engineering, Faculty of Computer Science, National Research University Higher School of Economics, 20, Myasnitskaya Street, Moscow 101000, Russia;

E-mail: galinanzhukova@gmail.com

ORCID: 0000-0003-1835-7422

Mikhail V. Ulyanov

Dr. Sci. (Tech.);

Leading Researcher, Laboratory of Scheduling Theory and Discrete Optimization, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences, Russian Academy of Sciences, 65, Profsoyuznaya Street, Moscow 117997, Russia;

Professor, Department of Algorithmic Languages, Faculty of Computational Mathematics and Cybernetics, Lomonosov Moscow State University, 1, Leninskie Gory, Moscow 119991, Russia;

E-mail: muljanov@mail.ru

ORCID: 0000-0002-5784-9836

DOI: 10.17323/2587-814X.2021.4.36.49

Методы цифрового маркетингового позиционирования на мировом рынке гражданских пассажирских самолетов

Г.А. Калугина
E-mail: kalugina@gmail.com

А.В. Ряпухин
E-mail: anatoliiruapukhin@yandex.ru

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)
Адрес: 125993, Москва, Волоколамское шоссе, д. 4

Аннотация

В условиях острой конкуренции создание новой продукции и продвижение ее на рынок требует маркетинговой поддержки. Центральным звеном маркетингового управления инновациями выступает маркетинговое позиционирование. В отличие от методического аспекта процедурная составляющая позиционирования не нашла широкого отражения в научных публикациях. Также не уделено должного внимания вопросам рыночной сегментации и выделения конкурентного преимущества такой высокотехнологичной продукции как гражданская авиатехника. Это определяет актуальность проблемы разработки процедуры маркетингового позиционирования в рамках управления развитием товарного предложения авиапромышленных предприятий. С позиций системного подхода обоснована необходимость исследования смежного рынка авиаперевозок, а также анализ корреляции его сегментации с выделением целевых сегментов рынка авиатехники. При проведении конкурентного анализа предложено рассмотрение положения на рынке не только отдельных типов гражданских самолетов, но и их семейств. Моделирование маркетингового управления показывает роль позиционирования в процессах создания, производства и эксплуатации самолетов. Отличительной особенностью процедуры выступает и предложенный этап оценки эффективности реализации выбранной позиции изделия, что позволяет анализировать целесообразность маркетинговых решений на протяжении всего жизненного цикла продукта. Особое внимание уделено вопросам информационного обеспечения. Изложенные результаты исследования отражают специфику маркетинговой деятельности авиационно-промышленных предприятий и способствуют развитию концептуальных основ отраслевого маркетинга.

Ключевые слова: маркетинговое позиционирование; маркетинг; сегментация; исследование рынка; авиация; самолеты.

Цитирование: Калугина Г.А., Ряпухин А.В. Методы цифрового маркетингового позиционирования на мировом рынке гражданских пассажирских самолетов // Бизнес-информатика. 2021. Т. 15. № 4. С. 36–49. DOI: 10.17323/2587-814X.2021.4.36.49

Введение

Задача маркетингового позиционирования товара является основополагающей в системе управления товарным ассортиментом компании. Формирование маркетингового комплекса как системы мероприятий, направленных на создание и продвижение конкурентоспособного, коммерчески эффективного товара, базируется на определении и закреплении в сознании потенциальных потребителей целевого сегмента отличия товара от конкурентных товарных предложений, то есть на грамотном маркетинговом позиционировании торговой марки, отдельно взятой модели или товарного предложения компании в целом. Актуальна данная проблема и для авиационно-промышленных предприятий, выпускающих такую высокотехнологичную продукцию как гражданские самолеты и продвигающие ее на мировой рынок авиатехники.

Существует множество публикаций на тему пассажирского авиационного транспорта и коммерции, а также множество книг по маркетингу, затрагивающих отдельные вопросы теории и практики позиционирования. Одни авторитетные издания широко освещают тему маркетинга и экономики в авиационной промышленности [1–3], но лишь частично затрагивают проблему маркетингового позиционирования. В других научных публикациях [4–6] отражены вопросы разработки системы маркетингового управления, позволяющего исследовать рынок и принимать маркетинговые решения с целью повышения конкурентоспособности и продвижения на рынок инновационной высокотехнологичной продукции. Вопросам же процедурной составляющей процесса определения позиции товара на рынке не уделено должного внимания. В основном процедурный анализ ограничивается укрупненным рассмотрением этапов, таких как выбор способов позиционирования, выделение системы критериев позиционирования, закрепление позиции товара среди конкурентных товаров-аналогов посредством маркетингового инструментария. Воспользоваться на практике теоретическими разработками бывает непросто по причине обезличенности объекта позиционирования. Примеры, иллюстрирующие процедурный аспект позиционирования, чаще всего относятся к товарам B2C и не раскрывают особенностей товара и товарного рынка. Гораздо меньше примеров характеризуют рассматриваемый процесс маркетингового управления на промышленных рынках. А ведь именно специфика этих рынков определяет сложность выбора конкурентного преимущества, которое должно быть не виртуальным, что допустимо для потребительских рынков, на которых часто потребительские предпочтения предопределены эмоциональным воздействием рекламы, а вполне конкретным. Производственные потребители должны быть в состоянии проверить заявленную позицию товара на соответствие возможностям его эффективной эксплуатации. Процесс принятия позиции товара рыночными субъектами требует соответствующих процедур детального конкурентного анализа, в рамках которого следует отражать специфику жизненного цикла товара. Как было отмечено в работе [7], позиционирование на рынке – это, прежде всего, этап разработки маркетинговой стратегии компании в целом.

Актуальным является также вопрос информационного обеспечения и формирования баз данных для позиционирования промышленных товаров.

Целью исследования является моделирование процедуры маркетингового позиционирования такой высокотехнологичной наукоемкой продукции как гражданская авиатехника. В статье изложены результаты исследования указанных выше вопросов именно для рынка гражданских самолетов.

Если в большинстве примеров рыночного позиционирования реализация маркетингового управления основывается на методе дедукции, то в рамках данной статьи иллюстрируется, как на базе классического концептуального подхода к определению позиции товара на рынке методом индукции расширяются возможности отраслевого маркетинга.

1. Методы цифрового маркетингового позиционирования

При формировании процедуры позиционирования предполагается решение следующих задач, направленных на более глубокое и детальное осмысление возможностей маркетингового управления в высокотехнологичных отраслях промышленности:

- определение принципов выделения этапов позиционирования;
- обоснование логических основ структуризации процесса позиционирования;
- формирование системы требований к информации, необходимой для реализации процессов исследования и принятия решений на каждом этапе, а также критический анализ информационных источников о состоянии рынка для формирования баз данных.

Основополагающими принципами выделения этапов процедуры позиционирования является реализация комплексного и системного подходов, которые при решении поставленной проблемы предполагают всесторонний анализ факторов, отражающих специфику товара и его эксплуатации потребителем (авиакомпаниями) в условиях динамично изменяющейся внешней среды. В этой связи процедура должна состоять из большего количества этапов, направленных на решение задач, стоящих перед производителем авиатехники гражданского назначения, чем при позиционировании потребительских товаров. Соответственно, требуется и более детальная проработка отдельных вопросов при сравнении позиций товаров с точки их эксплуатации.

Каждый этап должен представлять законченное действие и быть нацелен на получение результата, который возможно оценить количественно с использованием формализуемых показателей или качественно на базе индивидуальной или коллективной экспертизы.

При рассмотрении вопроса логической структуризации процесса принятия решения производителем авиатехники о заявленной позиции своего изделия предполагается анализ большого количества вариантов решения задачи с изменением факторов, что позволит оценивать результативность позиционирования при различных комбинациях критериев сегментации, атрибутов построения карт восприятия и т.п. Таким образом, процедура должна быть итеративной. Все этапы должны быть взаимосвязаны логически таким образом, чтобы каждый последующий этап требовал решения задач предыдущего этапа.

Одновременно процедура должна иметь интерактивный характер, что подразумевает наличие этапов автоматизации расчетов, получения и обработки информации и этапов принятия решений человеком. Указанное требование связано с необходимостью при построении карт восприятия рассмотрения большого количества вариантов сочетания атрибутов для разных рынков, а также выбора лучшего метода позиционирования из имеющихся альтернатив. В связи с продолжительным жизненным циклом такого товара как гражданские пассажирские самолеты встает вопрос о возможности дальнейшего репозиционирования, что также предполагает большой объем аналитической работы.

Учитывая вышеизложенные положения, процедура позиционирования гражданских пассажирских самолетов может быть схематически отображена в виде схемы, представленной на *рисунке 1.*

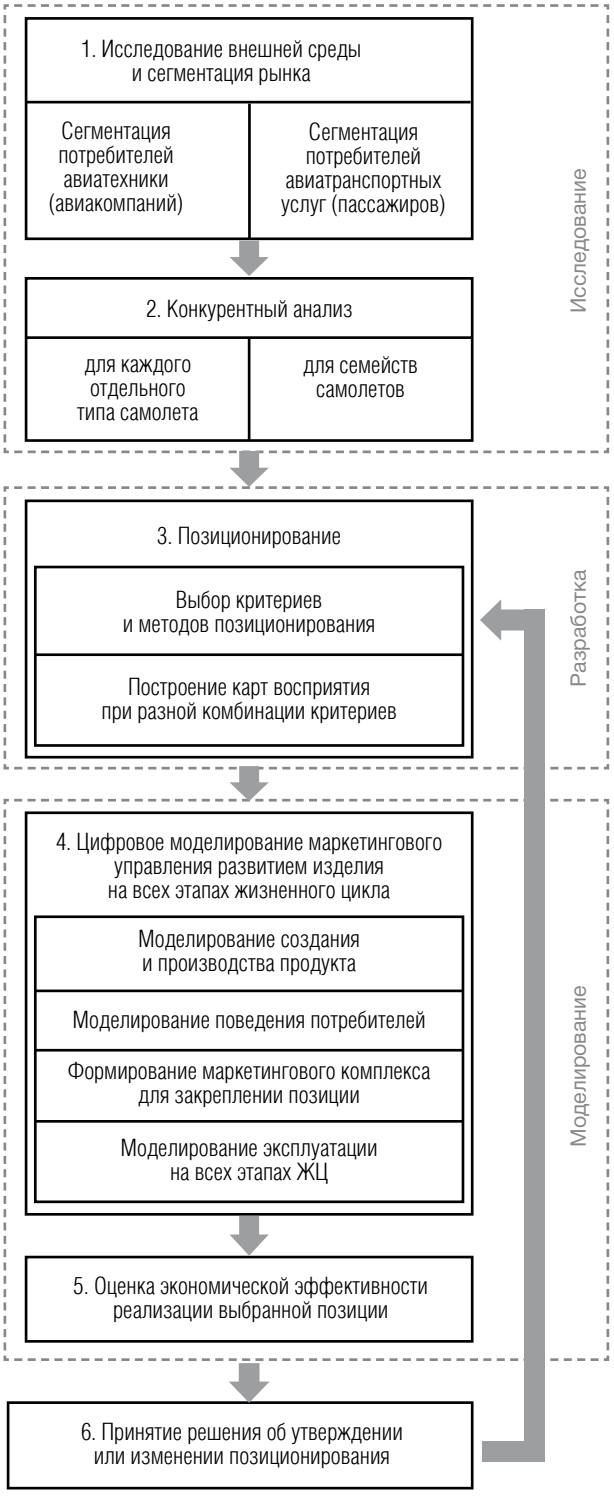

Рис. 1. Укрупненная схема процедуры маркетингового позиционирования в рамках моделирования создания продукта

При рассмотрении вопроса информационного обеспечения процедуры позиционирования основополагающим условием выступает соблюдение требований к информации:

- информация должна быть из достоверных источников;
- информация должна быть доступна субъектам рынка.

В *таблице 1* представлена информационная карта баз данных, необходимых для реализации процесса цифрового моделирования маркетингового позиционирования в рамках управления созданием и развитием гражданской авиатехники.

2. Результаты исследования отрасли

Рассмотрим подробнее реализацию процедуры позиционирования продукции авиапроизводителей на примере современных гражданских пассажирских самолетов.

2.1. Исследование внешней среды

Первостепенной задачей выступает исследование внешней среды авиационно-промышленного предприятия и сегментация потребителей, что соответствует этапу 1, на котором проводятся исследования экономических, политических, социально-демографических, экологических и других факторов, влияющих на возможность продвижения и реализации продукции, а также анализ рынка с позиций маркетинговой среды с последующей сегментацией потребителей. На данном этапе можно выделить два взаимосвязанных между собой направления.

Процесс исследования рынка авиатехники является одним из ключевых, его основной целью является анализ рыночной конъюнктуры и прогноз долгосрочных тенденций изменения спроса и предложения авиационной техники на период до 30 лет, что обусловлено продолжительным жизнен-

Таблица 1.

Информационная карта баз данных

Этап/подэтап	Вид и метод сбора информации	Источник получения информации
Исследование внешней среды	Статистические данные Экспертная оценка	Всемирный банк, ООН, ЦРУ, Eurostat, ФСГС РФ и др.
Сегментация потребителей (авиакомпаний)	Статистические данные Интервью/опрос Экспертная оценка	ФАВТ, ICAO, IATA, Статистические и аналитические организации (Cirium, CAPA, Airfinance и др.)
Сегментация конечных потребителей (пассажиров)	Статистические данные Интервью/опрос Экспертная оценка	ICAO, IATA, Авиакомпании, Аэропорты
Конкурентный анализ	Статистические данные	Документация производителей авиационной техники, авиационных властей, сертифицирующих организаций, аналитических агентств и др.
Позиционирование	Расчетные аналитические данные Экспертная оценка	База данных по результатам рыночных исследований
Маркетинговое моделирование	Расчетные аналитические данные Экспертная оценка	База данных по результатам рыночных исследований
Оценка экономической эффективности	Расчетные аналитические данные Экспертная оценка	База данных по результатам рыночных исследований
Принятие решения об утверждении или изменении позиции	Расчетные аналитические данные Экспертная оценка	База данных по результатам рыночных исследований

ным циклом изделия. При этом необходимо смоделировать основные перспективные изменения состава самолетного парка как в целом по миру, так и по отдельным регионам, странам, авиакомпаниям. В рамках прогноза должны быть отражены летно-технические, экономические и эксплуатационные характеристики всех типов и классов авиатехники.

Для решения данной задачи предполагается формирование базы данных о мировом парке воздушных судов, которая должна содержать исчерпывающую информацию по пассажирским самолетам: модель, тип и производитель самолета, дата выпуска, статус и история эксплуатации, включая ресурсные показатели планера и силовой установки, история обслуживания, владелец и эксплуатант самолета, конфигурация с основными летно-техническими характеристиками, оценочная стоимость и прочее. Дополнительно требуется база данных по заказам на коммерческие самолеты, включающая сведения по реализованным, заключенным и вероятным (опционным) контрактам. В ходе исследования применяются методы сортировки, выборки, классификации, декомпозиции и экстраполяции.

Исследование смежного рынка авиаперевозок – второе важное направление исследования внешней среды. Основной задачей также является анализ конъюнктуры рынка и прогноз тенденций его развития, анализ развития авиакомпаний-эксплуатантов самолетов, а также изучение типологии и поведения конечных потребителей – пассажиров. В ходе исследования необходимо использовать статистические базы, содержащие данные об объемах авиационных перевозок в различных ракурсах, а именно: по маршрутам, рейсам, перелетам, провозным емкостям, пассажиропотокам. Потребуется также информация по перевозкам между аэропортами с классификацией по типам воздушных судов, эксплуатантам, классу самих перевозок, а также финансовым показателям, позволяющим проводить анализ доходности и затрат при их выполнении. Столь обширный анализ выступает базой для прогноза тенденций изменения объемов перевозок с детальной классификацией по классам и типам воздушных судов, по эксплуатантам, по географическому распределению.

Дополнительно проводятся также исследования вторичных рынков – железнодорожных, автомобильных и других видов пассажирских перевозок. Существенным конкурентом авиационным перевозкам становится высокоскоростной железнодорожный транспорт, который на отдельных маршрутах сравнялся по доступности, скорости, времени в пути и объемам с авиационным. Скоростные железные дороги, как правило, создаются на внутренних маршрутах с очень высоким регулярным пассажиропотоком и не могут занять всю долю локального рынка. Типичными примерами являются железнодорожные перевозки в Европе, Японии, Китае, а также в России на маршруте Москва – Санкт-Петербург и других новых направлениях.

Исследование конечного потребителя нацелено на выявление факторов, определяющих тенденции изменений в сфере авиаперевозок и предполагает анализ демографической и социально-экономической составляющей на уровне детального изучения населения стран и регионов мира в рамках концепции потребительского поведения. При этом актуальны вопросы изучения образа жизни и экономического положения населения как предпосылок к изменению платежеспособного спроса на авиационные перевозки. Необходимо также учитывать географические особенности регионов и отдельных городов, уровень развития промышленности, туризма.

В результате исследования становится возможным рассчитать и спрогнозировать на перспективу индекс подвижности населения вплоть до отдельных населенных пунктов, а также выявить корреляцию исследуемых показателей между собой и их влияние на прогнозируемые объемы перевозок с детализацией до отдельных маршрутов. Решение перечисленных задач требует большого объема статистических данных по множеству количественных и качественных показателей. Для выявления связей между факторами и оценки степени взаимозависимости выбранных для анализа критериев целесообразно применение корреляционно-регрессионного анализа, а для определения весовых параметров влияния исходных данных на конечные показатели – экспертной оценки.

Особую важность в рамках исследования внешней среды занимают исследования мировой политической ситуации. Несмотря на всеобщую глобализацию развитых стран, которые являются основными, а во многих сегментах единственными производителями авиационной техники, можно наблюдать не только примеры политико-экономических санкций на развивающиеся страны и страны третьего мира (например, запрет на поставку западной авиационной техники в Иран и Кубу), но и открытую борьбу между развитыми странами с применением различных политических, таможенных

и экономических барьеров на рынке авиационной техники и авиаперевозок. Ярким примером конкурентной борьбы с применением политических и экономических методов в сегменте региональных и магистральных пассажирских самолетов является наиболее привлекательный и емкий рынок США, на котором периодически обостряются конфликты как между производителями региональных самолетов (Embraer, Bombardier) [8, 9], так и между производителями магистральных самолетов (Airbus, Boeing) [10, 11]. В рамках исследования требуются не только фактические данные о существующих ограничения или барьерах, но и экспертный анализ и прогноз развития событий в области политики и экономики.

2.2. Сегментация потребителей

Частью исследования внешней среды является сегментация потребителей. При рассмотрении гражданских пассажирских самолетов как B2B товара необходимо проводить сегментацию не только покупателей (т.е. авиакомпаний), но и сегментацию конечных потребителей – пассажиров, так как рынок авиационной техники и рынок пассажирских авиаперевозок тесно связаны между собой. Тенденции изменения рынка авиаперевозок находят непосредственное отражение в тенденциях рынка самолетов.

Сегментация рынков авиационной техники и авиаперевозок предполагает решение следующих задач:

- формирование структуры базы данных по характеристикам авиакомпаний и пассажиров;
- сбор необходимой информации и наполнение базы данных;
- анализ характеристик и потребностей потенциальных покупателей;
- выбор критериев сегментации потребителей рынка авиатехники и рынка авиаперевозок;
- осуществление сегментации рынка с учетом корреляции между рынками авиационной техники и авиаперевозок;
- уточнение границ сегментов рынка авиатехники с учетом смежного рынка авиаперевозок;
- выбор целевых сегментов обоих рынков.

В связи тем, что рассматриваемый продукт является высокотехнологичным и технически сложным и относится к рынку B2B, он обладает огромным количеством потребительских характеристик, анализируемых заказчиком при выборе продукции, а также рассматриваемых производителем при сегментации и позиционировании. Как было отмечено в работе [12], объекты исследования, относящиеся к B2B-продуктам, требуют более глубокого аналитического подхода при исследовании рынка, конкурентном анализе и сегментации потребителей. В рамках сегментации предполагается создание многомерной матрицы, где каждый рассматриваемый критерий формирует измерение, состоящее из последовательности значений. На *рисунке 2* отражена концептуальная модель формирования двумерных матриц сегментации с отражением взаимосвязей между сегментами рынка авиаперевозок и авиационной техники. Каждая матрица представляет из себя многомерную структуру ($N = 1, ..., i$, $M = 1, ..., ii$) с большим массивом данных (N_i, M_{ii}). На практике формирование подобной матрицы при выборе целевых сегментов связано с обработкой огромного объема информации.

В результате обработки данных должны быть выделены целевые сегменты и группы сегментов в многомерных матрицах, определена корреляция между сегментами разных матриц (*рис. 2*), дана характеристика каждого многомерного сегмента.

2.3. Конкурентный анализ

Конкурентный анализ, укрупненная концептуальная модель которого представлена на *рисунке 3*, включает исследование функциональных, видовых и предметных конкурентов, что соответствует этапу 2 процедуры маркетингового позиционирования. В рамках анализа проводится изучение потребительских характеристик услуг функциональных и видовых конкурентов, поскольку именно они (параметры перевозки, цена и др.) необходимы для дальнейшего сравнения. При анализе предметных конкурентов (аналогичных пассажирских самолетов) проводится изучение не только потребительских, но и технических параметров для более полной характеристики конкурентной продукции и прогноза ее развития. При этом анализируются не только самолеты, но их семейства, поскольку разные типы и модификации самолетов одного вида, сгруппированные в семейство, благодаря унификации обладают более высокими потребительскими характеристиками и позволяют охватывать больший сегмент рынка. Тема семейства самолетов подробно освящена Г.А. Калугиной [13].

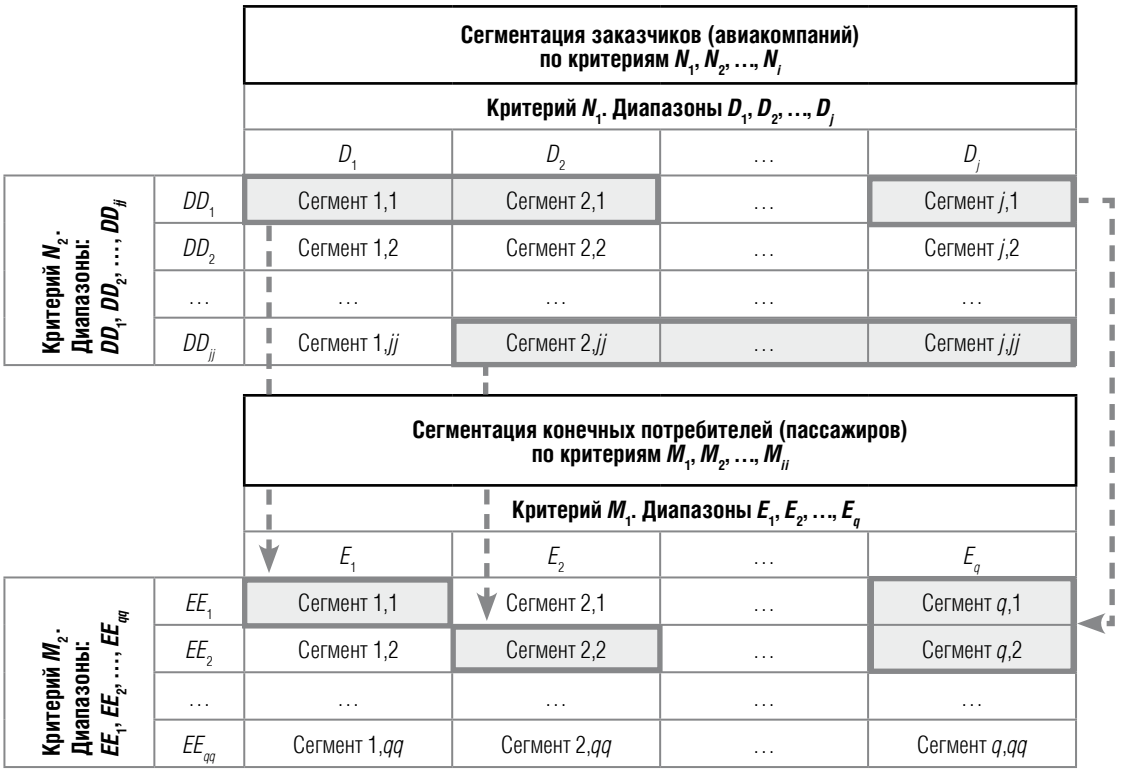

Рис. 2. Корреляция сегментации заказчиков авиационной техники (авиакомпаний) и потребителей авиаперевозок (пассажиров)

В ходе конкурентного анализа формируется база данных характеристик продукции, определяется их взаимосвязь, рассчитываются производные показатели как соотношение исходных, выделяются показатели параметров, требующие более сложных расчетов (экономические и эксплуатационных характеристики). По результатам анализа проводится сравнение конкурентных вариантов с проектируемым самолетом по всей совокупности параметров.

2.4. Позиционирование семейства самолетов

Маркетинговое позиционирования нового самолета или семейства самолетов соответствует этапу 3 укрупненной процедуры позиционирования. Опираясь на результаты исследования внешней среды и сегментирования, используя характеристики конкурентной продукции и результаты сравнительного анализа самолетов и их семейств, с учетом прогнозов развития на перспективу 20–40 лет, проводится выбор критериев позиционирования. Информационная модель процесса маркетингового позиционирования самолетов отражена на *рисунке 4.*

Рис. 3. Концептуальная модель конкурентного анализа

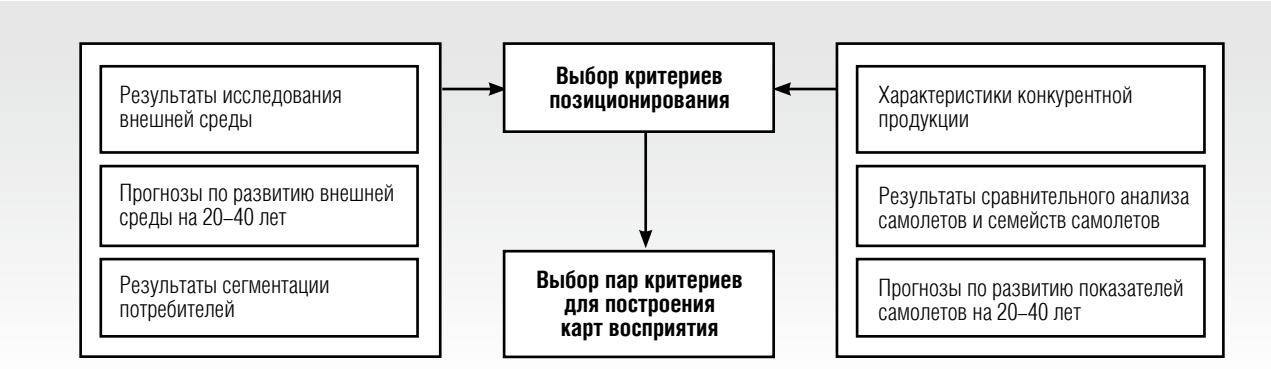

Рис. 4. Информационная модель маркетингового позиционирования самолетов

В качестве критериев позиционирования могут выступать практически любые потребительские характеристики продукции, которые в наибольшей степени отражают конкурентные преимущества самолета с точки зрения потребителей. Далее отобранные критерии объединяются в пары для построения карт восприятия. Карта восприятия или карта позиционирования представляет собой график, на котором визуально отражены позиции определённых брендов с точки зрения наиболее важных для потребителя характеристик товара. Карта строится с использованием двух определяющих параметров в качестве осей X и Y. Наиболее распространённые параметры для сравнения товаров и построения карты восприятия бренда: качество, цена, безопасность, надежность, функциональные характеристики. Главное преимущество метода визуализации положения бренда на рынке при помощи карт восприятия в том, что он очень прост в построении и интерпретации.

Важно отметить, что для карт восприятия могут быть отобраны даже показатели, по которым продукция уступает конкурентам, в случае если:

- выбор обусловлен высокой корреляцией показателей выбранной пары;
- позиция продукции на карте восприятия выше «линии» рыночного тренда;
- позиция продукции незначительно уступает «признанным» на рынке конкурентам, что уже является успехом;
- позиция на карте восприятия позволяет занять большую область по сравнению с конкурентами, когда речь идет о сравнении семейств самолетов, что является одной из целей позиционирования.

2.5. Примеры построения карт восприятия

На *рисунке 5* представлен условный пример карты восприятия для иллюстрации маркетингового позиционирования коммерческих самолетов по критериям дальности полета (критерий 1) и пассажировместимости воздушного судна (критерий 2).

На карте восприятия определены позиции 15 самолетов, сгруппированных по производителям и семействам, к которым они относятся. Всего представлено четыре производителя (A, B, C, D) со своими семействами самолетов (1, 2, 3, 4, 5). На карте отображена линия тренда, характеризующая среднюю тенденцию зависимости критерия 2 от критерия 1, рассчитанную на основе анализа характеристик представленных на рынке самолетов, и коридор отклонения от линии тренда на –10% и +10%. При этом преимущества и недостатки позиции воздушных судов рассматриваются не для каждого самолета в отдельности по критерию 1 и 2, а по его расположению в рамках семейства и товарного предложения производителя в целом, а также в зависимости от позиций конкурентов.

Позиционирование семейств в отличие от позиционирования отдельных самолетов расширяет возможности удовлетворения спроса на большем количестве сегментов рынка, что способствует повышению коммерческих результатов деятельности компании.

Производитель A предлагает Семейство 1 и Семейство 2, тем самым охватывая несколько сегментов рынка. Несмотря на то, что Семейство 1 уступает конкурентам, оно тем не менее находится в тренде рынка. Семейство 2 заметно превосходит линию тренда, что усиливает позиции Производителя A.

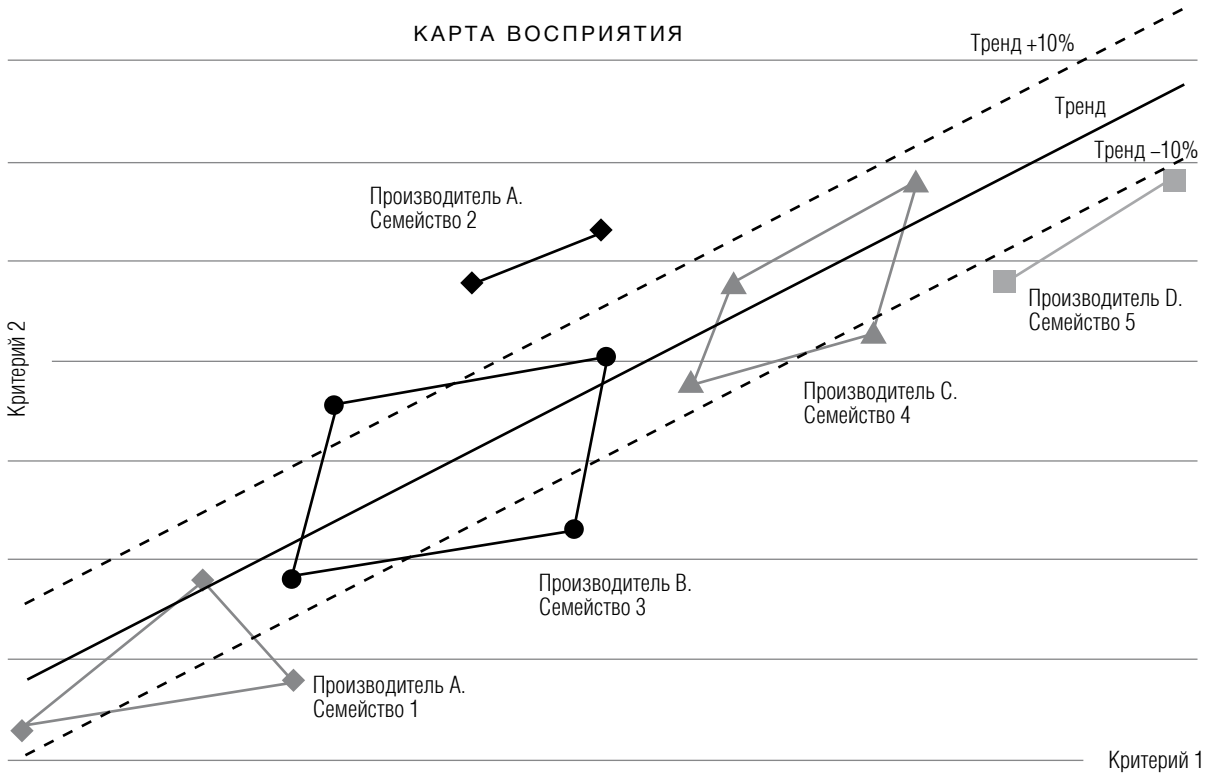

Рис. 5. Условный пример карты восприятия

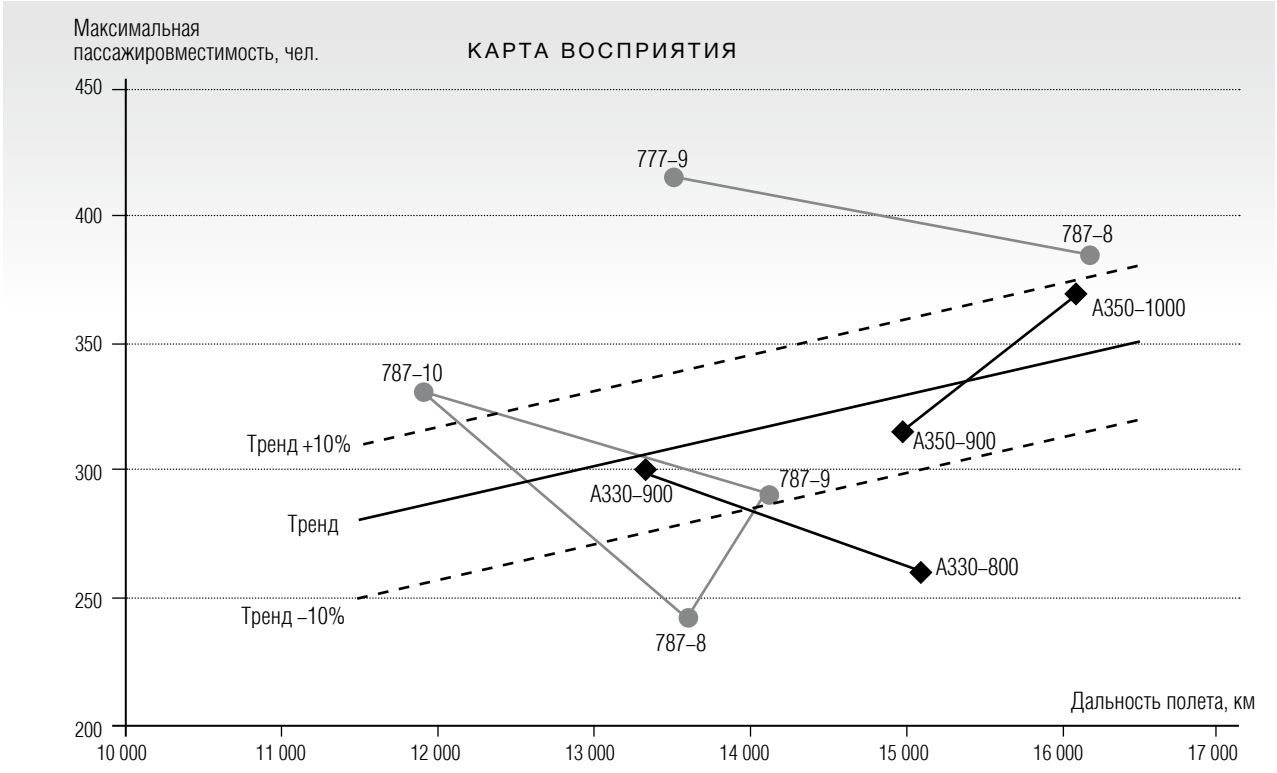

Рис. 6. Пример карты восприятия для самолетов Airbus и Boeing

Производитель B предлагает одно Семейство 3, состоящее из четырех самолетов. При этом семейство занимает большее количество сегментов рынка, чем конкуренты.

Производитель C предлагает одно Семейство 4, которое занимает не так много сегментов рынка, как семейство 3, но превосходит его по критериям 1 и 2.

Производитель D предлагает Семейство 5 состоящее только из двух самолетов. Данное семейство находится ниже линии тренда, но оно нацелено на свои сегменты рынка, превосходя конкурентов по критерию 1.

По охвату рынка с точки зрения покрываемых сегментов Производитель A лидирует в целом по всему товарному предложению. Производитель B лидирует по количеству охватываемых сегментов в рамках одного семейства.

На *рисунке 6* представлен реальный пример карты восприятия для сегмента современных широкофюзеляжных двухдвигательных самолетов без учета воздушных судов, снятых с производства (Boeing 767, Airbus A330ceo (200/300) и находящихся на стадии проектирования (например, CR929). Не рассматриваются также самолеты Boeing 777, на смену которым выходят Boeing 777x.

Как видно на карте восприятия, в тренде находятся самолеты A330-900, A350-900/1000 и 787-9. Именно они являются в настоящий момент наиболее востребованными в выбранном сегменте, на них размещено наибольшее количество заказов. Самолеты 787-8/10 менее востребованы, но повышают охват рынка в рамках семейства. Аналогичная ситуация и с самолетами A330-800. Спрос на них невысокий, но они расширяют возможности семейства по захвату рынка. Самолеты семейства 777x (777-8/9) более вместительны и заметно отличаются по остальным характеристикам, поэтому, как правило, не рассматриваются в качестве прямых конкурентов выше указанным воздушным судам. Однако на карте восприятия повышенная вместимость может быть представлена как преимущество.

2.6. Цифровое моделирование развития изделия

На *рисунке 7* схематически отображен этап 4, который предполагает многовариантное маркетинговое моделирование создания и развития продукта с учетом выбранной позиции на основе данных, полученных на первом и втором этапах. Итоговым результатом этапа является бизнес-план проекта по созданию нового продукта, который учитывает:

- план продаж, составленный с учетом моделирования поведения потребителей в спрогнозированных на длительную перспективу условиях в рамках сформированного маркетингового позиционирования продукта. При этом необходимо учитывать различные типы бизнес-моделей авиакомпаний, описанных в [14];
- результаты моделирования создания и производства продукта на основе рыночных требований, обеспечивающих конкурентное преимущество;
- результаты моделирования эксплуатации продукта на всех этапах жизненного цикла на базе оценки экономики авиакомпаний – целевых потенциальных потребителей продукции. Как отмечено в [15], длительность жизненного цикла самолета как продукта является важной особенностью, которая определяет специфику организационных процессов. Полученные результаты учитываются при моделировании поведения потребителей.

Этап 5 в продолжение этапа 4 предполагает оценку экономической эффективности реализации выбранной позиции нового самолета в рамках бизнес-планирования. С этой целью формируется база вариантов бизнес-плана, необходимых для дальнейшего принятия решения.

Этап 6 предполагает принятие решения об утверждении или изменении позиции. Во втором случае требуется возврат на этап 3, а в случае необходимости – на этап 1 или 2 для дополнитель-

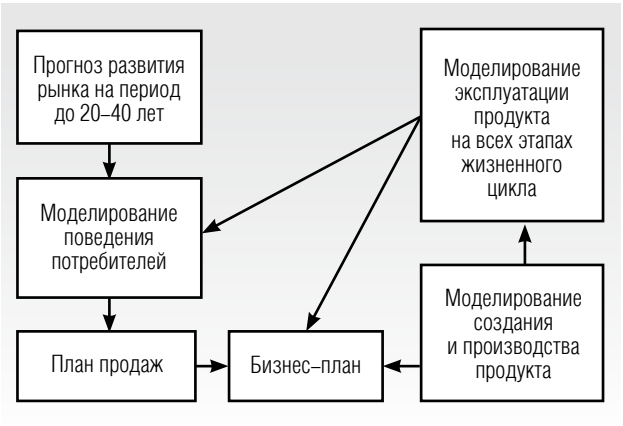

Рис. 7. Цифровое моделирование маркетингового управления развитием изделия на всех этапах жизненного цикла

ного исследования внешней среды, сегментации потребителей и проведения конкурентного анализа.

3. Дискуссия по вопросам маркетингового позиционирования

Маркетинговое позиционирование пассажирских коммерческих самолетов по критериям дальности полета и пассажировместимости воздушного судна, рассмотренное в предыдущем разделе, иллюстрирует возможности управления спросом условиях острой конкурентной борьбы. При этом даже недостаточно хорошие позиции продукта, представленные на карте восприятия, могут быть использованы производителем как преимущество, например, в процессе разработки ценовой политики, обеспечивая лучшее соотношение цена-качество. Вопрос ценообразования подробно рассмотрен в [16].

Важно отметить, что при построении карт восприятия далеко не всегда следует стремиться к достижению максимальных показателей по выбранным критериям позиционирования. Нужно соответствовать потребностям выбранного целевого сегмента. В авиации существует множество примеров ориентации на узкий сегмент рынка. Так при сегментации потребителей по географическому признаку, как показано в работе [17], успешно позиционировались самолеты E-Jet, Canadair Regional Jet (CRJ), Mitsubishi Regional Jet (MRJ) на внутреннем рынке США и самолеты ARJ21 и SSJ-100 на внутренних национальных рынках. В соответствие с типом бизнес-модели авиакомпании семейства 737 и A320 позиционируются в том числе для бюджетных авиакомпаний, а широкофюзеляжные самолеты 747 и A330 – для чартерных авиакомпаний. В [18] показано, что A380 предназначен для использования авиакомпаниями на Ближнем Востоке и в Азии для обслуживания рейсов между этими регионами на линиях с очень высоким трафиком. 747-400D предназначен для полетов на короткие расстояния по линиям с высоким пассажиропотоком на японском рынке. Следует отметить, что параллельно с этим методом используются и другие способы позиционирования самолетов Airbus и Boeing. Способ позиционирования, базирующийся на построении карт восприятия с критериями, отражающими специфические требования к самолетам целевых сегментов, используют и авиакомпании на смежном рынке авиаперевозок [19].

Заключение

В статье отражены вопросы моделирования маркетингового позиционирования в процессе создания и производства такой высокотехнологичной наукоемкой продукции как гражданские самолеты. Акцент сделан на процедурную составляющую, которая в меньшей степени представлена в теоретических разработках и научных трудах. При этом процедура маркетингового позиционирования отражена в рамках моделирования инновационного процесса создания авиатехники и ее эксплуатации на всех этапах жизненного цикла, что характеризует новизну самой постановки управленческой проблемы.

При разработке процедуры согласно сформулированным принципам были выделены шесть основных этапов, нацеленных на рыночные исследования и позиционирование товарного предложения авиапромышленного предприятия.

В связи со спецификой гражданских самолетов как товара было предложено исследовать не только рынок авиатехники, но и смежный рынок авиаперевозок, от состояния и развития которого зависит спрос на воздушные суда. При выделении целевых сегментов предложено проанализировать корреляцию сегментации указанных рынков, что не характерно для рынков B2C, но необходимо для большинства промышленных рынков.

Особенностью процедуры является и предложение этапа оценки эффективности реализации позиционирования нового изделия в рамках бизнес-планирования.

Вопрос информационной поддержки позиционирования, включающей определение категорий данных, необходимых для принятия решений, информационных источников, а также методов сбора и обработки информации нацелен на возможность реализации предложенной процедуры в условиях конкретной внешней среды.

Значимость результатов исследований определяется развитием концепции маркетингового позиционирования. В рамках классического методического подхода к определению позиции товара предложенная процедура отражает специфику рынка гражданских самолетов и расширяет возможности отраслевого маркетинга. ■

Литература

1. Scheinberg R. The commercial aircraft finance handbook. London: Routledge. 2017. DOI: https://doi.org/10.4324/9780203713303.
2. Spreen W.E. Marketing in the international aerospace industry. London: Routledge. 2016. DOI: https://doi.org/10.4324/9781315249681.
3. Vasigh B., Gorjidooz J. Engineering economics for aviation and aerospace. London: Taylor & Francis. 2016. DOI: https://doi.org/10.4324/9781315644257.
4. Zaripov R.N., Murakaev I.M., Novikov S.V., Ryapukhin A.V. Corporate structure for innovative enterprises // Russian Engineering Research. 2020. Vol. 40. No. 2. P. 137–139. DOI:10.3103/S1068798X20020239.
5. Tikhonov G.V., Lavrova L.A., Kolosova V.V., Zemlyanskaya N.B., Kazakova N.V. Marketing as an effective control of progressive innovations // TEM Journal. 2020. Vol. 9, No. 3, P. 1094. DOI: https://doi.org/10.34069/AI/2021.41.05.18.
6. Ryapukhin A.V., Kabakov V.V., Zaripov R.N. Risk management of multimodular multi-agent system for creating science-intensive high-tech products // Espacios. 2019. Vol. 40, No. 34, P. 19. DOI: http://dx.doi.org/10.21533/pen.v9i4.2388.
7. Hooley G.J., Piercy N., Nicoulaud B. Marketing strategy and competitive positioning. New York: Pearson Education. 2008.
8. Официальный веб-сайт компании «Embraer S.A.» (Empresa Brasileira de Aeronáutica S.A.), раздел «Media & Downloads». [Электронный ресурс]: https://www. embraercommercialaviation.com/media-downloads/ (дата обращения: 01.04.2021).
9. Официальный веб-сайт компании «Bombardier Inc.», раздел «Airport Emergency Publications». [Электронный ресурс]: https://u.to/7JCEGg (дата обращения: 01.04.2021)/
10. Официальный веб-сайт компании «Airbus SE», раздел «Aircraft Characteristics, Airport Pperations and Tech Data». [Электронный ресурс]: https://www.airbus.com/aircraft/support-services/airport-operations-and-technical-data/aircraft-characteristics.html (дата обращения: 01.04.2021).
11. Официальный веб-сайт компании «The Boeing Company», раздел «Airplane Characteristics for Airport Planning». [Электронный ресурс]: https://www.boeing.com/ commercial/airports/plan_manuals.page (дата обращения: 01.04.2021).
12. Guzhva V.S., Raghavan S., D'Agostino D.J. Aircraft leasing and financing: Tools for success in international aircraft acquisition and management. Amsterdam: Elsevier. 2018.
13. Калугина Г.А. Особенности формирования цен на гражданские пассажирские самолеты // Экономика и управление в машиностроении. 2018. № 3. С. 30–34.
14. Cook G.N., Billig B. Airline operations and management. Management textbook. London: Routledge. 2017. DOI: https://doi.org/10.4324/9781315299594.
15. Riordan D., Kundu A.K., Price M. A. Theory and practice of aircraft performance. New York: John Wiley & Sons Limited. 2016. DOI: https://doi.org/10.1017/S0001924000091636.
16. Калугина Г.А. Маркетинговые исследования авиационно-промышленных предприятий при формировании семейства самолетов // Труды МАИ. 2013. № 69.
17. Czinkota M.R., Ronkainen I.A. International marketing. Boston, MA: Cengage Learning. 2013. DOI: https://doi.org/10.1080/08975931003644630.
18. Clark P. Buying the big jets – fleet planning for airlines. London: Routledge. 2017. DOI: https://doi.org/10.4324/9781315195780.
19. Malaval P., Benaroya C., Aflalo J. Aerospace marketing management: A handbook for the entire value chain. Berlin: Springer Science & Business Media. 2013. DOI: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-01354-1.

Об авторах

Калугина Галина Александровна

кандидат экономических наук

доцент Московского авиационного института (национальный исследовательский университет), 125993, Москва, Волоколамское шоссе, д. 4;

E-mail: kalugina@gmail.com

ORCID: 0000-0002-2085-8851

Ряпухин Анатолий Вячеславович

старший преподаватель кафедры экономика промышленности Московского авиационного института (национальный исследовательский университет), 125993, Москва, Волоколамское шоссе, д. 4;

E-mail: anatoliiruapukhin@yandex.ru

ORCID: 0000-0002-2208-6875

Methods of digital marketing positioning in the global civil passenger aircraft market

Galina A. Kalugina
E-mail: kalugina@gmail.com

Anatoly V. Ryapukhin
E-mail: anatoliiruapukhin@yandex.ru

Moscow Aviation Institute (National Research University)
Address: 4, Volokolamskoe Shosse, Moscow 125993, Russia

Abstract

In the conditions of intense competition, the creation of new products and their promotion to the market requires marketing support. The central element of marketing innovation management is marketing positioning. In contrast to the methodological aspect, the procedural component of positioning has not been widely reflected in scientific publications. Also, due attention is not paid to the issues of market segmentation and the allocation of the competitive advantage of such high-tech products as civil aircraft. This determines the relevance of the problem of a marketing positioning procedure development within the framework of the development managing of the aircraft industry enterprises product offer. From the standpoint of a systematic approach, the necessity of studying the adjacent air transportation market is reasonable, as well as the analysis of the correlation of its segmentation with the allocation of target segments of the aircraft market. When conducting a competitive analysis, it is proposed to consider the market position not only of certain types of civil aircraft, but also of aircraft families. Marketing management modeling shows the role of positioning in the processes of aircraft creating, manufacturing, and operating. A distinctive feature of the procedure is the proposed stage of evaluating of the selected product position implementation effectiveness, which allows you to analyze the marketing decisions feasibility throughout product life cycle. Special attention is paid to the issues of information support. The presented research results reflect the specifics of the marketing activities of aviation-industrial enterprises and contribute to the development of the conceptual foundations of industry marketing.

Key words: marketing positioning; marketing; segmentation; market research; aviation; aircraft.

Citation: Kalugina G.A., Ryapukhin A.V. (2021) Methods of digital marketing positioning in the global civil passenger aircraft market. *Business Informatics*, vol. 15, no 4, pp. 36–49. DOI: 10.17323/2587-814X.2021.4.36.49

References

1. Scheinberg R. (2017) *The commercial aircraft finance handbook*. London: Routledge. DOI: https://doi.org/10.4324/9780203713303.
2. Spreen W.E. (2016) *Marketing in the international aerospace industry*. London: Routledge. DOI: https://doi.org/10.4324/9781315249681.
3. Vasigh B., Gorjidooz J. (2016) *Engineering economics for aviation and aerospace*. London: Taylor & Francis. DOI: https://doi.org/10.4324/9781315644257.
4. Zaripov R.N., Murakaev I.M., Novikov S.V., Ryapukhin A.V. (2020) Corporate structure for innovative enterprises. *Russian Engineering Research*, vol. 40, no 2, pp. 137–139. DOI:10.3103/S1068798X20020239.
5. Tikhonov G.V., Lavrova L.A., Kolosova V.V., Zemlyanskaya N.B., Kazakova N.V. (2020) Marketing as an effective control of progressive innovations. *TEM Journal*, vol. 9, no 3, p. 1094. DOI: https://doi.org/10.34069/AI/2021.41.05.18.
6. Ryapukhin A.V., Kabakov V.V., Zaripov R.N. (2019) Risk management of multimodular multi-agent system for creating science-intensive high-tech products. *Espacios*, vol. 40, no 34, p. 19. DOI: http://dx.doi.org/10.21533/pen.v9i4.2388.
7. Hooley G.J., Piercy N., Nicoulaud B. (2008) *Marketing strategy and competitive positioning*. New York: Pearson Education.

8. Embraer S.A., the Official Web site (2021) *Media and downloads*. Available at: https://www.embraercommercialaviation.com/media-downloads/ (accessed 01 April 2021)

9. Bombardier Inc., the Official Web site (2021) *Airport emergency publications*. Available at: https://u.to/7JCEGg (accessed 01.04.2021).

10. Airbus SE, the Official Web site (2021) *Aircraft characteristics, airport operations and tech data*. Available at: https://www.airbus.com/aircraft/support-services/airport-operations-and-technical-data/aircraft-characteristics.html (accessed 01.04.2021).

11. The Boeing Company, the Official Web site (2021) *Airplane characteristics for airport planning*. Available at: https://www.boeing.com/commercial/airports/plan_manuals.page (accessed 01.04.2021).

12. Guzhva V. S., Raghavan S., D'Agostino D. J. (2018) *Aircraft leasing and financing: Tools for success in international aircraft acquisition and management*. Amsterdam: Elsevier.

13. Kalugina G.A. (2018) Civil passenger aircraft prices determination features. *Economics and management in mechanical engineering*, no 3, pp. 30–34 (in Russian).

14. Cook G.N., Billig B. (2017) Airline operations and management. *Management textbook*. London: Routledge. DOI: https://doi.org/10.4324/9781315299594.

15. Riordan D., Kundu A. K., Price M. A. (2016) *Theory and practice of aircraft performance*. New York: John Wiley & Sons Limited. DOI: https://doi.org/10.1017/S0001924000091636.

16. Kalugina G.A. (2013) Marketing research of aviation-industrial enterprises in the process of an aircraft family development. *MAI Works*, no 69 (in Russian).

17. Czinkota M.R., Ronkainen I.A. (2013) *International marketing*. 10th edition. Boston, MA: Cengage Learning. DOI: https://doi.org/10.1080/08975931003644630.

18. Clark P. (2017) *Buying the big jets - fleet planning for airlines*. London: Routledge. DOI: https://doi.org/10.4324/9781315195780.

19. Malaval P., Benaroya C., Aflalo J. (2013) *Aerospace marketing management: A handbook for the entire value chain*. Berlin: Springer Science & Business Media. DOI: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-01354-1.

About the authors

Galina A. Kalugina

Ph.D. (Econ.);

Associate Professor, Department of Management and Marketing of High-tech Industries, Moscow Aviation Institute (National Research University), 4, Volokolamskoe Shosse, Moscow 125993, Russia;

E-mail: kalugina@gmail.com

ORCID: 0000-0002-2085-8851

Anatoly V. Ryapukhin

Senior Lecturer, Department of Industrial Economics, Moscow Aviation Institute (National Research University), 4, Volokolamskoe Shosse, Moscow 125993, Russia;

E-mail: anatoliiruapukhin@yandex.ru

ORCID: 0000-0002-2208-6875

DOI: 10.17323/2587-814X.2021.4.50.60

Использование последовательностей Фишберна для адекватного моделирования по выборочным данным*

А.В. Сигал
E-mail: ksavo3@cfuv.ru

Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского
Адрес: 295007, г. Симферополь, проспект Академика Вернадского, д. 4

Аннотация

В статье рассматривается вероятностно-статистическое моделирование принятия управленческих решений в экономике по выборочным данным за прошлые периоды времени. Для определенности исследование ограничено моделями Марковица задачи поиска эффективного портфеля в поле третьей информационной ситуации. Третья информационная ситуация является широко распространенной ситуацией принятия решений и характеризуется тем, что лицо, принимающее решения, задает согласно своему мнению линейное отношение порядка на компонентах неизвестного распределения вероятностей состояний экономической среды. Часто с точки зрения лица, принимающего решения, компоненты неизвестного распределения вероятностей состояний экономической среды должны удовлетворять частично усиленному линейному отношению порядка. В результате применение традиционных статистических оценок оказывается невозможным, при этом возникает следующий вопрос, практически неизученный в научной литературе. По каким формулам в этом случае следует находить статистические оценки и, прежде всего, оценки неизвестных вероятностей состояний экономической среды? В качестве оценки неизвестного распределения вероятностей предлагается использовать последовательность Фишберна, удовлетворяющую всем имеющимся ограничениям, соответствующую мнению лица, принимающего решения, и заданному им линейному отношению порядка. Последовательности Фишберна представляют собой обобщение известных формул Фишберна. Принципиально важно, что любая последовательность Фишберна удовлетворяет простому линейному отношению порядка, а при определенных условиях и частично усиленному линейному отношению порядка. Особое внимание уделяется энтропийным свойствам обобщенных прогрессий Фишберна, представляющих собой наиболее важный класс последовательностей Фишберна, а также использованию обобщенных прогрессий Фишберна для учета мнения лица, принимающего решения. Разработана такая схема оценки неизвестного распределения вероятностей, которая позволяет добиться корректности вероятностно-статистического моделирования, а также адекватного учета мнения лица, принимающего решения, неопределенности и риска.

Ключевые слова: последовательность Фишберна; принятие управленческих решений; модель Марковица; линейное отношение порядка; энтропия; прогрессия Фишберна.

Цитирование: Сигал А.В. Использование последовательностей Фишберна для адекватного моделирования по выборочным данным // Бизнес-информатика. 2021. Т. 15. № 4. С. 50–60. DOI: 10.17323/2587-814X.2021.4.50.60

* Статья опубликована при поддержке Программы НИУ ВШЭ «Университетское партнерство»

Введение

При теоретико-игровом моделировании особую роль играет статистическая игра [1], являющаяся игрой двух участников: *лица, принимающего решения (ЛПР)*, осознанно выбирающего свое поведение, и «*природы*» (экономической среды в случае моделирования экономики), которая случайным образом оказывается в своих возможных состояниях.

В случае моделирования экономики часто необходимо установить, какой тип отношения порядка выполняется на множестве состояний экономической среды, что характерно для третьей информационной ситуации (ИС) [1, с. 13].

Моделирование экономики требует учета ряда специфических особенностей, присущих экономике, прежде всего, неопределенности и экономического риска (см., например, [2]). Не учет указанных особенностей влечет неэффективность управления. Адекватность и корректность моделирования в значительной мере определяется степенью учета неопределенности, экономического риска и мнения ЛПР об особенностях ситуации принятия решений.

При моделировании экономики широко применяют методы и модели теории вероятностей и математической статистики. Классическим примером вероятностно-статистического моделирования экономики является теория портфеля, начавшаяся с работ Гарри Марковица [3, 4].

Согласно подходу Марковица норму прибыли (доходность) произвольного актива/портфеля характеризует соответствующая случайная величина (СВ), значения которой определяются состояниями, в которых может оказаться экономическая среда (по сути, фондовый рынок). Для определенности и удобства будем считать, что множество возможных состояний экономической среды конечно. В этом случае распределение вероятностей состояний экономической среды представляет собой вектор $\mathbf{q} = (q_1; \ldots; q_n)$, компоненты которого – неотрицательные числа, удовлетворяющие свойству нормировки, при этом СВ, характеризующая норму прибыли выбранного актива, является дискретной СВ (ДСВ). На практике в качестве возможных значений этих ДСВ используют имеющиеся выборочные данные, а именно наблюдавшиеся ранее значения соответствующих норм прибыли, при этом в качестве оценок числовых характеристик этих ДСВ принято использовать традиционные точечные оценки, значения которых вычисляют на основе использования равномерного закона, т.е. вектора $\mathbf{q}^* = (q_1^*; \ldots; q_n^*)$, где $q_1^* = \ldots = q_n^* = \frac{1}{n}$, как оценки распределения вероятностей.

Предположим, что распределение $\mathbf{q} = (q_1; \ldots; q_n)$ удовлетворяет *линейному отношению порядка (ЛОП)* того или иного типа. Основные типы ЛОП были изучены Питером Фишберном [5–7], (а также рассмотрены, например, в [1, с. 77–80]. Формулы Фишберна и их обобщения, называемые *последовательностями Фишберна*, применяют для оценки соответствующих распределений. Например, в работе [8] предложено применение последовательностей Фишберна для приведения обобщенных моделей задачи поиска оптимального портфеля к классической (традиционной) модели Марковица.

Цель настоящего исследования заключается в разработке схемы построения такой оценки распределения вероятностей, которая позволяет добиться корректности вероятностно-статистического моделирования, а также наилучшим образом учесть мнение ЛПР о типе ЛОП, которому подчиняются элементы множества состояний экономической среды, в том числе для случаев, когда использование традиционных точечных оценок невозможно, т.к. наиболее характерная оценка распределения вероятностей должна отличаться от равномерного закона.

Основные задачи исследования состоят в разработке:

- концепции адекватного моделирования принятия управленческих решений в экономике по выборочным данным, в частности, принятия портфельных решений в поле третьей ИС;
- метода оценки распределения вероятностей на основе использования последовательностей Фишберна, прежде всего обобщенных прогрессий Фишберна;
- схемы построения такой оценки распределения вероятностей, которая наилучшим образом учитывает мнение ЛПР.

1. Постановка задачи исследования

Введем обозначения: r_{ij} – значение нормы прибыли i-го актива в условиях, когда экономическая среда оказалась в своем j-м состоянии, $i = \overline{1, k}$, $j = \overline{1, n}$; x_i – доля i-го актива в портфеле, $i = \overline{1, k}$; $\mathbf{x} = (x_1; \ldots; x_k)$ – портфель (точнее его структура); R_i – ДСВ, характеризующая норму прибыли i-го актива, $i = \overline{1, k}$;

$R_{\mathbf{x}} = \sum_{i=1}^{k} R_i \cdot x_i$ – ДСВ, характеризующая норму прибыли портфеля **x**;

$\mathbf{q} = (q_1; ...; q_n)$ – распределение вероятностей состояний экономической среды,

$m_i = \mathbf{M}\left(R_i\right) = \sum_{j=1}^{n} r_{ij} \cdot q_j$, $m_{\mathbf{x}} = \mathbf{M}(R_{\mathbf{x}})$ – математические ожидания соответствующих ДСВ;

$\sigma_i^2 = \mathbf{D}\left(R_i\right) = \sum_{j=1}^{n} r_{ij}^2 \cdot q_j - m_i^2$, $\sigma_{\mathbf{x}}^2 = \mathbf{D}(R_{\mathbf{x}})$ – дисперсии соответствующих ДСВ;

$c_{il} = \mathrm{cov}\left(R_i; R_l\right) = \sum_{j=1}^{n} r_{ij} \cdot r_{lj} \cdot q_j - m_i \cdot m_l$ – ковариация между указанными ДСВ, $i = \overline{1, k}$, $l = \overline{1, k}$.

Если известны точные истинные значения r_{i1}, ..., r_{in} соответствующей ДСВ R_i и имеет место первая ИС, когда вероятности q_1, ..., q_n состояний известны, то значения числовых характеристик m_i, σ_i^2, c_{ij} могут быть найдены по вышеприведенным формулам, а числовые характеристики $m_{\mathbf{x}}$ и $\sigma_{\mathbf{x}}^2$ ДСВ $R_{\mathbf{x}} = \sum_{i=1}^{k} R_i \cdot x_i$ портфеля **x** представляют собой функции долей x_1, ..., x_k. Классическую модель Марковица (модель задачи поиска эффективного портфеля в поле первой ИС) можно представить в следующем виде:

$$m_{\mathbf{x}} = \sum_{i=1}^{k} m_i \cdot x_i \to \max_{\mathbf{x}}, \quad (1)$$

$$\sigma_{\mathbf{x}}^2 = \sum_{i=1}^{k} \sum_{l=1}^{k} c_{il} \cdot x_i \cdot x_l \to \min_{\mathbf{x}}, \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^{k} x_i = 1, \quad (3)$$

$$x_i \geq 0, \; i = \overline{1, k}. \quad (4)$$

Эффективным портфелем (в модели Марковица) принято называть портфель, структура которого является оптимальным по Парето решением задачи (1)–(4). R_x

Основная задача ЛПР (инвестора) состоит в поиске структуры оптимального портфеля, т.е. структуры такого эффективного портфеля, который, по мнению ЛПР, обладает всеми желаемыми свойствами, прежде всего, наилучшим сочетанием значений своих числовых характеристик.

Пусть теперь возможные значения r_{i1}, ..., r_{in} произвольной ДСВ R_i известны, а вероятности q_1, ..., q_n не известны, тогда числовые характеристики m_i, σ_i^2, c_{ij} представляют собой функции вероятностей q_1, ..., q_n, а числовые характеристики $m_{\mathbf{x}}$ и $\sigma_{\mathbf{x}}^2$ ДСВ $R_x = \sum_{i=1}^{k} R_i \cdot x_i$ портфеля **x** – функции вероятностей q_1, ..., q_n и долей x_1, ..., x_k. Это допущение соответствует подходу, применяемому на практике, когда используют имеющиеся выборочные данные, т.е. когда в качестве значений r_{i1}, ..., r_{in} используют наблюдавшиеся значения нормы прибыли i-го актива, при этом неизвестные значения числовых характеристик m_i, σ_i^2, c_{ij}, как правило, оценивают их традиционными точечными оценками, т.е. значениями числовых характеристик выборки

$$\overline{r_i} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{j=1}^{n} r_{ij}, \; i = \overline{1, k}, \; \sigma_i^{*2} = \overline{r_i^2} - \overline{r_i}^2 = \frac{1}{n} \cdot \sum_{j=1}^{n} r_{ij}^2 - \overline{r_i}^2,$$

$$i = \overline{1, k}, \; c_{il}^* = \frac{1}{n} \cdot \sum_{j=1}^{n} r_{ij} \cdot r_{lj} - \overline{r_i} \cdot \overline{r_l}, \; i = \overline{1, k}, \; l = \overline{1, k},$$

соответственно. Подчеркнем, теперь r_{ij} – это значение нормы прибыли i-го актива, наблюдавшееся в j-й период (момент) времени, а для вычисления значений $\overline{r_i}$, σ_i^{*2}, c_{il}^* в качестве оценки распределения вероятностей использован равномерный закон.

Применение традиционных точечных оценок может противоречить мнению ЛПР о значимости (информативности) различных моментов времени. Мнение ЛПР о значимости различных моментов времени обязательно должно быть отражено в обобщенной модели Марковица: в этом случае система ограничений задачи поиска эффективного портфеля может содержать такие ограничения для возможных значений q_1, ..., q_n компонент распределения вероятностей, которым не удовлетворяет равномерный закон.

Обобщенная модель Марковица задачи поиска эффективного портфеля в поле третьей ИС при справедливости простого ЛОП может быть записана в следующем виде [8]:

$$H(\mathbf{q}) = -\sum_{j=1}^{n} q_j \cdot \ln q_j \to \max_{\mathbf{q}}, \quad (5)$$

$$m_{\mathbf{x}} = \sum_{i=1}^{k} m_i \cdot x_i \to \max_{\mathbf{x}}, \quad (6)$$

$$\sigma_{\mathbf{x}}^2 = \sum_{i=1}^{k} \sum_{l=1}^{k} c_{il} \cdot x_i \cdot x_l \to \min_{\mathbf{x}}, \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^{k} x_i = 1, \quad (8)$$

$$x_i \geq 0, \; i = \overline{1, k}, \quad (9)$$

$$q_1 \leq q_2 \leq ... \leq q_n, \quad (10)$$

$$\sum_{j=1}^{n} q_j = 1, \quad (11)$$

$$q_j \geq 0, \; j = \overline{1, n}. \quad (12)$$

Соотношения (10) отображают суть простого ЛОП и мнение ЛПР о том, что ситуация, сложившаяся в более поздний период времени, обладает большей значимостью, т.е. оказывает более существенное влияние на настоящее и будущее, чем ситуация, сложившаяся в более ранний период времени. Такое мнение, безусловно соответствующее реалиям экономики, высказывают многие исследователи. Так, В.К. Семенычев и Е.В. Семенычев отмечают, «что при прогнозировании в условиях быстро изменяющихся социально-экономических явлений информация более поздних временных периодов является более важной, более существенной, чем информация ранних периодов» [9, с. 60]. Подчеркнем, в случае принятия портфельных решений в поле третьей ИС при справедливости простого ЛОП возможно применение традиционных точечных оценок, т.к. равномерный закон удовлетворяет простому ЛОП.

Обобщенная модель Марковица задачи поиска эффективного портфеля в поле третьей ИС при справедливости частично усиленного ЛОП может быть записана в следующем виде [8]:

$$H(\mathbf{q}) = -\sum_{j=1}^{n} q_j \cdot \ln q_j \to \max_{\mathbf{q}}, \quad (13)$$

$$m_{\mathbf{x}} = \sum_{i=1}^{k} m_i \cdot x_i \to \max_{\mathbf{x}}, \quad (14)$$

$$\sigma_{\mathbf{x}}^2 = \sum_{i=1}^{k}\sum_{l=1}^{k} c_{il} \cdot x_i \cdot x_l \to \min_{\mathbf{x}}, \quad (15)$$

$$\sum_{i=1}^{k} x_i = 1, \quad (16)$$

$$x_i \geq 0,\ i = \overline{1, k}, \quad (17)$$

$$\begin{cases} q_2 \geq q_1, \\ q_3 \geq q_1 + q_2, \\ \ldots \\ q_n \geq q_1 + q_2 + \ldots + q_{n-1}, \end{cases} \quad (18)$$

$$\sum_{j=1}^{n} q_j = 1, \quad (19)$$

$$q_j \geq 0,\ j = \overline{1, n}. \quad (20)$$

Соотношения (18) отображают суть частично усиленного ЛОП и мнение ЛПР о том, что социально-экономические условия изменяются чрезвычайно быстро, при этом рассматриваемые выборочные данные представляют собой временны́е ряды, характеризующиеся высокой скоростью изменений. ЛПР обязано придерживаться такому мнению в тех случаях, когда имеет место или предкризисная (кризисная) ситуация, или резкий рост экономики (соответствующего сектора экономики) и т.д. [10]. Если ЛПР считает, что распределение вероятностей удовлетворяет частично усиленному ЛОП, то это означает, что, по мнению ЛПР, значимость текущего периода времени не меньше общей значимости всех предшествующих периодов времени. Именно в этом случае невозможно применение традиционных точечных оценок, т.к. равномерный закон не удовлетворяет частично усиленному ЛОП.

Это свидетельствует об актуальности и необходимости разработки такого метода построения оценки распределения вероятностей, который наилучшим образом учитывает мнение ЛПР о типе отношения порядка на множестве состояний экономической среды, по сути, его мнение о типе ЛОП, которому должно удовлетворять распределение вероятностей.

Можно утверждать, что приведенные ситуации принятия портфельных решений характеризует статистическая игра: с задачами (1)–(4), (5)–(12), (13)–(20) связана статистическая игра, заданная матрицей $\mathbf{R} = \mathbf{R}_{k \times n} = (r_{ij})$, где r_{ij} – это соответствующее значение нормы прибыли *i*-го актива. Отметим, принятие портфельных решений возможно за счет решения соответствующей игры [11]: при выполнении определенных требований решение антагонистической игры, заданной матрицей $\mathbf{R} = \mathbf{R}_{k \times n} = (r_{ij})$, позволяет найти эффективный портфель $\mathbf{x} = (x_1^*; \ldots; x_k^*)$, при этом его структура не зависит от распределения вероятностей.

2. Основные понятия и определения

Приведем определения ЛОП основных типов [1, с. 78]:

1) *простое ЛОП* – это отношение порядка, задаваемое неравенствами вида $q_1 \geq q_2 \geq \ldots \geq q_n$ или $q_1 \leq q_2 \leq \ldots \leq q_n$;
2) *частично усиленное ЛОП* – это отношение порядка, задаваемое неравенствами вида $q_j \geq q_{j+1} + \ldots + q_n,\ j = \overline{1, n-1}$, или $q_j \geq q_1 + \ldots + q_{j-1},\ j = \overline{2, n}$;
3) *усиленное ЛОП* – это отношение порядка, задаваемое неравенствами вида
$q_{j+1} + \ldots + q_{j+\alpha(j)} \leq q_j \leq q_{j+1} + \ldots + q_{j+\alpha(j)} + q_{j+\alpha(j)+1}$,
$j = \overline{1, n-2}$, $\alpha(j) \in \{1; 2; \ldots; n-1-j\}$, или

$$q_{j-\alpha(j)}+...+q_{j-1} \le q_j \le q_{j-\alpha(j)-1}+q_{j-\alpha(j)}+...+q_{j-1}$$

$j=\overline{3,n}$, $\alpha(j) \in \{1; 2; ...; j-2\}$, где $\alpha(j)$ – заданные натуральные числа, принимающие значения из указанных множеств.

Последовательностью Фишберна (ПФ) будем называть последовательность (q_1; q_2; ...; q_j; ...), элементы которой равны

$$q_j = \frac{a_j}{\sum_i a_i}, \forall\ j, \qquad (21)$$

где *последовательность* (a_1; a_2; ...; a_j; ...), *порождающая* данную ПФ, представляет собой заданную монотонную последовательность неотрицательных чисел, сумма которых является положительным числом [12, с. 132]. Далее, для удобства, ограничимся рассмотрением конечных ПФ (q_1; q_2; ...; q_n).

Внешне формула (21) совпадает с так называемой третьей формулой Фишберна. Третью формулу Фишберна применяют для оценки распределения вероятностей в случае, когда оно должно удовлетворять усиленному ЛОП. В этом случае формулы для вычисления оценок вероятностей содержат параметр, при этом применение формулы (21) позволяет найти такое значение этого параметра, для которого значения оценок вероятностей удовлетворяют и усиленному ЛОП, и условию (3). Очевидно, множество всех ПФ существенно шире множества всех последовательностей, удовлетворяющих усиленному ЛОП и условию (3).

В публикациях автора (см., например, [8, 10, 12–16]) изучены свойства ПФ и таких их частных случаев, как

1) *арифметическая прогрессия Фишберна*, задаваемая *первой формулой Фишберна*,

$$q_j = \frac{2\cdot(n-j+1)}{n\cdot(n+1)}, j=\overline{1,n}; \qquad (22)$$

2) *геометрическая прогрессия Фишберна*, задаваемая *второй формулой Фишберна*,

$$q_j = \frac{2^{n-j}}{2^n-1}, j=\overline{1,n}; \qquad (23)$$

3) *возрастающая арифметическая прогрессия Фишберна*

$$q_j = \frac{2\cdot j}{n\cdot(n+1)}, j=\overline{1,n}; \qquad (24)$$

4) *возрастающая геометрическая прогрессия Фишберна*

$$q_j = \frac{2^{j-1}}{2^n-1}, j=\overline{1,n}; \qquad (25)$$

5) *обобщенная арифметическая прогрессия Фишберна*

$$q_j = \frac{1}{n} - \frac{(n-1)\cdot x}{2} + (j-1)\cdot x = \frac{2-n\cdot(n-2\cdot j+1)\cdot x}{2\cdot n}, j=\overline{1,n}, \qquad (26)$$

для которой ее разность x удовлетворяет неравенству

$$|x| \le \frac{2}{n\cdot(n-1)};$$

6) *обобщенная геометрическая прогрессия Фишберна*

$$q_j = \frac{x-1}{x^n-1}\cdot x^{j-1} = \frac{1-x}{1-x^n}\cdot x^{j-1}, j=\overline{1,n}, \qquad (27)$$

для которой ее знаменатель x удовлетворяет неравенству $x > 0$.

Зачастую применение формулы (24) или (25), например, когда значения индекса j представляют собой моменты времени, предпочтительнее применения формулы (22) или (23), соответственно. Формулы (22)–(25) применяют в самых разнообразных исследованиях, о чем свидетельствуют многочисленные публикации (см., например, [17–35]).

Равномерный закон, т.е. вектор $\mathbf{q}^* = (q_1^*;...;q_n^*)$, где $q_1^* = ... = q_n^* = \frac{1}{n}$, представляет собой частный случай и обобщенной арифметической прогрессии Фишберна (для разности $x = 0$), и обобщенной геометрической прогрессии Фишберна (для знаменателя $x = 1$).

3. Оценка распределения вероятностей на основе использования последовательностей Фишберна

Итак, обобщенные модели Марковица задачи поиска эффективного портфеля можно приводить к классической модели Марковица за счет использования ПФ. Проблема состоит в том, каким образом следует выполнить корректную оценку распределения вероятностей. Предлагаемая схема построения корректной оценки распределения вероятностей базируется на свойствах ПФ, прежде всего, на свойствах обобщенных прогрессий Фишберна.

Корректность использования формул (26), (27) зависит от ответов на такие вопросы. 1. Когда обобщенная прогрессия Фишберна удовлетворяет простому ЛОП? 2. Когда обобщенная прогрессия Фишберна удовлетворяет частично усиленному ЛОП? 3. Когда обобщенная прогрессия Фишберна удовлетворяет принципу Гиббса–Джейнса?

Напомним, принцип Гиббса–Джейнса наиболее характерной оценкой неизвестного распределения считает вектор $\mathbf{q}^* = \left(q_1^*; ...; q_n^*\right)$, максимизирующий значение энтропии $H\left(\mathbf{q}\right) = -\sum_{j=1}^{n} q_j \cdot \ln q_j$ при выполнении всех ограничений, т.е. ограничений (3), (4) и, возможно, еще одного или нескольких ограничений, которым, по мнению ЛПР, должно удовлетворять распределение вероятностей. Энтропийный подход существенно обогащает инструментарий анализа и моделирования экономического риска. Очевидно, если выполняются лишь ограничения (3), (4), то максимальное значение энтропии $H\left(\mathbf{q}^*\right) = \ln n = \max_{\mathbf{q}} H\left(\mathbf{q}\right)$ достигается для равномерного закона, т.е. для вектора $\mathbf{q}^* = \left(q_1^*; ...; q_n^*\right)$, где $q_1^* = ... = q_n^* = \frac{1}{n}$. В частности, на множестве всех обобщенных прогрессий Фишберна максимальное значение энтропии достигается тоже для равномерного закона.

Заметим, произвольная ПФ, а, следовательно, и произвольная обобщенная прогрессия Фишберна, удовлетворяет соответствующему простому ЛОП.

Если обобщенные арифметические прогрессии Фишберна практически всегда не удовлетворяют частично усиленному ЛОП, то обобщенные геометрические прогрессии Фишберна в зависимости от значения своего знаменателя x в одних случаях удовлетворяют, а в других случаях не удовлетворяют частично усиленному ЛОП.

Следовательно, вышеприведенные вопросы имеют тривиальные ответы на множестве всех обобщенных арифметических прогрессий Фишберна. Однако на множестве всех обобщенных геометрических прогрессий Фишберна ответы на эти два вопроса не столь очевидны. Теоремы, содержащие эти ответы, приведены и доказаны в монографии А.В. Сигала, Е.С. Ремесник [12, с. 119–127]. Суть этих теорем состоит в следующем: произвольная обобщенная геометрическая прогрессия Фишберна (q_1; q_2; ...; q_n) удовлетворяет соответствующему частично усиленному ЛОП тогда и только тогда, когда значение ее знаменателя принадлежит множеству $x \in \left(0; \alpha_n\right] \cup \left[\beta_n; +\infty\right)$, где α_n – корень уравнения $x^n - 2 \cdot x + 1 = 0$, принадлежащий $\alpha_n \in (0{,}5; 1]$, $\beta_n = \frac{1}{\alpha_n}$, при этом $x^* = \alpha_n$ ($x^* = \beta_n$) – единственное значение знаменателя x прогрессий (27), максимизирующее значение энтропии $H(\mathbf{q})$ для всех невозрастающих (неубывающих, соответственно) обобщенных геометрических прогрессий Фишберна.

Один из естественных методов решения задач (5)–(12) и (13)–(20) – это их приведение к задаче (1)–(4) за счет использования наиболее характерной оценки распределения вероятностей, т.е. за счет использования вектора $\mathbf{q} = (q_1; ...; q_n)$, максимизирующего значение энтропии на множестве всех ПФ, удовлетворяющих ЛОП соответствующего типа. Практически без потери общности, вместо множества всех ПФ можно ограничиться рассмотрением только обобщенных прогрессий Фишберна, наиболее важного и весьма широкого частного случая ПФ.

Вектором, максимизирующим значение энтропии на множестве всех ПФ (а, следовательно, и на множестве всех обобщенных прогрессий Фишберна), по своему определению всегда удовлетворяющих простому ЛОП, является равномерное распределение, т.е. вектор $\mathbf{q} = (q_1; ...; q_n)$, где $q_1^* = ... = q_n^* = \frac{1}{n}$. Поэтому в случае задачи (5)–(12) применение традиционных точечных оценок целесообразно, причем и с позиций математической статистики, и с позиций адекватности моделирования.

А вектором, максимизирующим значение энтропии на множестве всех неубывающих обобщенных геометрических прогрессий Фишберна (q_1; q_2; ...; q_n), удовлетворяющих частично усиленному ЛОП, является прогрессия (27), знаменатель которой равен $x = \beta_n$, где $\beta_n = \frac{1}{\alpha_n}$, α_n – корень уравнения $x^n - 2 \cdot x + 1 = 0$, принадлежащий $\alpha_n \in (0{,}5; 1]$.

Оценку неизвестного распределения вероятностей и использование этой оценки можно осуществлять по следующей пятиэтапной схеме.

Шаг 1. Выбор типа ЛОП, которому, по мнению ЛПР, должно удовлетворять распределение (q_1; q_2; ...; q_n) вероятностей.

Шаг 2. Выбор последовательности (a_1; a_2; ...; a_n) неотрицательных чисел, которую, по мнению ЛПР, целесообразно использовать в качестве последовательности, порождающей ПФ с желаемыми свойствами. Эта последовательность (a_1; a_2; ...; a_n) должна удовлетворять ЛОП выбранного типа, при этом она может представлять собой последовательность, элементы которой образуют, например, некоторую прогрессию натуральных чисел (в т.ч. постоянную $a_1 = a_2 = ... = a_n = 1$, строго монотонную арифметическую или строго монотонную геометрическую прогрессию), числа Фибоначчи или числа Мерсенна.

Шаг 3. Построение ПФ, которую, по мнению ЛПР, целесообразно использовать в качестве оценки распределения вероятностей, т.е. вычисление по формуле (21) значений компонент ПФ (q_1; q_2; ...; q_n), порожденной выбранной последовательностью (a_1; a_2; ...; a_n).

Шаг 4. Применение построенной ПФ в качестве оценки распределения вероятностей, и, в частности, вычисление значений оценок соответствующих числовых характеристик по формулам для вычисления этих числовых характеристик ДСВ, в которых вместо значений вероятностей используются значения соответствующих элементов построенной ПФ.

Шаг 5. Выбор оптимального решения, т.е. выбор для реализации такого решения, которое обладает наилучшим сочетанием вычисленных значений оценок рассматриваемых числовых характеристик.

Заключение

Формулы Фишберна для вычисления точечных оценок распределений вероятностей хорошо известны и широко применяются в теоретических и практических исследованиях. Для корректной оценки распределения вероятностей состояний экономической среды целесообразно применять последовательности Фишберна (ПФ), обобщающие формулы Фишберна: в качестве оценки распределения вероятностей целесообразно использовать ПФ, обладающую всеми желаемыми свойствами и, в частности, удовлетворяющую типу линейного отношения порядка (ЛОП), которому, по мнению лица, принимающего решения (ЛПР), должно удовлетворять распределение вероятностей. Наиболее важными типами ЛОП являются простое ЛОП и частично усиленное ЛОП.

ЛПР может осуществить оценку распределения вероятностей и использование этой оценки по следующей схеме, впервые приведенной в статье.

1. Выбор типа ЛОП, которому должно удовлетворять распределение вероятностей.

2. Выбор последовательности, которую целесообразно использовать в качестве последовательности, порождающей ПФ.

3. Построение ПФ, которую целесообразно использовать в качестве оценки распределения вероятностей.

4. Применение построенной ПФ в качестве оценки распределения вероятностей.

5. Выбор оптимального решения, т.е. выбор для реализации такого решения, которое обладает наилучшим сочетанием вычисленных значений оценок рассматриваемых числовых характеристик.

Предлагаемая схема позволяет добиться корректности вероятностно-статистического моделирования, а также наилучшим образом учесть мнение ЛПР о типе ЛОП, которому подчиняются элементы множества состояний экономической среды, в том числе для случаев, когда использование традиционных точечных оценок невозможно, т.к. наиболее характерная оценка распределения вероятностей должна отличаться от равномерного закона.

Свойства ПФ полностью совпадают со свойствами последовательности, ее порождающей (за исключением условия нормировки, которому не обязана удовлетворять последовательность, порождающая ПФ). При выборе ПФ, обладающей всеми желаемыми свойствами, можно ограничиться рассмотрением множества обобщенных прогрессий Фишберна, которые представляют собой ПФ, являющиеся арифметическими или геометрическими прогрессиями. В случае простого ЛОП можно ограничиться рассмотрением обобщенных арифметических прогрессий Фишберна, а в случае частично усиленного ЛОП – обобщенных геометрических прогрессий Фишберна. Наконец, если ЛПР придерживается принципа Гиббса–Джейнса, то в качестве оценки неизвестного распределения вероятностей следует использовать или равномерный закон (при справедливости простого ЛОП), или обобщенную геометрическую прогрессию Фишберна, максимизирующую значение энтропии (при справедливости соответствующего частично усиленного ЛОП).

К случаям, когда следует применять ПФ, удовлетворяющие частично усиленному ЛОП, можно отнести случаи, когда рассматриваемые выборочные данные представляют собой временны е ряды, характеризующиеся высокой скоростью изменений. ЛПР обязано придерживаться такому мнению в тех случаях, когда, например, имеет место или предкризисная (кризисная) ситуация, или резкий рост экономики (соответствующего сектора экономики).

В случаях, когда, по мнению ЛПР, распределение вероятностей должно удовлетворять частично усиленному ЛОП, невозможно использование

традиционных точечных оценок, т.к. равномерный закон, используемый для вычисления значений традиционных точечных оценок, не удовлетворяет частично усиленному ЛОП. Можно сказать, что в этих случаях возникает противоречие между традиционным вероятностно-статистическим инструментарием и особенностями ситуации принятия решений, а корректность и адекватность моделирования требуют в качестве оценки распределения вероятностей использовать строго монотонную последовательность, т.е. ПФ, удовлетворяющую соответствующему частично усиленному ЛОП, например, обобщенную геометрическую прогрессию Фишберна, максимизирующую значение энтропии (при справедливости соответствующего частично усиленного ЛОП). Хотя при этом теряются желаемые статистические свойства точечных оценок (несмещенность и т.д.), но использование строго монотонной ПФ (вместо равномерного закона) позволяет добиться желаемых уровней корректности и адекватности моделирования, а также наилучшего учета мнения ЛПР. ■

Литература

1. Трухаев Р.И. Модели принятия решений в условиях неопределенности. М.: Наука, 1981.
2. Экономический риск: игровые модели / В.В. Витлинский и [др.]. Киев: КНЭУ, 2002. (на укр. яз.).
3. Markowitz H.M. Portfolio Selection // Journal of Finance. 1952. Vol. 7. No. 1. P. 77–91.
4. Markowitz H.M. Portfolio Selection: Efficient Diversification of Investments. N.Y.: John Wiley & Sons, 1959.
5. Fishburn P.C. Decision and Value Theory. N.Y.: John Wiley & Sons, 1964.
6. Fishburn P.C. Analysis of Decisions with Incomplete Knowledge of Probabilities // Operations Research. 1965. Vol. 13. No. 2. P. 217–237.
7. Fishburn P.C. Independence in Utility Theory with Whole Product Sets // Operations Research. 1965. Vol. 13. No. 1. P. 28–45.
8. Сигал А.В. О приведении обобщенной модели Марковица в поле третьей информационной ситуации к классической модели Марковица // Труды Седьмой Международной конференции Системный анализ и информационные технологии САИТ-2017, Светлогорск, 13–18 июня 2017. М.: ФИЦ ИУ РАН, 2017. С. 159–167.
9. Семенычев В.К., Семенычев Е.В. Параметрическая идентификация рядов динамики: структуры, модели, эволюция. Монография. Самара: СамНЦ РАН, 2011.
10. Сигал А.В. Статистические оценки, учитывающие особенности цифровой трансформации // Сборник науч. трудов II междунар. науч.-практ. форума «Россия, Европа, Азия: цифровизация глобального пространства», Ставрополь, 09-12 октября 2019 / под ред. В.А. Королева. Ставрополь: СЕКВОЙЯ, 2019. С. 134–137.
11. Сигал А.В. Об эффективности портфелей, найденных теоретико-игровым методом // Экономика и математические методы. 2018. Т. 54. Вып. 1. С. 125–144.
12. Сигал А.В., Ремесник Е.С. Последовательности Фишберна и их применение в современной теории портфеля. Монография. Симферополь: ИП Корниенко А.А., 2018.
13. Сигал А.В. О принятии управленческих решений в поле второй информационной ситуации // Актуальные проблемы и перспективы развития экономики: Труды XVIII Всеросс. с междунар. участием науч.-практ. конф., (Симферополь–Гурзуф, 24–26 октября 2019) / под ред. Н.В. Апатовой. Симферополь: ИП Зуева Т.В., 2019. С. 56–58.
14. Сигал А.В., Макеева Г.Н. Обобщенные прогрессии Фишберна // Анализ, моделирование, управление, развитие социально-экономических систем (АМУР-2015): сб. науч. тр. IX Межд. школы-симпозиума АМУР-2015 (Севастополь, 12-21 сентября 2015). Симферополь: КФУ имени В.И. Вернадского, 2015. С. 343–350.
15. Сигал А.В., Ремесник Е.С. Последовательности, удовлетворяющие линейным соотношениям порядка: применение в экономике и свойства // Друкеровский вестник. 2018. № 1. С. 44–58. DOI: 10.17213/2312-6469-2018-1-44-58.
16. Сигал А.В., Ремесник Е.С. Точечные оценки Фишберна и их обобщения // Моделирование и анализ безопасности и риска в сложных системах: труды Междунар. науч. школы МА БР-2019 (Санкт-Петербург, 19–21 июня, 2019): сб. статей / под ред. Е.Д. Соложенцева, В.В. Карасева. СПб.: ГУАП, 2019. С. 85–92.
17. Алиев А.А., Гордиенко М.С., Петелина А.В. Комплексная оценка финансовой конкурентоспособности компании издательской отрасли // Вестник университета. 2020. № 10. С. 113–121. DOI: 10.26425/1816-4277-2020-10-113-121.
18. Алиев А.А., Литвишко О.В., Юсифова А.И., Фатеева А.А. Анализ эффективности финансово-хозяйственной деятельности российских футбольных клубов // Вестник университета. 2021. № 5. С. 85–92. DOI: 10.26425/1816-4277-2021-5-85-92.
19. Бабенков В.И., Гасюк Д.П., Дубовский В.А. Метод оценивания рисков на этапах жизненного цикла образцов вооружения и военной техники // Вооружение и экономика. 2020. № 3 (53). С. 59–65.
20. Белозерцев О.В., Белозерцев В.Н. Оценка влияния факторов среды на экономическую безопасность предприятия // Экономический вестник Донбасского государственного технического университета. 2020. № 5. С. 5–13.
21. Виноградова Т.А., Кувшинов М.С. Реализация оценки и анализа уровня инновационной активности персонала предприятия // Вестник ЮУрГУ. Серия «Экономика и менеджмент». 2021. Т. 15, № 2. С. 132–139. DOI: 10.14529/em210215.
22. Долженко А.И., Шполянская И.Ю., Глушенко С.А. Нечеткая продукционная сеть для анализа качества микросервисной архитектуры // Бизнес-информатика. 2020. Т. 14. № 4. С. 36–46. DOI: 10.17323/2587-814X.2020.4.36.46.

23. Жеишев Р.С., Никитин Ю.А. Оценка военно-экономической эффективности системы продовольственного обеспечения войск (сил) в Арктической зоне Российской Федерации // Экономический вектор. 2020. № 2 (21). С. 96–102. DOI: 10.36807/2411-7269-2020-2-21-96-102.

24. Костырев А.П. Оценка результатов реализации промышленной политики на основе многоуровневого подхода // Финансовая экономика. 2020. № 8. С. 299–304.

25. Кувшинов М.С., Калачева А.Г. Развитие состояния анализа инвестиционной привлекательности промышленных предприятий // Вестник ЮУрГУ. Серия «Экономика и менеджмент». 2015. Т. 9, № 2. С. 74–81.

26. Лямин Б.М., Моттаева А.Б. Оценка потенциала коммерциализации результатов инновационной деятельности в высшем учебном заведении // Экономические науки. 2020. № 191. С. 110–115. DOI: 10.14451/1.191.110.

27. Недосекин А.О. Методологические основы моделирования финансовой деятельности с использованием нечетко-множественных описаний. Дис. ... д-ра эконом. наук. СПб: СПбГЭУ, 2003.

28. Потапов Д.К., Евстафьева В.В. О методиках определения весовых коэффициентов в задаче оценки надежности коммерческих банков // Социально-экономическое положение России в новых геополитических и финансово-экономических условиях: реалии и перспективы развития: сб. науч. ст. СПб.: Изд-во Института бизнеса и права. 2008. Вып. 5. С. 191–196.

29. Родионов Д.Г., Конников Е.А., Мугутдинов Р.М. Системный анализ конкурентоспособности цифрового предприятия в рамках информационной среды // Экономические науки. 2020. № 193. С. 394–401. DOI: 10.14451/1.193.394.

30. Сазонов А.Е., Осипов Г.С. Лингвистическая оценка уровня совершенства системы управления безопасностью судоходных компаний // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. 2017. Т. 9. № 1 (41). С. 7–16. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-7-16.

31. Сахарова Л.В., Акперов Г.И. Нечетко-множественная методика комплексной оценки состояния социально-экономических систем региона // Интеллектуальные ресурсы – региональному развитию. 2020. № 2. С. 137–143.

32. Сомов В.Л., Толмачов М.Н. Методы определения коэффициентов весомости динамических интегральных показателей // Вопросы статистики. М.: Информационно-издательский центр «Статистика России», 2017. № 6. С. 74–79.

33. Толстых Т.О., Гамидуллаева Л.А., Шмелева Н.В. Методические аспекты формирования портфеля проектов в инновационной экосистеме // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2020. № 1 (33). С. 5–23. DOI: 10.21685/2227-8486-2020-1-1.

34. Тютюкина Е.Б., Капранова Л.Д., Седаш Т.Н. Определение приоритетных направлений и инвестиционной поддержки развития Российской экономики // Экономический анализ: теория и практика. Москва, 2014. № 38 (389). С. 2–11.

35. Яшин С.Н., Борисов С.А. Методологические подходы к определению рейтинга экономико-инновационного развития промышленных предприятий региона // Вопросы инновационной экономики. 2020. Том 10. № 2. С. 819–836. DOI: 10.18334/vinec.10.2.100921.

Об авторе

Сигал Анатолий Викторович

доктор экономических наук, профессор;

профессор кафедры бизнес-информатики и математического моделирования, Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского, 295007, г. Симферополь, проспект Академика Вернадского, д. 4;

E-mail: ksavo3@cfuv.ru

ORCID: 0000-0003-2090-4464

Using Fishburne's sequences in suitable modeling used for sample data

Anatoliy V. Sigal
E-mail: ksavo3@cfuv.ru

V.I. Vernadsky Crimean Federal University
Address: 4, Prospekt Vernadskogo, Simferopol 295007, Russia

Abstract

This article deals with probabilistic and statistical modeling of managerial decision-making in the economy based on sample data for the previous periods of time. For better definition, the study is limited to Markowitz's models in the problem of finding an effective portfolio of the field in the third information situation. The third information situation is a widespread decision-making situation and is characterized by the fact that the decision-maker sets, according to his opinion, are a linear order relation on the components of an unknown probabilistic distribution of the states of the economic environment. Often, from the point of view of the decision-maker, the components of an unknown probability distribution of the states of the economic environment must satisfy a partially reinforced linear order relation. As a result, the use of traditional statistical estimates turns out to be impossible, while the following question arises, which is practically not studied in the scientific literature. In this case, what formulas should be used to find statistical estimates and, above all, estimates of unknown probabilities of the state of the economic environment? As an estimate of an unknown probability distribution, we proposed to use the Fishburne sequence that satisfies all available constraints, while corresponding to the opinion of the decision maker and the linear order relation given by him. Fishburne sequences are a generalization of the well-known Fishburne formulas. It is fundamentally important that any Fishburne sequence satisfies a simple linear order relation, and under certain conditions, a partially strengthened linear order relation. Particular attention is paid to the entropic properties of generalized Fishburne progressions, which represent the most important class of Fishburne sequences, as well as the use of generalized Fishburne progressions to take into account the opinion of the decision maker. Such a scheme for estimating an unknown probability distribution has been developed, which makes it possible to achieve the correctness of probabilistic and statistical modeling, as well as appropriate consideration of the opinion of the decision-maker, uncertainty and risk.

Key words: Fishburne sequence; managerial decision-making; Markowitz model; linear order relation; entropy; Fishburne progression.

Citation: Sigal A.V. (2021) Using Fishburne's sequences in suitable modeling used for sample data. *Business Informatics*, vol. 15, no 4, pp. 50–60. DOI: 10.17323/2587-814X.2021.4.50.60

Reference

1. Trukhaev R.I. (1981) *Models of decision-making in conditions of uncertainty*. Moscow: Nauka (in Russian).
2. Vitlinsky V.V., Verchenko P.I., Sigal A.V., Nakonechny Ya.S. (2002) *Economic risk: Game models*. Kiev: KNEU (in Ukrainian).
3. Markowitz H.M. (1952) Portfolio selection. *Journal of Finance*, March 1952, vol. 7, no 1, pp. 77–91.
4. Markowitz H.M. (1959) *Portfolio selection: Efficient diversification of investments*. N.Y.: John Wiley & Sons.
5. Fishburn P.C. (1964) *Decision and value theory*. N.Y.: John Wiley & Sons.
6. Fishburn P.C. (1965) Analysis of decisions with incomplete knowledge of probabilities. *Operations Research*, vol. 13, no 2, pp. 217–237.
7. Fishburn P.C. (1965) Independence in utility theory with whole product sets. *Operations Research*, vol. 13, no 1, pp. 28–45.
8. Sigal A.V. (2017) On the approximation of the generalized model of Markowitz in the field of information third of the situation to the classical model of Markowitz. Proceedings of the *Seventh International conference system analysis and information technology*, pp. 159–167 (in Russian).
9. Semenychev V.K., Semenychev E.V. (2011) *Parameter identification of time series: structures, models, evolution*. *Monograph*. Samara: SamSC RAS (in Russian).
10. Sigal A.V. (2019) Statistical estimates taking into account the features of digital transformation. Collection of scientific works of the *II International scientific and practical forum "Russia, Europe, Asia: Digitalization of the global space", Stavropol, 09-12 October 2019* (ed. V.A. Korolev). Stavropol: SEKVOYA, pp. 134–137 (in Russian).
11. Sigal A.V. (2018) On the effectiveness of portfolios found by the game-theoretic method. *Economics and Mathematical Methods*, vol. 54, no 1, pp. 125–144 (in Russian).
12. Sigal A.V., Remesnik E.S. (2018) *Fishburne sequences and their application in modern portfolio theory. Monograph*. Simferopol: IP Kornienko A.A. (in Russian).
13. Sigal A.V. (2019) On managerial decision-making in the field of the second information situation. Proceedings of the *XVIII All-Russian scientific and practical conference with international participation Actual problems and prospects of economic development, Simferopol–Gurzuf, October 24–26, 2019* (eds. N.V. Apatova, T.V. Zueva), pp. 56–58 (in Russian).
14. Sigal A.V., Makeeva G.N. (2015) Generalized Fishburne progressions. Proceedings of the *IX International school-symposium analysis, modeling, management, development of socio-economic systems (AMUR-2015), Sevastopol, September 12-21, 2015*, pp. 343–350 (in Russian).
15. Sigal A.V., Remesnik E.S. (2018) Sequences satisfying linear order relations: application in economics and properties. *Drucker's Bulletin*, no 1, pp. 44–58 (in Russian). DOI: 10.17213/2312-6469-2018-1-44-58.

16. Sigal A.V., Remesnik E.S. (2019) Fishburne point estimates and their generalizations. Proceedings of the *International scientific school modeling and analysis of safety and risk in complex systems MASR-2019, Saint Petersburg, June 19–21, 2019* (eds. E.D. Solojentsev, V.V. Karasev). St. Petersburg: GUAP, pp. 85–92 (in Russian).

17. Aliev A.A., Gordienko M.S., Petelina A.V. (2020) Multipurpose assessment of the financial competitiveness of a publishing company. *Vestnik Universiteta*, no 10, pp. 113–121 (in Russian). DOI: 10.26425/1816-4277-2020-10-113-121.

18. Aliev A.A., Litvishko O.V., Yusifova A.I., Fateeva A.A. (2021) Analysis of the effectiveness of financial and economic activities of Russian football clubs. *Vestnik Universiteta*, no 5, pp. 85–92 (in Russian). DOI: 10.26425/1816-4277-2021-5-85-92.

19. Babenkov V.I., Gasyuk D.P., Dubovsky V.A. (2020) Method of risk assessment at the weapons and military equipment samples life cycle stages. *Vooruzheniye i ekonomika*, no 3 (53), pp. 59–65 (in Russian).

20. Belozertsev O.V., Belozertsev V.N. (2020) Assessment of the impact of environmental factors on the economic security of the enterprise. *Economic Bulletin of Donbass State Technical University*, no 5, pp. 5–13 (in Russian).

21. Vinogradova T.A., Kuvshinov M.S. (2021) Implementation of the assessment and analysis of the level of employees' innovation behavior. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Economics and Management*, vol. 15, no 2, pp. 132–139 (in Russian). DOI: 10.14529/em210215.

22. Dolzhenko A.I., Shpolyanskaya I.Yu., Glushenko S.A. (2020) Fuzzy production network for quality analysis of microservice architecture. *Business Informatics*, vol. 14, no 4, pp. 36–46 (in Russian). DOI: 10.17323/2587-814X.2020.4.36.46.

23. Zheishev R.S., Nikitin Yu.A. (2020) Evaluation of the military and economic effectiveness of the system of food supplies for the armed forces in the arctic zone of Russian federation. *Ekonomicheskiy vektor*, no 2 (21), pp. 96–102 (in Russian). DOI: 10.36807/2411-7269-2020-2-21-96-102.

24. Kostyrev A.P. (2020) Evaluation of the results of the implementation of industrial policy based on a multilevel approach. *Financial Economy*, no 8, pp. 299–304 (in Russian).

25. Kuvshinov M.S., Kalacheva A.G. (2015) Development of the state of analysis of investment attractiveness of industrial enterprises. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Economics and Management*, vol. 9, no 2, pp. 74–81 (in Russian).

26. Lyamin B.M., Mottaeva A.B. (2020) Assessment of the potential of commercialization of the results of innovative activity in higher education. *Economic Sciences*, no 191, pp. 110–115 (in Russian). DOI: 10.14451/1.191.110.

27. Nedosekin A.O. (2003) *Methodological foundations of modeling financial activity using fuzzy multiple descriptions*. St. Petersburg: UNECON (in Russian).

28. Potapov D.K., Evstafyeva V.V. (2008) On the methods of determining weight coefficients in the problem of assessing the reliability of commercial banks. *Socio-economic situation of Russia in the new geopolitical, financial, and economic conditions: realities and prospects of development: collection of scientific articles*. St. Petersburg: Institute of Business and Law, no 5, pp. 191–196 (in Russian).

29. Rodionov D.G., Konnikov E.A., Mugutdinov R.M. (2020) System analysis of the competitiveness of a digital enterprise within the information environment. *Economic Sciences*, no 193, pp. 394–401 (in Russian). DOI: 10.14451/1.193.394.

30. Sazonov A.E., Osipov G.S. (2017) Linguistic assessment of the perfection level of safety management system of shipping companies. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova*, vol. 9, no 1, pp. 7–16 (in Russian). DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-7-16.

31. Sakharova L.V., Akperov G.I. (2020) Fuzzy-multiple method of complex assessment of the state of socio-economic systems of the region. *Intellektual'nyye resursy – regional'nomu razvitiyu*, no 2, pp. 137–143 (in Russian).

32. Somov V.L., Tolmachov M.N. (2017) Methods for determining the weighting coefficients of dynamic integral indicators. *Questions of Statistics*. Moscow: Statistics of Russia, no 6, pp. 74–79 (in Russian).

33. Tolstykh T.O., Gamidullayeva L.A., Shmeleva N.V. (2020) Methodological aspects of project portfolio formation in the innovation ecosystem. *Models, Systems, Networks in Economics, Technology, Nature and Society*, no 1 (33), pp. 5–23 (in Russian). DOI: 10.21685/2227-8486-2020-1-1.

34. Tyutyukina E.B., Kapranova L.D., Sedash T.N. (2014) Identification of priority areas and investment support for the development of the Russian economy. *Economic Analysis: Theory and Practice*, Moscow, no 38 (389), pp. 2–11 (in Russian).

35. Yashin S.N., Borisov S.A. (2020) Methodological approaches to determining the rating of economic and innovative development of industrial enterprises in the region. *Voprosy innovatsionnoy ekonomiki*, vol. 10, no 2, pp. 819–836 (in Russian). DOI: 10.18334/vinec.10.2.100921.

About the author

Anatoliy V. Sigal

Doct. Sci. (Econ.), Professor;

Professor, Department of Business Informatics and Mathematical Modeling, V.I. Vernadsky Crimean Federal University, 4, Prospekt Vernadskogo, Simferopol 295007, Russia;

E-mail: ksavo3@cfuv.ru

ORCID: 0000-0003-2090-4464

DOI: 10.17323/2587-814X.2021.4.61.75

Моделирование связей между институциональной и фактической глобализацией в странах мира

Е.Д. Копнова
E-mail: ekopnova@hse.ru

Л.А. Родионова
E-mail: lrodionova@hse.ru

Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»
Адрес: 101000, г. Москва, ул. Мясницкая, д. 20

Аннотация

Работа посвящена моделированию связей институционального и фактического уровня глобализации в странах мира. Рассматриваются векторные модели коррекции ошибками, квантильная регрессия, а также модель стохастической границы. В качестве меры глобализации и ее составляющих используется система KOF-индекса глобализации, позволяющая анализировать отдельные глобализационные процессы в экономике, социальной сфере и политике. По данным 2020 года определены динамические соотношения между фактическими и институциональными составляющими глобализации, выявлена приоритетность институциональной составляющей для информационной и финансовой глобализации. На примере финансовой глобализации показана неравномерность степени влияния институциональной составляющей на фактическую глобализацию в странах мира, в частности, его превалирующее значение для менее глобализованных стран, указывающее на выравнивание степени интернационализации в мировой финансовой системе. Проанализирована степень эффективности воздействия институциональных мер вместе с общим уровнем благосостояния на фактическую финансовую глобализацию. Показано, что разброс по странам мира в показателе эффективности составляет почти 70%. Почти 10% стран имеют низкую эффективность до 50%. Треть стран имеют среднюю эффективность (50–75%), доля стран с высокой эффективностью свыше 75% составляет около 60%.

Ключевые слова: KOF-индекс глобализации; коинтеграция; векторная модель коррекции ошибками; декомпозиция дисперсии ошибки прогноза; квантильная регрессия; модель стохастической границы.

Цитирование: Копнова Е.Д., Родионова Л.А. Моделирование связей между институциональной и фактической глобализацией в странах мира // Бизнес-информатика. 2021. Т. 15. № 4. С. 61–75. DOI: 10.17323/2587-814X.2021.4.61.75

Введение

Глобализация является важнейшим фактором общественного прогресса. Она определяется усилением экономических, социальных и политических взаимодействий стран и народов вне зависимости от национальных границ [1]. По некоторым данным глобализация способна почти на треть обусловить прирост мирового ВВП на душу населения [2]. Экономическая глобализация характеризуется интеграцией торговых и инвестиционных потоков, сближением рынков и развитием межнациональных корпораций. Социальная глобализация выражается в развитии коммуникативных технологий, международных культурных центров, персональных контактов. Политическая глобализация проявляется в деятельности организаций, которые в соответствии с принципами международного права позволяют объединить силы стран мира в борьбе с глобальными проблемами. К положительным эффектам глобализации относят оптимизацию производства за счет межстранового разделения труда и доступа к инновациям [3], диверсификацию финансовых рисков с привлечением иностранных инвестиций [4], повышение уровня развития человеческого капитала вследствие развития информационных технологий и международной системы образования [5]. Главной проблемой глобализации исследователи обычно называют увеличение неравенства в доходах населения [6]. Среди негативных эффектов выделяют также риски экономической безопасности [7], нарушение прав человека [8], потерю этнической идентичности [9].

Для измерения глобализации используют системы индексов, отражающие ее структуру [10]. Наиболее популярной из них является система KOF-индекса глобализации Швейцарского экономического института[1]. Появление в 2018 году последней редакции методологии его расчета с кардинальным расширением структуры и информационной базы существенно расширило возможности исследования проблем глобализации [11]. Кроме интегрального показателя в системе этого индекса содержатся субиндексы экономической, социальной и политической глобализации, которые в свою очередь разделены на отдельные составляющие. Экономический субиндекс включает субиндексы торговой и финансовой глобализации, социальный субиндекс – персональной, информационной, культурной глобализации. Каждый из этих показателей разделен еще на категории де-факто и де-юре. Показатели де-факто измеряют фактические потоки между странами (например, величину импорта), в то время как де-юре – их институциональные возможности (например, налоги на импорт). Каждый показатель формируется по данным мировой официальной статистики с 1970-го года, публикуется с запаздыванием на два года, измеряется по 100-балльной шкале. Всего используется 42 переменные, для расчета применяется метод главных компонент, а также метод панельной нормализации[2].

Большинство работ по исследованию глобализации посвящено анализу ее влияния на благосостояние населения. К наиболее интересным из них относятся работы [12–18], в которых используется эконометрический инструментарий анализа данных. Однако следует отметить, что данные исследования ограничены отсутствием результатов исследования структуры самого глобализационного процесса, связи между его отдельными компонентами. Указанная реорганизация KOF-индекса глобализации в 2018 году является заметным прогрессом в развитии статистической методологии измерения глобализации и расширяет возможности проведения ее системного анализа. С учетом этой реорганизации авторы поставили цель – проанализировать связи между институциональными и фактическими уровнями глобализации. Были выдвинуты две основные задачи. Первая – исследовать тенденции динамических связей между субиндексами де-юре и де-факто. Вторая – изучить степень влияния институциональной составляющей и эффективность ее применения для формирования фактической составляющей глобализации для стран мира.

1. Методы

1.1. Данные

Глобализация измерялась субиндексами KOF-индекса глобализации де-факто и де-юре. Все показатели рассматривались в период с 1970 по 2018 годы[3]. На *рисунках 1–4* приведены графики анали-

[1] KOF (Konjunkturforschungsstelle) Globalisation Index: https://www.kof.ethz.ch/en/forecasts–and–indicators/indicators/kof–globalisation–index.html

[2] Структура KOF-индекса с указанием весов отдельных показателей приведена в Приложении (*табл. П1*)

[3] https://kof.ethz.ch/en/forecasts-and-indicators/indicators/kof-globalisation-index.html

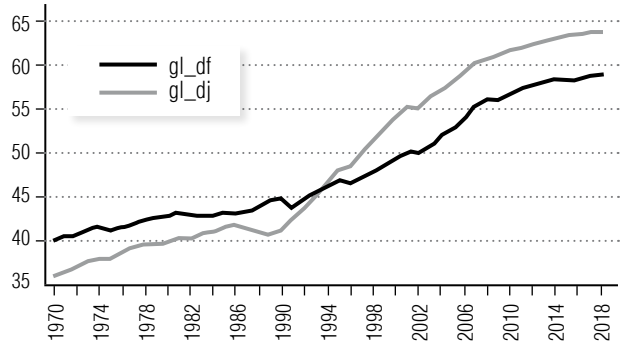

Рис. 1. Субиндексы де–факто и де–юре КОФ–индекса глобализации

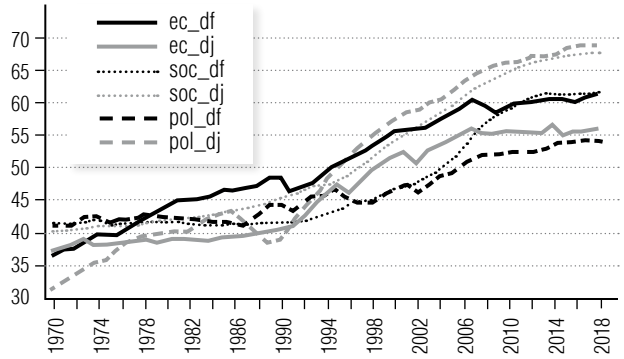

Рис. 2. Субиндексы де–факто и де–юре составляющих КОФ–индекса глобализации

зируемых временных рядов, усредненных по странам мира, для КОФ-индекса глобализации (gl) и его составляющих: экономической (ec), социальной (soc) и политической (pol) глобализации; торговой (tr) и финансовой (fin) глобализации; персональной (per), информационной (inf) и культурной (cul) глобализации. Соответствующие им субиндексы де-факто и де-юре обозначены с добавлением символов _df, _dj.

Из *рисунка 1* видно, что ускорение глобализации в мире началось в 1994 году. При этом, если раньше субиндекс де-факто превосходил де-юре, в настоящее время превалирует субиндекс де-юре. Происходит заметное расхождение тенденций. Де-юре в целом растет быстрее. Из *рисунка 2* видно, что это происходит за счет социального и политического индекса де-юре.

При этом на *рисунке 2* заметно, что политический субиндекс де-факто остается заметно меньше. Среди экономических субиндексов, наоборот, превосходит субиндекс де-факто. Заметна связь составляющих экономической глобализации. Видно, как субиндекс де-факто следует за субиндексом де-юре. Связь субиндексов социальной глобализации тоже видна, но не так заметно. Еще менее заметна связь между составляющими политической глобализации.

Превалирование де-факто в экономическом индексе происходит за счет относительно сильного роста соответствующей составляющей финансовой глобализации. В составе же индекса торговой глобализации в последние годы происходит сближение значений субиндексов де-факто и де-юре.

Из *рисунка 4* видно, что превалирование субиндекса де-юре в показателе социальной глобализации достигается за счет всех составляющих. Однако заметно сильное ускорение для динамики индекса информационной глобализации де-факто в последние годы. При этом видна связь этого индекса с индексом де-юре. Для культурной составляющей глобализации характерно относительное низкое значение субиндекса де-факто.

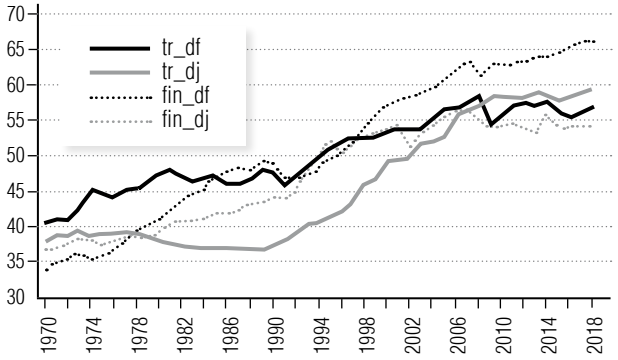

Рис. 3. Субиндексы де–факто и де–юре составляющих экономического субиндекса КОФ–индекса глобализации

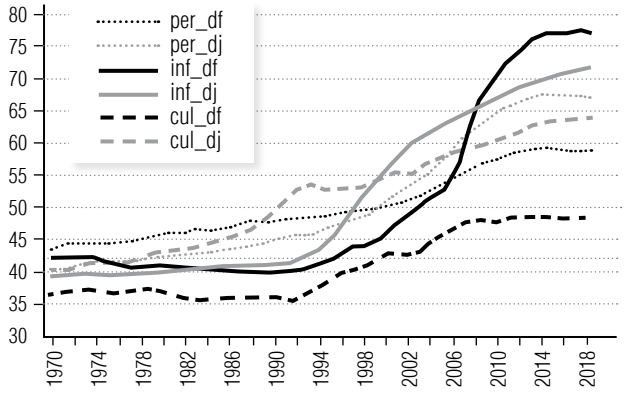

Рис. 4. Субиндексы де–факто и де–юре составляющих социального субиндекса КОФ–индекса глобализации

На *рисунке 5* приведены значения субиндексов де-юре (ось абсцисс) и де-факто (ось ординат) KOФ-индекса глобализации на момент 2018 года для 196 стран мира. Из рисунка видно, что субиндексы сильно коррелируют. Выборочное значение парного коэффициента корреляции составило 0,87.

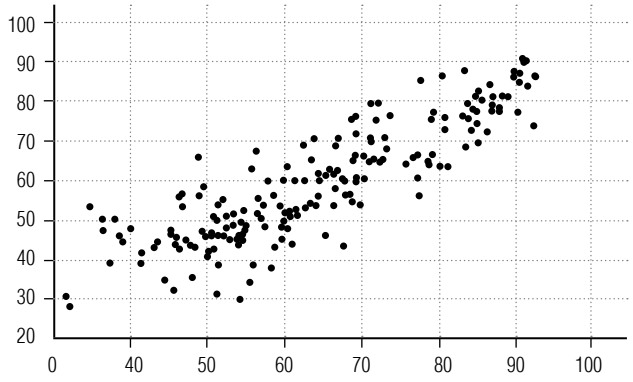

Рис. 5. Субиндексы глобализации 2018 года де–юре и де–факто для стран мира

Дополнительно при анализе пространственной выборки на момент 2018 года использовался индекс дохода, полученный на основе логарифма валового национального дохода (ВНД) на душу населения по паритету покупательной способности (ППС) в ценах 2017 года в долларах США[4] и измеренный в 100-балльной шкале. Показатель рассчитывался как отношение логарифма индекса роста ВНД к логарифму его максимального значения[5]. Минимальное значение ВНД принималось равным 100 долларов, как минимальное фиксируемое в официальной статистике. Максимальное же значение устанавливалось равным 75 000 долларов в соответствии с феноменом неизменности уровня благосостояния для стран с более высоким уровнем ВНД [19]. В Приложении приведен список стран, используемых в анализе, для которых доступны значения индекса. На *рисунке 5* приведены его значения для этих стран на момент 2018 года. Из рисунка видно, что разброс значений достаточно велик и составляет почти 70%, что свидетельствует о высокой дифференциации благосостояния в странах мира.

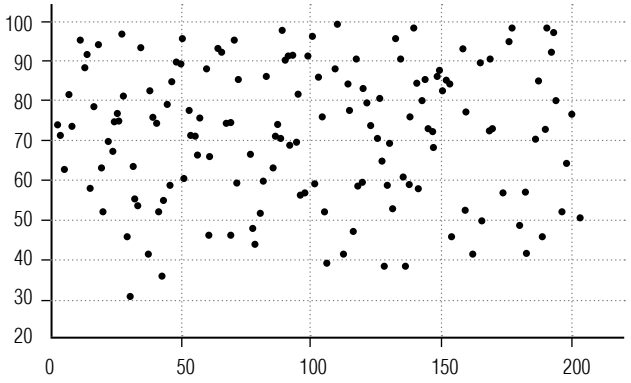

Рис. 6. Индекс дохода в странах мира, 2018 год

1.2. Процедуры

В основу методики исследования динамических связей была положена идея коинтеграционного анализа случайных процессов с применением векторной модели коррекции ошибками (Vector Error Correction Model, VECM) [20]. Было построено девять моделей VECM связи между субиндексами дефакто и де-юре для KOF-индекса глобализации и его составляющих.

Модель в общем виде:

$$\Delta \boldsymbol{X}_t = \boldsymbol{\mu}_t + \boldsymbol{\alpha}\boldsymbol{\beta}'\boldsymbol{X}_{t-1} + \sum_{j=1}^{p} \boldsymbol{\Gamma}_j \boldsymbol{X}_{t-j} + \boldsymbol{U}_t,\ t = 1,2,\ldots,T.$$

$$\Delta \boldsymbol{X}_t = \boldsymbol{X}_t - \boldsymbol{X}_{t-1},\ \boldsymbol{\alpha} = \|\alpha_{ij}\|_{k\times r},\ \boldsymbol{\beta} = \|\beta_{ij}\|_{k\times r},$$
$$\boldsymbol{\Gamma}_j = \|\gamma_{ij}\|_{k\times k},\ k = 2,$$

$$\boldsymbol{U} \sim N\left(\boldsymbol{0}, \boldsymbol{I}_T \otimes \boldsymbol{\Sigma}_u\right), \boldsymbol{U} = \left(U_1,\ldots,U_T\right),$$

$$\boldsymbol{\Sigma}_u = \left\|\sigma_{ij}\right\|_{k\times k},\ \mathrm{cov}\left[U_{it}, U_{js}\right] = \begin{cases}\sigma_{ij}, & t = s\\ 0, & t \neq s\end{cases},$$

где компонентами вектора $\boldsymbol{X}_t$ являются процессы, анализируемые в работе; вектор $\boldsymbol{\mu}_t$ содержит для каждого из этих процессов детерминированные составляющие: тренд и константу; $\boldsymbol{U}_t$ – вектор ошибок; r – ранг коинтеграции.

Для каждого временного ряда применялись тесты на наличие единичного корня характеристического уравнения соответствующего процесса в соответствии с алгоритмом процедуры Доладо [21]. Использовались тесты ADF (Augmented Dickey–Fuller) и KPSS (Kwiatkowski–Schmidt–Shin) [20]. Для оценки параметров коинтеграционного соотношения и мо-

[4] https://data.worldbank.org/indicator/NY.GNP.PCAP.PP.KD?view=chart

[5] Индекс дохода = $\ln(\text{ВНД}/\text{ВНД}_{min}) / \ln(\text{ВНД}_{max}/\text{ВНД}_{min}) \times 100$

дели коррекции ошибками применялся подход Йохансена [22]. Оптимальная спецификация моделей подбиралась на основе байесовского информационного критерия (Bayesian Information Criterion, BIC) и соответствия модели ее предположениям. Остатки моделей тестировались на отсутствие автокорреляции и соответствие нормальному закону распределения (многомерные аналоги LM-теста Breush–Godfrey и Jarque–Bera). Для остатков модели VEC применялась ортогонализация Дурника–Хансена [23].

Характеристика долгосрочных динамических связей для коинтегрированных процессов определялась с использованием тестирования переменных на слабую экзогенность относительно параметров модели коррекции ошибками. Для этого анализировалась статистическая значимость оценок компонент корректирующей матрицы $\boldsymbol{\alpha}$, поскольку незначимость оценки α_{ij} означает, что при отклонении процессов от долгосрочного равновесия соответствующая *i*-ая переменная не корректируется. Для выводов о строгой экзогенности использовался подход Тода–Ямамото [24] с выбором числа лагов в тестовой модели по критерию BIC. Степень воздействия анализируемых процессов на каждый отдельный процесс измерялась с использованием декомпозиции дисперсии его ошибки прогноза, в котором в рекурсивном порядке причинности по Вольду (Wold-causality) данный выбранный процесс занимал последнюю позицию [25]. В качестве меры воздействия для каждого отдельного процесса рассматривалось соответствующая ему доля оценки дисперсии ошибки прогноза, максимальная за 10 лет.

Для анализа степени влияния институциональных факторов глобализации на фактическую глобализацию использовались регрессионые модели, оцениваемые по прологарифмированным данным субиндексов де-факто и де-юре для 2018 года, усредненным по странам мира. С учетом гетероскедастичности ошибок обычной регрессии

$$E\left[Y_i \middle| \boldsymbol{X}_i\right] = \boldsymbol{X}_i \boldsymbol{\beta}\left(i = 1,2,\ldots,n\right)$$

применялась квантильная регрессия [26] для квантилей, соответствующих вероятностям 0,25, 0,5 и 0,75:

$$q_\tau\left[Y_i \middle| \boldsymbol{X}_i\right] = \boldsymbol{X}_i \boldsymbol{\beta}_\tau,\ P\left\{Y_i \le q_\tau\right\} = \tau.$$

Для анализа неоднородности влияния факторов формирования фактической финансовой глобализации в мире оценивалась модель стохастической границы (Stochastic Frontier Model, SFM) [27]:

$$Y_i = \boldsymbol{X}_i \boldsymbol{\beta} + V_i - U_i\ , U_i \sim iidN^+\left(0, \sigma_u^2\right),$$
$$U_i \ge 0, \operatorname{cov}\left[U_i, \boldsymbol{X}_i\right] = 0, \operatorname{cov}\left[U_i, V_i\right] = 0.$$

Дополнительно в качестве регрессора учитывался логарифм индекса дохода. Для обоснования применения модели тестировались остатки обычной регрессии на статистическую значимость коэффициента асимметрии, проверялся его знак. Также проверялась гипотеза об неэффективном влиянии факторов $H_0 : \sigma_u^2 = 0$. Интерпретировалась оценка распределения показателя эффективности (*Ef*) рассматриваемых факторов для стран мира:

$$Ef_i = \left(\frac{1 - \Phi\left(\sigma_* - \mu_{*i} / \sigma_*\right)}{1 - \Phi\left(-\mu_{*i} / \sigma_*\right)}\right) \exp\left(-\mu_{*i} + \frac{1}{2}\sigma_*^2\right),$$

$$\mu_{*i} = \frac{-s\varepsilon_i \sigma_u^2}{\sigma^2}, \sigma_* = \frac{\sigma_u \sigma_v}{\sigma}, \sigma = \sqrt{\sigma_u^2 + \sigma_v^2}\ ,$$

$$\Phi\left(x\right) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{x} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx.$$

Распределение эффективности сопоставлялось с ранжированием индекса де-факто.

2. Результаты

2.1. Анализ динамических связей между субиндексами де-юре и де-факто

По результатам тестирования процессов на стационарность (*табл. 1*) с вероятностью 0,95 можно утверждать, что все рассматриваемые ряды являются реализациями случайных процессов, стационарных в первых разностях.

В *таблице 2* приведены результаты тестирования субиндексов де-факто и де-юре на коинтеграцию. Видно, что гипотеза об отсутствии коинтеграции отвергается на уровне значимости 0,05 для большинства субиндексов с определением для них одного коинтеграционного соотношения. Наличие долгосрочной связи не проявляется для глобального индекса и субиндексов культурной и политической глобализации.

Результаты проверки качества оцениваемых VEC-моделей показали их достаточно высокую валидность и позволили использовать их для анализа и интерпретации. В частности, гипотеза об отсутствии автокорреляции остатков до третьего порядка включительно не отвергалась на уровне значимости 0,05 для всех моделей. В *таблице 3* приведены результаты тестирования коинтегрируемых субиндексов на слабую экзогенность. Статистически незначимые на

Таблица 1.

Результаты анализа процессов на стационарность

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
		gl_df	gl_dj	ec_df	ec_dj	soc_df	soc_dj	pol_df	pol_dj	tr_df	tr_dj	fi_df	fi_dj	in_df	in_dj	per_df	per_dj	cul_df	cul_dj
Y	ADF	0,99	0,42	0,58	0,99	0,52	0,36	0,62	0,46	0,32	0,19	0,99	0,999	0,53	0,10	0,42	0,03	0,62	0,09
	KPSS	0,21	0,16	0,08	0,13	0,22	0,21	0,21	0,12	0,09	0,19	0,06	0,149	0,22	0,20	0,19	0,21	0,19	0,08
dY	ADF	0,00	0,03	0,00	0,00	0,06	0,25	0,00	0,01	0,00	0,15	0,00	0,000	0,06	0,22	0,01	0,32	0,00	0,00
	KPSS	0,34	0,17	0,17	0,20	0,40	0,40	0,25	0,09	0,16	0,29	0,09	0,214	0,44	0,34	0,17	0,30	0,27	0,11

Примечания.

1. Для всех рядов обозначено: Y – исходный ряд, dY – первая разность.
2. Для ADF–теста приводятся односторонние P–значения МакКиннона (MacKinnon).
3. Для KPSS–теста – тестовые статистики, сравниваемые с критическими значениями на уровне значимости 0,05: 0,146 – для исходного ряда (с учетом тренда) и 0,463 – для первой разности (с учетом константы).

Таблица 2.

Результаты анализа процессов на коинтеграцию*

Тест	Ранг	gl	ec	soc	pol	tr	fin	in	per	cul
Trace	0	0,54	0,04	0,02	0,44	0,06	0,01	0,03	0,06	0,13
	1	0,76	0,07	0,22	0,98	0,71	0,92	0,62	0,69	0,44
Max–eigenvalue	0	0,76	0,11	0,02	0,36	0,04	0,01	0,02	0,03	0,14
	1	0,43	0,07	0,22	0,98	0,71	0,92	0,62	0,69	0,44

* P–значения МакКиннона–Хауга–Михаэлиса (MacKinnon–Haug–Michelis) с минимальным значением BIC.

Таблица 3.

Результаты анализа субиндексов на слабую экзогенность*

	ec	soc	tr	fin	inf	per
df	–2,92	–2,04	–2,98	–4,22	–3,94	–2,37
dj	–2,05	–3,90	2,80	–1,57	1,01	–4,83

* Приводится значение T–статистики для оценки коэффициента при остатке коинтеграционного соотношения в ECM (Error correction model) для субиндексов де–факто (df) и де–юре (dj).

уровне 0,05 оценки для в краткосрочном соотношении для субиндексов де-юре финансовой и информационной глобализации свидетельствуют о слабой экзогенности этих величин относительно параметров VEC-моделей.

В *таблицах 4* и *5* приводятся результаты анализа краткосрочной связи между субиндексами де-факто и де-юре. Из *таблицы 4* видно, что такая связь, как и долгосрочная, практически не проявляется для политического и культурного субиндексов. Для экономического субиндекса характерно влияние субиндекса де-юре на де-факто. Особенно заметно это для финансового субиндекса. Для торговой глобализации немного превалирует влияние де-факто на де-юре. Для субиндекса социальной глобализации проявляется относительно слабое взаимное влияние субиндексов де-факто и де-юре. Однако для индексов персональной и информационной глобализации заметно приоритетное влияние де-юре на де-факто.

Данные *таблицы 5* подтверждают факты отсутствия краткосрочной связи субиндексов де-факто и де-юре для политической и культурной глобализации. Как для экономической, так и для социальной глобализации проявляется определяющая роль субиндекса де-юре. Для финансовой и информационной глобализации этот показатель является сильно экзогенной переменной относительно параметров модели VEC.

Таблица 4.

Оценки декомпозиции дисперсии ошибки прогноза в VAR/VEC-моделях, %*

Эндогенная	d(gl)	ec	soc	d(pol)	tr	fin	inf	per	d(cu)
df	14,98	55,81	27,76	2,15	24,18	54,50	44,00	62,01	10,23
dj	4,24	15,12	29,76	2,58	29,87	6,83	15,75	27,85	3,85

* Приводится максимальное значение на 10–летнем периоде. Для каждого из субиндексов де–факто (df) и де–юре (dj) в соответствии с порядком Холецкого (Cholesky Ordering) показана доля вариации, обусловленная изменением альтернативной переменной df и dj.

Таблица 5.

Результаты анализа процессов на причинность по Грейнджеру*

Эндогенная	gl	ec	soc	pol	tr	fin	inf	per	cul
df	0,00	0,01	0,00	0,45	0,00	0,03	0,00	0,01	0,99
dj	0,00	0,45	0,44	0,50	0,00	0,87	0,95	0,06	0,61

* Приводится P–значение χ^2–статистики для проверки гипотезы о том, что каждый из субиндексов де–факто и де–юре не является причиной по Грейнджеру для альтернативного субиндекса де–юре и де–факто.

2.2. Анализ степени и неоднородности влияния институциональных факторов на фактическую глобализацию

Далее на примере субиндекса финансовой глобализации продемонстрированы результаты анализа степени влияния индекса де-юре на де-факто для KOF-индекса глобализации 2018 года с привлечением индекса дохода. С учетом пропусков в данных в моделях использовалось 145 наблюдений. Данные использовались в логарифмах. Проблема мультиколлинеарности отсутствовала, поскольку коэффициент корреляции между регрессорами оказался статистически незначимым и равным 0,03. В *таблице 6* приведены некоторые результаты оценивания обычной регрессионной модели, квантильной регрессии с квантилями, соответствующими вероятностям 0,25, 0,5, 0,75, и модели стохастической границы.

Применение квантильной регрессии было обусловлено высокой гетероскедастичностью остатков обычной регрессии – P-значение χ^2-статистики теста Бреуша–Пагана (Breusch, Pagan) было равно 0.000. Это заметно и на *рисунке 5.* Видно, что есть страны с низким де-юре и высоким де-факто субиндексом, но с высоким де-юре высокий де-факто определяется практически однозначно.

Таблица 6.

Результаты оценивания регрессионных моделей*

	Обычная регрессия	Квантильная регрессия			Модель стохастической границы
		0.25	0.5	0.75	
dj	0,29***	0,51***	0,27***	0,16**	0,15**
gni	0,44***	0,61***	0,39***	0,41***	0,37***
const	1,10***	–0,62	1,03**	1,94***	2,27***
Prob F/χ^2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
R^2/Pseudo R^2	0,38	0,28	0,24	0,23	–
BIC	35,58	–	–	–	27,48

*Статистическая значимость оценок коэффициентов на уровне 0,01 помечена ***, 0,05 – **, 0,1 – *.

Из *таблицы 6* видно, что все модели описывают прямое статистически значимое влияние институциональных факторов вместе с показателем благосостояния на фактическую глобализацию в финансовой сфере. По оценкам обычной регрессии почти на треть процента в среднем изменяется значение индекса де-факто при изменении индекса де-юре на 1 процент. Сравнение оценок при показателе dj и их графическая иллюстрация на *рисунке 7* показывает, что для стран с более высоким уровнем глобализации это влияние слабее, чем для стран с низким уровнем.

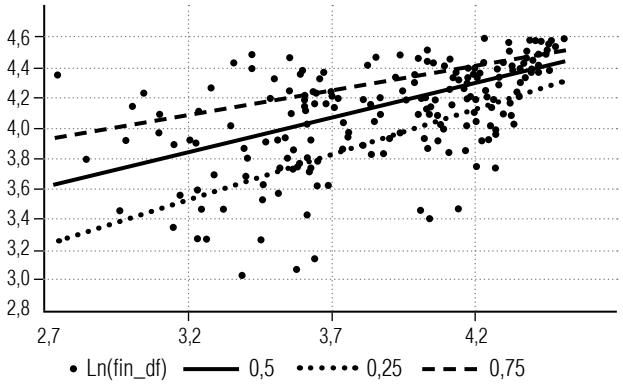

Рис. 7. Исходные и модельные значения логарифма индекса де–факто финансовой глобализации для квантильной регрессии, без учета индекса дохода

Применению модели стохастической границы способствовало статистически значимое (на уровне 0,001), достаточно высокое по модулю отрицательное значение коэффициента асимметрии остатков (–0,788). Относительно низкое значение BIC по сравнению с его значением для обычной регрессии также свидетельствует в пользу применения этой модели. Гипотеза об отсутствии неэффективности факторов отвергалась на уровне значимости 0,05.

На *рисунках 8* и *9* приведены результаты расчета эффективности факторов формирования фактической глобализации в финансовой сфере для 145 стран.

3. Дискуссия

Результаты расчетов показали, что между процессами глобализации в институциональной сфере и ее фактическом проявлении существует как долгосрочная, так и краткосрочная динамическая связь. И хотя она не проявляется на глобальном уровне, для общего KOF-индекса глобализации – возможно, в силу его составной структуры – для большинства его составляющих, она явно прослеживается. Особая роль институциональных факторов для процесса глобализации проявилась для финансовой сферы и сферы информационных технологий. Оказалось, что их формирование в этих сферах происходит относительно самостоятельно, без значимой опоры на результаты проявления в них глобализации де-факто, и они являются определяющей основой для фактической интернационализации.

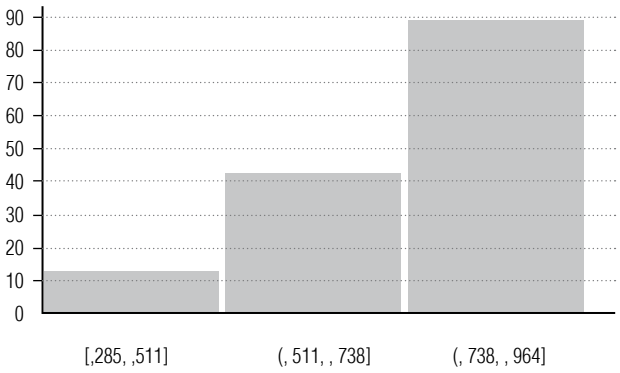

Рис. 8. Распределение эффективности факторов формирования фактической глобализации в финансовой сфере

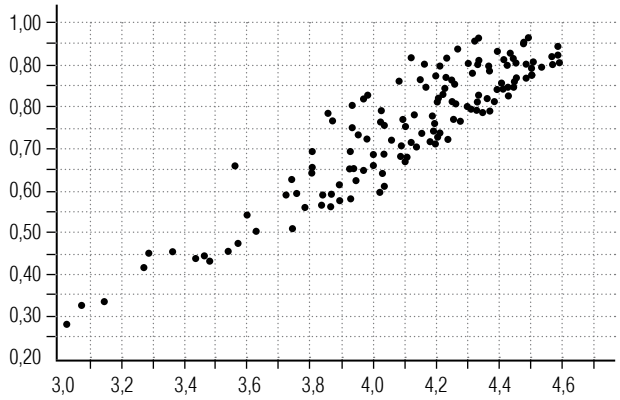

Рис. 9. Связь показателя эффективности факторов формирования фактической глобализации с субиндексом де–факто финансовой глобализации

Анализ динамических связей между факторами де-юре и де-факто выявил неоднозначность взаимовлияния для отдельных составляющих процесса глобализации. Если для экономической глобализации характерно заметное влияние институциональных факторов на глобализацию де-факто, то для социальной глобализации эту явную направленность сменяет их взаимовлияние. Для процесса же политической глобализации связь между факторами де-юре и де-факто не была обнаружена, как в долгосрочной, так и в краткосрочной перспективе.

Анализ пространственной выборки по данным KOF-индекса финансовой глобализации на момент 2018 года указал на то, что в странах с более низким проявлением фактической глобализации роль институциональных факторов в формировании уровня глобализации оказывается выше, чем в более глобализованных странах. Возможно, это свидетельствует о тенденции к выравниванию уровня финансовой глобализации в странах мира.

По результатам расчета эффективности факторов формирования фактической глобализации в финансовой сфере из *рисунка 8* видна высокая неоднородность стран по этому показателю: разброс значений происходит от 0,285 до 0,964. Почти 10% (8,28%) стран имеют низкую эффективность до 50%. К ним относятся такие страны, как Иран, Бангладеш, Эфиопия. Из *рисунка 7* видно, что это страны с низким уровнем фактической финансовой глобализации – заметно ниже первого квантиля логарифма этого показателя (3,937). Треть стран (30,34%) имеют среднюю эффективность (50–75%), например, Турция, Россия, Бразилия. Это – страны, в основном, со средним уровнем фактической финансовой глобализации, не превосходящим его медиану (4,199). Более 60% (61,38%) стран имеют высокую эффективность. Заметим, что среди стран с высокой эффективностью есть представители из всех групп по уровню индекса де-факто. Полный список стран со значениями эффективности и логарифма соответствующего индекса глобализации приведен в Приложении (*таблица П2*).

Заключение

Применение методики коинтеграционного анализа к данным 2020 года системы КОФ-индекса глобализации позволило определить динамические соотношения между фактическими и институциональными составляющими глобализации. Показано, что институциональные факторы глобализации являются определяющей основой для фактической интернационализации финансовой сферы и сферы информационных технологий.

Моделирование связи между субиндексами глобализации де-факто и де-юре выявило существенную неоднородность влияния для стран мира. На примере финансовой глобализации показано различие в степени влияния институциональной составляющей на фактическую глобализацию, в частности, его превалирующее значение для менее глобализованных стран с уровнем финансовой глобализации меньшим первого квартиля.

Применение модели стохастической границы к данным финансовой глобализации позволило проанализировать степень эффективности воздействия институциональных мер вместе с общим уровнем благосостояния на фактическую глобализацию в финансовой сфере. Показано, что уровень эффективности варьируется в диапазоне от 28 до 96 процентов. Почти 10% стран имеют низкую эффективность до 50%. Треть стран имеют среднюю эффективность (50–75%), так что доля стран с высокой эффективностью свыше 75% составляет около 60%. ■

Литература

1. Akhter S.H. Is globalization what it's cracked up to be? Economic freedom, corruption, and human development // Journal of World Business. 2004. Vol. 39. No 3. P. 283–295. DOI: 10.1016/j.jwb.2004.04.007.
2. Weiß J., Sachs A., Weinelt H. Globalization report 2018: Who benefits most from globalization. Bertelsmann Stiftung. 2018. [Электронный ресурс]: https://ged-project.de/globalization/globalization-report-2018-who-benefits-most-from-globalization/ (дата обращения 01.07.2021).
3. Tsai C. Does globalization affect human well-being? // Social Indicators Research. 2007. No 81. P. 103–126. DOI: 10.1007/s11205-006-0017-8.
4. Ghosh A. How does banking sector globalization affect economic growth? // International Review of Economics & Finance. 2017. No 48. P 83–97. DOI: 10.1016/j.iref.2016.11.011.
5. Digital globalization: The new era of global flows: Report / J. Manyika [et al.] / McKinsey Global Institute, 2016. [Электронный ресурс]: https://www.mckinsey.com/business-functions/digital-mckinsey/our-insights/digital-globalization-the-new-era-of-global-flows (дата обращения 01.07.2021).
6. Bergh A., Nilsson T. Do liberalization and globalization increase income inequality? // European Journal of Political Economy. 2010. Vol. 26. No 4. P. 488–505. DOI: 10.1016/j.ejpoleco.2010.03.002.
7. Крылова И.А. Россия в условиях глобализации: новые угрозы // Философские науки. 2016. № 4. С. 30–44.
8. Dreher A., Gassebner M., Siemers L. Globalization, economic freedom, and human rights // Journal of Conflict Resolution. 2012. No 56. P. 516–546. DOI: 10.2139/ssrn.1695446.
9. Яницкий О.Н. Вызовы и риски глобализации. Семь тезисов // Социологические исследования. 2019. № 1. С. 29–39. DOI: 10.31857/S013216250003745-2.
10. Черкашина Т.Ю. Индексы глобализации: индикаторы и логика построения // Социология: методология, методы и математическое моделирование. 2011. № 33. С. 136–165.

11. Gygli S., Haelg F., Potrafke N. The KOF globalisation index – revisited // Review of International Organizations. 2019. No 14. P. 543–574. DOI: 10.1007/s11558-019-09344-2.
12. Rajan R.G., Zingales L. The great reversals: The politics of financial development in the twentieth century // Journal of Financial Economics. 2003. Vol. 69. No 1. P. 5–50. DOI: 10.1016/S0304-405X(03)00125-9.
13. Baltagi B.H., Demetriades P.O., Law S.H. Financial development and openness: Evidence from panel data // Journal of Development Economics. 2009. Vol. 89. No 2. P. 285–296. DOI:10.2139/ssrn.1808903.
14. Tovar-García E. Financial globalization and financial development in transition countries // Economía: Teoría y Práctica. 2012. No 36. P. 155–178. DOI: 10.24275/ETYPUAM/NE/362012/Tovar.
15. Atif S.M., Srivastav M., Sauytbekova M., Arachchige U.K. Globalization and income inequality: A panel data analysis of 68 countries. EconStor Preprints 65664. ZBW – Leibniz Information Centre for Economics. 2012. [Электронный ресурс]: http://hdl.handle.net/10419/65664 (дата обращения 01.07.2021).
16. Law S.H., Azman-Saini W.N.W., Tan H.B. Economic globalization and financial development in east Asia: A panel cointegration and causality analysis // Emerging Markets Finance and Trade. 2014. Vol. 50. No 1. P. 210–225. DOI: 10.2753/REE1540-496X500112.
17. Le T.H., Kim J., Lee M. Institutional quality, trade openness, and financial sector development in Asia: An empirical investigation // Emerging Markets Finance and Trade. 2016. Vol. 52. No 5. P. 1047–1059. DOI: 10.1080/1540496X.2015.1103138.
18. Muye I.M., Muye I.Y. Testing for causality among globalization, institution and financial development: Further evidence from three economic blocs // Borsa Istanbul Review. 2017. Vol. 17. No 2. P. 117–132. DOI: 10.1016/j.bir.2016.10.001.
19. Kahneman D., Deaton A. High income improves evaluation of life but not emotional well-being // Proceedings of National Academy of Sciences. 2014. Vol. 107. No 38. P. 16489–16493. DOI: 10.1073/pnas.1011492107.
20. Mills T.C. The econometric modeling of financial time series. Cambridge. New York, 2008. DOI: 10.2307/2329254.
21. Dolado H., Jenkinson T., Sosvilla-Rivero S. Cointegration and unit roots // Journal of Economic Surveys. 1990. No 4. P. 243–273.
22. Johansen S. Statistical analysis of cointegration vectors // Journal of Economic Dynamics and Control. 1988. Vol. 12. No 2–3. P. 231–254.
23. Doornik J.A., Hansen H. An omnibus test for univariate and multivariate normality // Oxford Bulletin of Economics and Statistics. 2008. No 70. P. 927–939. DOI: 10.1111/j.1468-0084.2008.00537.x.
24. Toda H.Y., Yamamoto T. Statistical inferences in vector autoregression with possible integrated processes // Journal of Econometrics. 1995. No 66. P. 225–250.
25. Lütkepohl H. New introduction to multiple time series analysis. New York: Springer-Verlag. 2007. DOI: 10.1017/S0266466606000442.
26. Koenker R., Hallock K.F. Quantile regression // Journal of Economic Perspectives. 2001. Vol. 15. No 4. P. 143–156. DOI: 10.1257/jep.15.4.143.
27. Kumbhakar S., Parmeter C., Zelenyuk V. Stochastic frontier analysis: Foundations and advances. Working Papers 2017-10. University of Miami, Department of Economics, 2017. DOI: 10.1017/CBO9781139174411.

Приложения

Таблица П1.

Структура KOF-индекса глобализации

Индекс	Вес	Индекс	Вес
1. Экономическая глобализация			33,3
1.1. Торговая глобализация			50,0
Де-факто	50,0	*Де-юре*	50,0
Торговля товарами	38,8	Барьеры на импорт	26,8
Торговля услугами	44,7	Средний уровень тарифов	25,6
Разнообразие торговых партнеров	16,5	Налоги на торговлю	24,4
		Торговые соглашения	23,2
1.2. Финансовая глобализация			50.0
Де-факто	50,0	*Де-юре*	50,0
Иностранные прямые инвестиции	26,7	Барьеры на инвестиции	33,3
Портфельные инвестиции	16,5	Открытость счета капитала	38,5
Международный долг	27,6	Инвестиционные соглашения	28,2
Международные резервы	2,1		
Международные выплаты дохода	27,1		

Индекс	Вес	Индекс	Вес
2. Социальная глобализация			33.3
2.1. Персональная глобализация			33.3
Де-факто	50,0	*Де-юре*	50,0
Телефонный трафик	20,8	Доступ к телефонной связи	39,9
Переводы средств	21,9	Свобода визитов	32,7
Международный туризм	21,0	Число аэропортов	27,4
Миграция	17,2		
Международное образование	19,1		
2.2. Информационная глобализация			33.3
Де-факто	50,0	*Де-юре*	50,0
Использование Интернета	37,2	Доступ к телевидению	36,8
Экспорт высоких технологий	34,5	Доступ к Интернету	42,6
Международные патенты	28,3	Свобода прессы	20,6
2.3. Культурная глобализация			33,3
Де-факто	50,0	*Де-юре*	50,0
Торговля товарами культуры	28,1	Гендерное равенство	24,7
Обмен услугами	24,6	Человеческий капитал	41,4
Международные торговые марки	9,7	Гражданские свободы	33,9
Количество Макдональдсов	21,6		
Количество магазинов ИКЕА	16,0		
3. Политическая глобализация			33,3
Де-факто	50,0	*Де-юре*	50,0
Посольства в стране	36,5	Членство в организациях	36,2
Участие в миссиях ООН	25,7	Международные договора	33,4
Общественные организации	37,8	Разнообразие партнеров	30,4

Таблица П2.

Эффективность формирования финансовой глобализации в странах мира и логарифм соответствующего субиндекса глобализации де-факто*

№	страна	ef	ln_d	№	страна	ef	ln_d
1	Iran, Islamic Republic	0,28	3,030	7	Haiti	0,44	3,461
2	Comoros	0,33	3,075	8	Chad	0,45	3,284
3	Bangladesh	0,33	3,147	9	Nepal	0,45	3,363
4	Ethiopia	0,42	3,271	10	Algeria	0,46	3,532
5	Kenya	0,43	3,479	11	Iraq	0,47	3,573
6	Pakistan	0,44	3,437	12	India	0,5	3,624

№	страна	ef	ln_d	№	страна	ef	ln_d
13	Guatemala	0,51	3,744	51	Gambia	0,72	3,976
14	Myanmar	0,54	3,600	52	Israel	0,72	4,237
15	Sri Lanka	0,56	3,783	53	Saudi Arabia	0,73	4,206
16	Paraguay	0,56	3,866	54	Zimbabwe	0,73	3,948
17	China	0,56	3,835	55	Albania	0,74	4,152
18	Turkey	0,58	3,896	56	Uruguay	0,74	4,216
19	Dominican Republic	0,58	3,930	57	Oman	0,74	4,211
20	Bolivia	0,59	3,839	58	Bulgaria	0,74	4,200
21	Cameroon	0,59	3,722	59	Guinea	0,75	3,934
22	Gabon	0,59	3,866	60	Cote d'Ivoire	0,75	4,035
23	Rwanda	0,59	3,754	61	Bosnia and Herzegovina	0,76	4,102
24	Korea, Rep	0,59	4,020	62	North Macedonia	0,76	4,198
25	Romania	0,61	4,033	63	Ghana	0,76	4,027
26	Ecuador	0,61	3,896	64	Lithuania	0,77	4,282
27	Indonesia	0,62	3,943	65	Sierra Leone	0,77	3,871
28	Tanzania	0,63	3,738	66	Kyrgyz Republic	0,77	4,095
29	Botswana	0,64	4,027	67	Croatia	0,77	4,255
30	Egypt, Arab Republic	0,65	3,971	68	Colombia	0,78	4,189
31	Bhutan	0,65	3,806	69	Tunisia	0,78	4,130
32	Morocco	0,65	3,933	70	Congo, Dem, Republic	0,78	3,859
33	Nigeria	0,65	3,924	71	Mauritania	0,79	4,027
34	Brazil	0,65	3,938	72	Japan	0,79	4,343
35	Benin	0,65	3,806	73	United States	0,79	**4,371**
36	Burundi	0,66	3,559	74	New Zealand	0,79	4,330
37	Philippines	0,66	4,003	75	Chile	0,79	4,310
38	Mexico	0,67	4,104	76	Greece	0,8	4,303
39	Argentina	0,68	4,108	77	Madagascar	0,8	**3,937**
40	Peru	0,68	4,089	78	Serbia	0,8	4,261
41	Sudan	0,69	3,999	79	Armenia	0,81	4,256
42	El Salvador	0,69	4,031	80	Jordan	0,81	4,250
43	Mali	0,69	3,807	81	Czech Republic	0,81	4,381
44	Uganda	0,69	3,926	82	Slovenia	0,81	4,333
45	Russian Federation	0,7	4,139	83	Nicaragua	0,81	4,205
46	Belarus	0,71	4,090	84	Italy	0,82	4,360
47	Maldives	0,71	4,124	85	Niger	0,82	3,971
48	Poland	0,72	4,199	86	Vietnam	0,82	4,205
49	Costa Rica	0,72	4,179	87	Malaysia	0,82	4,336
50	Djibouti	0,72	4,061	88	United Arab Emirates	0,83	4,432

№	страна	ef	ln_d	№	страна	ef	ln_d
89	Solomon Islands	0,83	3,984	117	United Kingdom	0,89	4,533
90	South Africa	0,83	4,220	118	Kazakhstan	0,89	4,369
91	Moldova	0,84	4,224	119	Senegal	0,89	4,493
92	Estonia	0,84	4,416	120	Georgia	0,89	3,274
93	Panama	0,84	4,400	121	Switzerland	0,9	4,493
94	Latvia	0,84	4,397	122	Burkina Faso	0,9	3,274
95	Honduras	0,84	4,164	123	Brunei Darussalam	0,9	4,493
96	Germany	0,85	4,446	124	Belize	0,9	3,274
97	Spain	0,85	4,429	125	Luxembourg	0,9	4,493
98	Hungary	0,85	4,411	126	Netherlands	0,9	3,274
99	Canada	0,86	4,450	127	Kiribati	0,9	4,493
100	Equatorial Guinea	0,86	4,253	128	Kuwait	0,91	3,274
101	Namibia	0,86	4,248	129	Ireland	0,91	4,493
102	Liberia	0,86	4,089	130	Montenegro	0,91	3,274
103	Congo	0,86	4,15	131	Mongolia	0,91	4,493
104	Eswatini	0,87	4,232	132	Cambodia	0,91	3,274
105	Austria	0,87	4,479	133	Lebanon	0,91	4,493
106	Portugal	0,87	4,456	134	Guinea–Bissau	0,91	3,274
107	Vanuatu	0,87	**4,199**	135	Angola	0,92	4,493
108	France	0,87	4,483	136	Cyprus	0,92	3,274
109	Finland	0,87	4,491	137	Malta	0,92	4,493
110	Denmark	0,87	4,499	138	Bahamas	0,92	3,274
111	Cabo Verde	0,88	4,315	139	Ukraine	0,93	4,493
112	Sweden	0,88	4,508	140	Lesotho	0,94	3,274
113	Norway	0,88	4,506	141	Mauritius	0,94	4,493
114	Bahrain	0,89	4,507	142	Marshall Islands	0,95	3,274
115	Belgium	0,89	4,533	143	Togo	0,96	4,493
116	Jamaica	0,89	4,369	144	Mozambique	0,96	3,274
				145	Timor–Leste	0,96	4,493

* Жирным шрифтом помечены квартили индекса де–факто

Об авторах

Копнова Елена Дмитриевна

кандидат технических наук, доцент;

доцент департамента статистики и анализа данных, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», 109028, г. Москва, ул. Покровский бульвар, д. 11;

E-mail: ekopnova@hse.ru

ORCID: 0000-0002-8429-141X

Родионова Лилия Анатольевна
кандидат экономических наук;
доцент департамента статистики и анализа данных, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», 109028, г, Москва, ул. Покровский бульвар, д. 11;
E-mail: lrodionova@hse.ru
ORCID: 0000-0002-0310-6359

Modeling the links between institutional and actual globalization in the countries of the world

Elena D. Kopnova
E-mail: ekopnova@hse.ru

Lilia A. Rodionova
E-mail: lrodionova@hse.ru

National Research University Higher School of Economics
Address: 20, Myasnitskaya Street, Moscow 101000, Russia

Abstract

The paper is devoted to modeling the links between the institutional and actual level of globalization in the countries of the world. Vector models of error correction, quantile regression, and a stochastic frontier model are considered. As a measure of globalization and its components, the KOF-index of globalization system is used, which allows us to analyze individual globalization processes in the economy, social sphere and politics. According to 2020 data, we determine the dynamic relations between the actual and institutional components of globalization, and the priority of the institutional component for informational and financial globalization is revealed. The example of financial globalization shows the uneven degree of influence of the institutional component on the actual globalization, in particular, its prevailing importance for less globalized countries, indicating the alignment of the degree of internationalization in the global financial system. The degree of effectiveness of the impact of institutional measures, together with the overall level of well-being on the actual financial globalization is analyzed. It is shown that the spread across the countries of the world in the efficiency indicator is almost 70%. Almost 10% of countries have a low efficiency of up to 50%. One third of the countries has average efficiency (50–75%). The share of countries with high efficiency over 75% is about 60%.

Key words: KOF index of globalization; cointegration; vector error correction model; forecast errors variance decomposition; quantile regression; stochastic frontier model.

Citation: Kopnova E.D., Rodionova L.A. (2021) Modeling the links between institutional and actual globalization in the countries of the world. *Business Informatics*, vol. 15, no 4, pp. 61–75. DOI: 10.17323/2587-814X.2021.4.61.75

References

1. Akhter S.H. (2004) Is globalization what it's cracked up to be? Economic freedom, corruption, and human development. *Journal of World Business*, vol. 39, no 3, pp. 283–295. DOI: 10.1016/j.jwb.2004.04.007.
2. Weiß J., Sachs A., Weinelt H. (2018) *Globalization report 2018: Who benefits most from globalization*. Bertelsmann Stiftung. Available at: https://ged-project.de/globalization/globalization-report-2018-who-benefits-most-from-globalization/ (accessed 01 July 2021).
3. Tsai C. (2007) Does globalization affect human well-being? *Social Indicators Research*, no 81, pp. 103–126. DOI: 10.1007/s11205-006-0017-8.
4. Ghosh A. (2017) How does banking sector globalization affect economic growth? *International Review of Economics & Finance*, no 48, pp. 83–97. DOI: 10.1016/j.iref.2016.11.011.

5. Manyika J., Lund S., Bughin J., Woetzel J., Stamenov K., Dhingra D. (2016) *Digital globalization: The new era of global flows. Report*. McKinsey Global Institute. Available at: https://www.mckinsey.com/business-functions/digital-mckinsey/our-insights/digital-globalization-the-new-era-of-global-flows (accessed 01 July 2021).
6. Bergh A., Nilsson T. (2010) Do liberalization and globalization increase income inequality? *European Journal of Political Economy*, vol. 26, no 4, pp. 488–505. DOI: 10.1016/j.ejpoleco.2010.03.002.
7. Krylova I.A. (2016) Russia in the context of globalization: New threats. *Russian Journal of Philosophical Sciences*, no 4, pp. 30–44 (in Russian).
8. Dreher A., Gassebner M., Siemers L. (2012) Globalization, economic freedom, and human rights. *Journal of Conflict Resolution*, no 56, pp. 516–546. DOI: 10.2139/ssrn.1695446.
9. Yanitzky O.N. (2019) Challenges and risks of globalization. Seven Theses. *Sociological Studies*, no 1, pp. 29–39 (in Russian). DOI 10.31857/S013216250003745-2.
10. Cherkashina T.Yu. (2011) Indices of globalization: Indicators and the calculation scheme. *Sociology: methodology, methods, mathematical modeling*, no 33, pp. 136–165 (in Russian).
11. Gygli S., Haelg F., Potrafke N. (2019) The KOF globalisation index – revisited. *Review of International Organizations*, no 14, pp. 543–574. DOI: 10.1007/s11558-019-09344-2.
12. Rajan R. G., Zingales L. (2003) The great reversals: The politics of financial development in the twentieth century. *Journal of Financial Economics*, vol. 69, no 1, pp. 5–50. DOI: 10.1016/S0304-405X(03)00125-9.
13. Baltagi B.H., Demetriades P.O., Law S.H. (2009) Financial development and openness: Evidence from panel data. *Journal of Development Economics*, vol. 89, no 2, pp. 285–296. DOI: 10.2139/ssrn.1808903.
14. Tovar-García E. (2012) Financial globalization and financial development in transition countries. *Economía: Teoría y Práctica*, no 36, pp. 155–178. DOI: 10.24275/ETYPUAM/NE/362012/Tovar.
15. Atif S.M., Srivastav M., Sauytbekova M., Arachchige U.K. (2012) Globalization and income inequality: A panel data analysis of 68 countries. *EconStor Preprints*, no 65664. ZBW – Leibniz Information Centre for Economics. Available at: http://hdl.handle.net/10419/65664 (accessed 01 July 2021).
16. Law S.H., Azman-Saini W.N.W., Tan H.B. (2014) Economic globalization and financial development in East Asia: A panel cointegration and causality analysis. *Emerging Markets Finance and Trade*, vol. 50, no 1, pp. 210–225. DOI: 10.2753/REE1540-496X500112.
17. Le T.H., Kim J., Lee M. (2016) Institutional quality, trade openness, and financial sector development in Asia: An empirical investigation. *Emerging Markets Finance and Trade*, vol. 52, no 5, pp. 1047–1059. DOI: 10.1080/1540496X.2015.1103138.
18. Muye I.M., Muye I.Y. (2017) Testing for causality among globalization, institution and financial development: Further evidence from three economic blocs. *Borsa Istanbul Review*, vol. 17, no 2, pp. 117–132. DOI: 10.1016/j.bir.2016.10.001.
19. Kahneman D., Deaton A. (2014) High income improves evaluation of life but not emotional well-being. *Proceedings of National Academy of Sciences*, vol. 107, no 38, pp. 16489–16493. DOI: 10.1073/pnas.1011492107.
20. Mills T.C. (2008) *The econometric modeling of financial time series*. Cambridge. New York. DOI: 10.2307/2329254.
21. Dolado H., Jenkinson T., Sosvilla-Rivero S. (1990) Cointegration and unit roots. *Journal of Economic Surveys*, no 4, pp. 243–273.
22. Johansen S. (1988) Statistical analysis of cointegration vectors. *Journal of Economic Dynamics and Control*, vol. 12, no 2–3, pp. 231–254.
23. Doornik J.A., Hansen H. (2008) An omnibus test for univariate and multivariate normality. *Oxford Bulletin of Economics and Statistics*, no 70, pp. 927–939. DOI: 10.1111/j.1468-0084.2008.00537.x.
24. Toda H.Y., Yamamoto T. (1995) Statistical inferences in vector autoregression with possible integrated processes. *Journal of Econometrics*, no 66, pp. 225–250.
25. Lütkepohl H. (2007) *New introduction to multiple time series analysis*. New York: Springer-Verlag. DOI: 10.1017/S0266466606000442.
26. Koenker R., Hallock K.F. (2021) Quantile regression. *Journal of Economic Perspectives*, vol. 15, no 4, pp. 143–156. DOI: 10.1257/jep.15.4.143.
27. Kumbhakar S., Parmeter C., Zelenyuk V. (2017) *Stochastic frontier analysis: Foundations and advances. Working Papers 2017–10*, University of Miami, Department of Economics. DOI: 10.1017/CBO9781139174411.

About the authors

Elena D. Kopnova

Cand. Sci. (Tech.);

Associate Professor, Department of Statistics and Data Analysis, National Research University Higher School of Economics, 11 Pokrovsky Bulvar, Moscow 109028, Russia;

E-mail: ekopnova@hse.ru

ORCID: 0000-0002-8429-141X

Lilia A. Rodionova

Cand. Sci. (Econ.);

Associate Professor, Department of Statistics and Data Analysis, National Research University Higher School of Economics, 11 Pokrovsky Bulvar, Moscow 109028, Russia;

E-mail: lrodionova@hse.ru

ORCID: 0000-0002-0310-6359

DOI: 10.17323/2587-814X.2021.4.76.92

Технология проектирования инновационных процессов создания продукции и услуг сетевого предприятия с использованием i4.0-системы, основанной на знаниях

Ю.Ф. Тельнов
E-mail: Telnov.YUF@rea.ru

В.А. Казаков
E-mail: Kazakov.VA@rea.ru

А.В. Данилов
E-mail: Danilov.AV@rea.ru

Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова
Адрес: 117997, г. Москва, Стремянный пер., д. 36

Аннотация

Создание сетевых предприятий на основе цифровых технологий индустрии четвертого поколения открывает широкие возможности для повышения гибкости производства, клиентоориентированности и осуществления непрерывных инноваций в выпускаемой продукции и оказываемых услугах. Вместе с тем, новые возможности вызывают необходимость разработки новых методов и технологий проектирования инновационных процессов в условиях применения цифровых i4.0-платформ, что обусловливает актуальность темы представленной работы. Целью работы является определение технологий проектирования инновационных процессов создания продукции и услуг с использованием i4.0-систем, которые основаны на многоагентном взаимодействии оболочек администрирования ресурсов, отображающих цифровые двойники компонентов продуктов, и применении онтологических и когнитивных методов формирования и обоснования проектных решений. Представленная работа использует предметно-ориентированный подход к проектированию, архитектурный фреймворк построения i4.0-систем, методы онтологического инжиниринга, развертывания функции качества, анализа видов и последствий потенциальных несоответствий, обработки нечетких множеств. В работе предложены принципы выделения ограниченных контекстов предметной области в соответствии с выполняемыми проектными работами для стадий жизненного цикла и подсистем (компонентов) продукции. Для ограниченных контекстов предметной области предусматривается создание оболочек администрирования ресурсов i4.0-систем, с помощью которых осуществляется поддержка инновационного процесса и многоагентное

взаимодействие его участников. В качестве когнитивных инструментов принятия проектных решений предлагается использовать сервисы оценки важности определяемых качественных характеристик продукции и минимизации отклонений предлагаемых решений от формируемых функциональных и нефункциональных требований. Используемые методы онтологического инжиниринга и моделирования данных позволяют динамически развивать инновационный проект и поддерживать в процессе проектирования различные версии проекта. Применение предложенной технологии проектирования инновационных процессов создания продукции и услуг на сетевых предприятиях с использованием i4.0-систем позволит улучшить качество принимаемых проектных решений, повысить динамичность и непрерывное развитие инновационных проектов.

Ключевые слова: инновационный процесс; цифровой двойник; предметно-ориентированный подход; ограниченный контекст; цепочка создания ценности; онтология; многоагентное взаимодействие; i4.0-система; i4.0-платформа; оболочка администрирования ресурса.

Цитирование: Тельнов Ю.Ф., Казаков В.А., Данилов А.В. Технология проектирования инновационных процессов создания продукции и услуг сетевого предприятия с использованием i4.0-системы, основанной на знаниях // Бизнес-информатика. 2021. Т. 15. № 4. С. 76–92. DOI: 10.17323/2587-814X.2021.4.76.92

Введение

Инновационный процесс проектирования продукции и услуг на сетевом предприятии представляет собой итерационный процесс построения цепочки создания ценности, в котором концептуальная проработка конструкции изделия сопровождается выбором участников проекта и согласованием с ними условий выполнения работ на стадии реализации. Архитектура системы, основанной на знаниях (СОЗ), поддерживающей инновационный процесс проектирования продукции и услуг, была предложена авторами в работе [1], отличительной особенностью которой является применение технологий цифровых нитей [2, 3] и цифровых двойников [4–6] для отображения процесса проектирования в системе моделей продукта и связанных процессов, многоагентной технологии для организации взаимодействия участников цепочки создания ценности [7–9] и онтологического подхода [10–12] для автоматизации поиска релевантных источников информации и организации информационного обмена между программными агентами. Для дальнейшего развития технологии проектирования инновационных процессов создания продукции и услуг необходимо провести обоснование выбора программной платформы для многоагентной реализации системы, основанной на знаниях, и, с учетом выбранной программной среды реализации, определить более детально технологию проектирования.

Методологические основы концептуального проектирования таких сложных процессов, как инновационные процессы проектирования продукции и услуг, заложены в предметно-ориентированном подходе [13, 14], который позволяет структурировать предметную область с учетом ее объективной структуры и субъективной составляющей, определяющей формирование эффективно работающих проектных коллективов. В этой связи в статье рассматривается применение предметно-ориентированного подхода к выделению ограниченных контекстов инновационного процесса в соответствии со стадиями жизненного цикла и с цепочкой создания ценности для декомпозиции процесса на отдельные компоненты и установление между ними различных типов интерфейсов в соответствии с потребностями многоагентного взаимодействия участников инновационного процесса.

Многоагентная реализация системы, основанной на знаниях, для поддержки инновационного процесса проектирования продукции и услуг нацелена на обеспечение устойчивости всей структуры и автономности и интероперабельности ее компонентов, распределенных в вычислительной системе и функционирующих на единой программной платформе. С учетом того факта, что предлагаемая СОЗ реализует технологию цифровых нитей и двойников [1], в статье рассматривается применение программной платформы индустрии четвертого поколения (i4.0-платформы) [15] и оболочек администрирования ресурсов (asset administration shell, AAS) [16, 17] для представления ограниченных контекстов программных агентов, соответствующих отдельным компонентам цепочки создания ценности. При этом определяется состав функци-

ональных и платформенных (инфраструктурных) сервисов, необходимых для осуществления инновационного процесса создания продукции и услуг в сетевой распределенной среде.

В целях разработки механизмов поддержки процессов планирования и организации цепочки создания ценности, которая реализуется путем взаимодействия программных агентов отдельных AAS, в статье предлагается применение онтологического [11, 12] и когнитивного [18, 19] подходов, обеспечивающих формализацию алгоритмов выбора партнеров по бизнесу и согласование условий взаимодействия на основе методов семантического поиска и нечеткой оценки соответствия требований и возможностей их исполнения. Применение онтологического и когнитивного подходов во взаимосвязи позволит выстраивать эффективные цепочки создания ценности, направленные на реализацию перспективных и реально исполняемых конструкций продукции, а механизмы многоагентного взаимодействия партнеров по бизнесу на основе технологии цифровых двойников на i4.0-платформе обеспечат сокращение времени и повышение гибкости проектирования инновационных процессов.

1. Предметно-ориентированный подход к структурированию предметной области проектирования инновационных процессов

В ходе проектирования инновационных процессов создания продукции и услуг возникают проблемы рационального определения границ проектных задач, принятия решений при формировании проектных групп, организации взаимодействия между проектными группами. В качестве методологии проектирования инновационных процессов создания продукции и услуг предлагается использовать предметно-ориентированный подход, который наилучшим образом ориентирован на решение когнитивных проблем в проектных коллективах, возникающих в ходе согласования и обоснования проектных решений [13, 14].

Предметно-ориентированный подход к инновационному проектированию направлен на проведение эффективной декомпозиции процесса проектирования по предметному и контекстному (когнитивному) принципам и позволяет вырабатывать общий язык взаимодействия в проектных группах разнопрофильных специалистов. Концепты этого языка и соответствующих проектных решений с нашей точки зрения могут отражаться в компьютерно-поддерживаемых моделях в виде онтологий.

В своей основе предметно-ориентированный подход предназначен для проектирования особого вида инновационной продукции – программного обеспечения (ПО) и применения гибких итерационных технологий разработки ПО, в которых каждая итерация предполагает создание работающей версии программного обеспечения. Учитывая тот факт, что современное производство обычной продукции становится цифровым (то есть продукты, с одной стороны, насыщаются встроенным программным обеспечением, а с другой стороны, поддерживаются удаленными компьютерными моделями – цифровыми двойниками) принципы предметно-ориентированного проектирования в полной мере можно распространить и на традиционную продукцию и услуги с каскадной (последовательной) технологией разработки.

Декомпозиция и моделирование предметной области для проектирования инновационных процессов рассматривается с двух точек зрения, со стороны отдельных подсистем, так называемых подобластей, и с точки зрения решения отдельных задач, так называемых ограниченных контекстов, для совместного решения которых создаются проектные группы.

С точки зрения выделения подсистем (подобластей) и последующего моделирования обычно применяется функциональный принцип, то есть принцип выделения функций, которые должен исполнять продукт, при этом могут выделяться межфункциональные области интеграции. Очень часто разработка функциональных подсистем приводит к разработке соответствующих физических частей продукции. Например, при проектировании автомобиля в качестве подобластей выделяются ходовая часть, топливная система, электрооборудование, система безопасности и др., которые в свою очередь могут быть разбиты на компоненты, соответствующие отдельным узлам или деталям. На *рисунке 1* подсистемы и компоненты (поддомены) показаны скругленными прямоугольниками, а стрелки отражают порядок декомпозиции предметной области.

Ограниченные контексты связаны с конкретными решаемыми задачами и имеют четко очерченные границы. Над решением инновационных задач

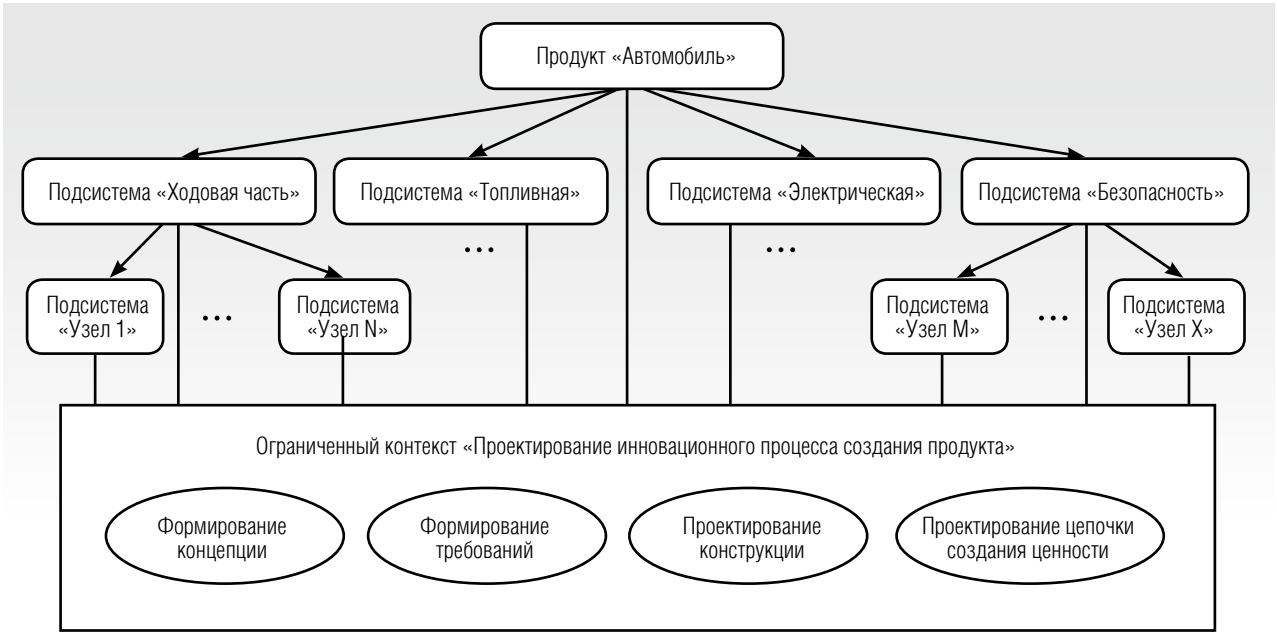

Рис. 1. Пример взаимодействия подсистем и ограниченных контекстов

в ограниченном контексте задействуются специалисты, прежде всего, двух типов: разработчики и эксперты предметной области. В зависимости от сложности решаемой задачи к инновационному процессу могут привлекаться разработчики и эксперты разных профилей.

В инновационных процессах создания продукции ограниченные контексты целесообразно выделять по этапам жизненного цикла: формирование концепции и требований к продукции, проектирование конструкции и цепочки создания ценности, изготовление опытного образца и испытание, промышленное производство и сопровождение, утилизация. При этом если одна и та же группа занимается несколькими работами на протяжении жизненного цикла, то эти работы могут быть объединены в один ограниченный контекст. Например, работы по формированию концепции (качественных характеристик продукции) и требований, проектированию конструкции и цепочки создания ценности могут быть объединены в один и тот же ограниченный контекст при условии совместной работы над перечисленными задачами одних и тех же специалистов. На *рисунке 1* отдельные работы показаны овалами, а их объединение в ограниченные контексты – прямоугольниками. При этом реализация ограниченных контекстов в зависимости от функциональных подсистем или даже составных частей продукта может существенно отличаться друг от друга.

Внутри одного ограниченного контекста участники процесса создания продукта работают на равноправной основе, формируя наборы свойств и правила (процедуры) поведения. При этом в рамках одного ограниченного контекста могут использоваться типовые онтологии, справочники, любые другие внешние информационные ресурсы. В процессе совместной работы формируется единый язык взаимодействия, оформляемый в виде итерационно-развиваемой онтологии. По ходу работы могут разрабатываться математические и имитационные модели, которые позволяют обосновывать принятие оптимальных или рациональных проектных решений.

Ограниченные контексты инновационного процесса создания продукции могут задаваться как на продукт в целом, так и для более детальной проработки на его отдельные компоненты. В ограниченном контексте проектирования продукта в целом прорабатывается цепочка создания ценности, вызывающая необходимость выбора исполнителей отдельных компонентов. В этом случае должны организовываться интерфейсы между ограниченными контекстами для всего продукта и для его отдельных компонентов, как правило, в парадигме «требование – исполнение».

Интерфейсы между ограниченными контекстами могут осуществляться посредством различных способов [14]:

✦ **партнерство (partnership)**. В этом случае группы исполнителей процесса, работающие над смежными предметными подобластями, активно обмениваются результатами совместной работы; участники групп работают над общими частями онтологии и должны обмениваться как разрабатываемыми частями онтологии, так и проектными результатами;

✦ **общее ядро (shared kernel)**. Данный способ взаимодействия можно рассматривать как частный случай организации партнерства. В этом случае организуется общий ограниченный контекст для нескольких групп, которые имеют к нему доступ с различными режимами разделения ресурсов и согласования результатов;

✦ **разработка «заказчик – поставщик» (customer – supplier development)**. Этот способ можно рассматривать как способ взаимодействия по цепочке создания ценности, когда вышестоящая группа продукта, представляющая заказчика, формирует спецификации требований для исполнителя заказа (поставщика). Поставщик должен когнитивно и экономически оценить полученные требования, в соответствии с этими требованиями дать согласие на исполнение и, соответственно, их исполнить. В данном случае возможно взаимодействие с внешними поставщиками (производителями) в режиме рассылки сообщений и отложенного принятия решений. Для согласования требований между заказчиками и исполнителями необходимо также осуществлять согласование взаимодействующих фрагментов онтологий;

✦ **конформист (conformist)**. Данный способ взаимодействия является частным случаем интерфейса «заказчик – поставщик». В этом случае исполнитель находится в подчиненном положении и исполняет требования заказчика без согласования с последним возможностей выполнения заказа. Такой способ установления интерфейса характерен для внутренних отношений подразделений предприятия, когда вышестоящая структура хорошо представляет возможности нижестоящих структур, а нижестоящие структуры в полной мере владеют онтологией или принимают непосредственное участие в ее выработке;

✦ **предохранительный уровень (anticorruption layer)**. Данный способ взаимодействия также является частным случаем интерфейса «заказчик – поставщик». Но в этом случае однозначно запрещается прямой доступ к данным поставщика для критериального выбора. Получение ответов на интересующие запросы возможен только через посылку сообщений, как правило, в офлайн-режиме. Таким образом, нижестоящий уровень организации защищает себя от возможного доступа заказчика к конфиденциальной информации. В этом случае согласование требований через онтологию является наиболее сложным, и чаще всего требуется трансляция представления совместно используемых знаний;

✦ **служба с открытым протоколом (open host service)**. В данном случае используется протокол, который открывает доступ к ограниченному контексту через набор сервисов, которые расширяются и уточняются по мере развития проекта;

✦ **общедоступный язык (published language)**. Этот способ является частным случаем способа «служба с отрытым протоколом». Использование общедоступного языка предполагает использование общей онтологии проекта. В некоторых случаях возможна трансляция концептов в обоих направлениях взаимодействия;

✦ **отдельное существование (separate ways)**. Несвязанное использование ограниченных контекстов может быть обусловлено конкурирующей разработкой продукции и услуг. В этом случае принятие решений осуществляется по мере завершения проекта;

✦ **«большой комок грязи» (big ball of mud)**. Это взаимодействие нового продукта с уже существующей частью продукта, которая может быть выполнена без соблюдения требования предметно-ориентированного проектирования.

С позиции создания некоторого материального продукта структурная модель ограниченного контекста преобразуется в программный код цифрового двойника. При этом цифровой двойник будет соответствовать одному ограниченному контексту, отражающему либо продукт в целом, либо его отдельный компонент, и представлять по сути автономный программный агент в многоагентной системе, основанной на знаниях, для решения задач проектирования инновационного процесса создания продукции и оказания услуг. При этом наличие нескольких подсистем (подобластей) у продукта делает возможным специализацию разработки программных модулей под соответствующие подобласти и необходимость получения интегрированных решений на уровне всего продукта.

2. Программная реализации многоагентной системы, основанной на знаниях, для проектирования инновационных процессов с использованием оболочки администрирования ресурса

Предложенная в работе [1] система, основанная на знаниях, для проектирования инновационных процессов создания продукции и услуг может быть реализована в архитектуре системы индустрии четвертого поколения (i4.0-система) [20–22]. Она включает набор взаимодействующих между собой i4.0-компонентов оболочек администрирования ресурсов (AAS), к которым обращаются i4.0-приложения участников инновационных процессов. AAS является программной реализацией концепции цифровых двойников создаваемых продуктов или его частей, а также связанных ресурсов: станков, производственных линий, цепочек поставок, субъектов-исполнителей производственных процессов, информационных и организационно-управляющих ресурсов. С точки зрения предметно-ориентированного подхода AAS продуктов и их компонентов в процессах проектирования инновационных процессов создания продукции и услуг будут составлять смысловое ядро СОЗ, а AAS остальных ресурсов – вспомогательные сущности.

Сервисы AAS разделяются на сервисы компонентов приложений и инфраструктурные сервисы платформы AAS. На *рисунке 2* представлена структура оболочки администрирования ресурсов для продуктов (компонентов продуктов), взаимодействующая с i4.0-платформой.

Оболочка администрирования ресурса цифрового двойника отражает данные о некоторой физической сущности (любом ресурсе) и включает набор сервисов, реализующих функциональные модули решения проектных задач.

Данные о ресурсе определяют состояние этой сущности на различных этапах жизненного цикла, могут быть планируемыми, фактическими, прогнозируемыми, моделируемыми и т.д. Данные могут быть разнесены по подмоделям, например, иденти-

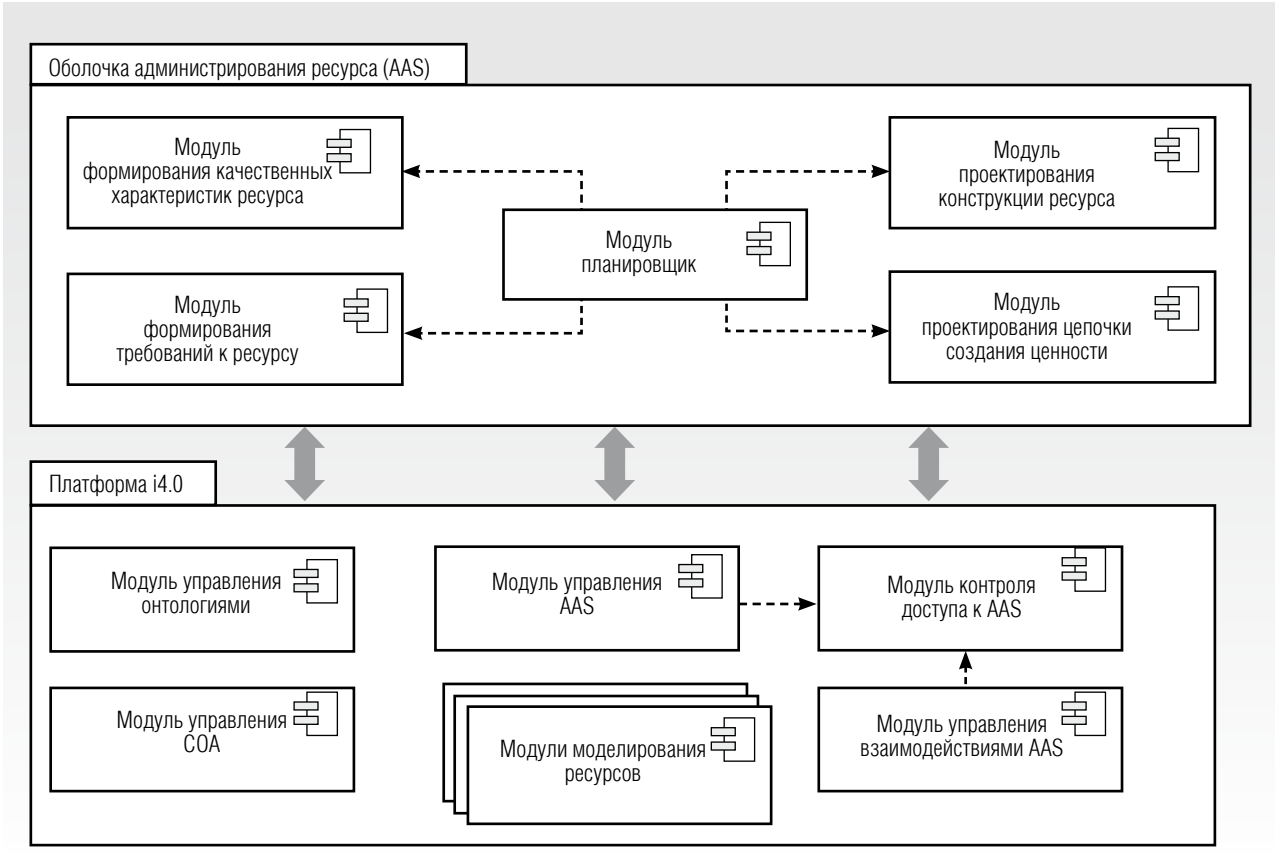

Рис. 2. Структура оболочки администрирования ресурсов для продуктов (компонентов продуктов), взаимодействующая с i4.0–платформой

фикационным, техническим, операционным и документационным подмоделям:

- идентификационные данные, которые должны быть неизменяемыми в течение всего жизненного цикла проекта;
- технические данные – количественные и качественные характеристики, соответствующие бизнес-требованиям к продукту по выполнению функций продукта;
- функциональные данные – требования к функциональным подсистемам продукта в случае достаточно сложной его структуры;
- проектные документируемые данные, отражающие характеристики реализации функциональных требований в части используемых технологий и исполнителей процессов;
- операционные данные, отражающие результаты функционирования продуктов на стадии эксплуатации или результаты имитационного и математического моделирования на стадиях проектирования и разработки.

Сервисы компонентов приложений AAS соответствуют функциональным модулям приложений. В случае ограниченного контекста, связанного с проектированием инновационного процесса создания продукции и услуг, сервисы компонентов приложений вызывают модули приложений формирования качественных характеристики, требований к продуктам, проектирования конструкции и цепочек создания ценности, а также модуль-планировщик, координирующий выполнение всех функциональных модулей [1].

Инфраструктурные сервисы i4.0-платформы являются вспомогательными. Они обеспечивают функционирование собственно AAS и взаимодействие между AAS, и с этой точки зрения являются платформенными и стандартизированными. Инфраструктурные сервисы относятся к i4.0-платформе, на основе которой создается i4.0-система.

К инфраструктурным сервисам относятся, прежде всего, сервисы управления AAS, которые выполняют функции создания компонентов AAS, регистрацию и создание реестров сервисов, поиск и представление сервисов, поиск и представление данных и подмоделей AAS.

Набор стандартизированных сервисов моделирования ресурса позволяет генерировать и использовать данные о ресурсах с помощью инструментов моделирования. В качестве типовых инструментов моделирования используются инструменты, реализующие:

- методы развертывания функции качества (quality function deployment, QFD) для определения приоритетов реализации бизнес и функциональных требований;
- методы анализа видов и последствий потенциальных несоответствий (failure mode and effects analysis, FMEA);
- методы обработки нечетких множеств;
- методы имитационного моделирования;
- методы статистического моделирования;
- методы машинного обучения и нейросетевого моделирования и др.

Таким образом, на i4.0-платформе можно реализовать общую функциональность различных видов моделирования (модули моделирования ресурса), необходимого для построения цепочки создания ценности – механизмы имитационного моделирования, алгоритмы QFD и FMEA, прочие математические и статистические алгоритмы моделирования. При этом любая AAS, участвующая на различных этапах цепочки создания ценности, может вызывать эти сервисы для реализации соответствующей функциональности (*рис. 2*), подставляя необходимые входные данные для моделирования из собственных подмоделей и получая необходимые результаты.

Для контроля доступа сервисов компонентов приложений к данным и моделям в конкретных AAS используются инфраструктурные сервисы i4.0-платформы, которые задают ограничения доступа для различных компонентов приложений, осуществляют обращение к онтологиям, определяют контекст совместного использования компонентов приложений, проверяют (классифицируют) соответствие обращений к сервисам компонентов приложений стандартам. На *рисунке 2* инфраструктурные платформенные сервисы реализуют функции управления онтологиями, сервисно-ориентированной архитектурой, взаимодействия с другими AAS и контроля доступа к AAS.

AAS может предоставлять сервисные интерфейсы для программных приложений для доступа к своим данным и вызова команд или запуска моделей. Сервисные интерфейсы (например, реализованные в форме API RESTful) обеспечивают связь и взаимодействие между AAS и с приложениями.

Как правило, современная промышленная продукция имеет сложную структуру. В этом случае для продукта в целом и для его отдельных частей создаются отдельные i4.0-компоненты (AAS), которые между собой связываются отношениями, реализуемыми с помощью сервисных интерфейсов (*рис. 3*). В качестве акторов запуска функциональных приложений и соответствующих i4.0-компонентов могут выступать как внешние субподрядчики, так и внутренние исполнители.

Эти i4.0-компоненты обмениваются между собой информацией с помощью трех режимов взаимодействия:

- пассивный режим – обмен файлами;
- реактивный режим – с помощью организации обмена данными и вызова сервисов через API;
- проактивный режим (pear-to-pear), когда цифровые двойники в автоматическом режиме совместно выполняют некоторые производственные процессы.

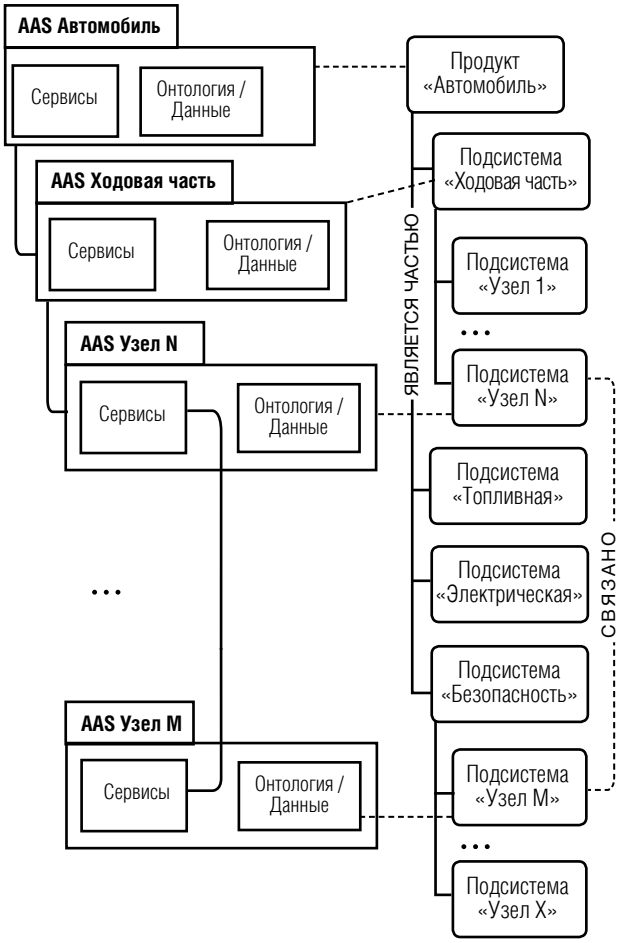

Рис. 3. Пример многоуровневой системы AAS (на основе [21])

Поскольку в статье речь идет только о начальных этапах создания продукции и услуг, связанные с формированием концепции и проектированием цепочки создания ценности, то в качестве режимов взаимодействия рассматриваются либо пассивный, либо реактивный режим взаимодействия, предполагающий активное участие людей в процессе проектирования. С точки зрения многоагентной реализации процесса взаимодействия i4.0-компонентов, принадлежащих внешним участникам цепочки создания ценности, реактивный режим взаимодействия соответствует различным режимам рассылки сообщений и подписки на информацию, а также сервисного взаимодействия (см. раздел «Предметно-ориентированный подход к структурированию предметной области проектирования инновационных процессов»).

3. Технология проектирования инновационных процессов создания продуктов с использованием онтологического и когнитивного подходов в i4.0-системе

Схема взаимодействия участников сетевого предприятия в i4.0-системе, реализующей функции системы, основанной на знаниях, по поддержке инновационных процессов создания продукции, представлена на *рисунке 4*. На основе референсной модели онтологии предметной области формируются онтологии проектов как для проекта в целом, так и для его составных частей. Как было отмечено в первом разделе, онтологии формируются итерационно и используются для решения поисковых задач в базах знаний и обмена знаниями между отдельными оболочками администрирования ресурсов. Стандартизированные сервисы методов QFD [23], FMEA [24], обработки нечетких множеств [25] используются в функциональных модулях AAS, реализуя когнитивные механизмы принятия решений. Рассмотрим технологию проектирования инновационных процессов создания продуктов в i4.0-системе более детально.

Ядром AAS является **модуль планирования**, реализующий интерфейсные сервисы для взаимодействия с участниками инновационного процесса создания продукции и обеспечивающий координацию функциональных сервисов. В частности, модуль поддерживает процесс принятия решений по выбору варианта конструкции продукта и цепочки создания ценности на основе сочетания ме-

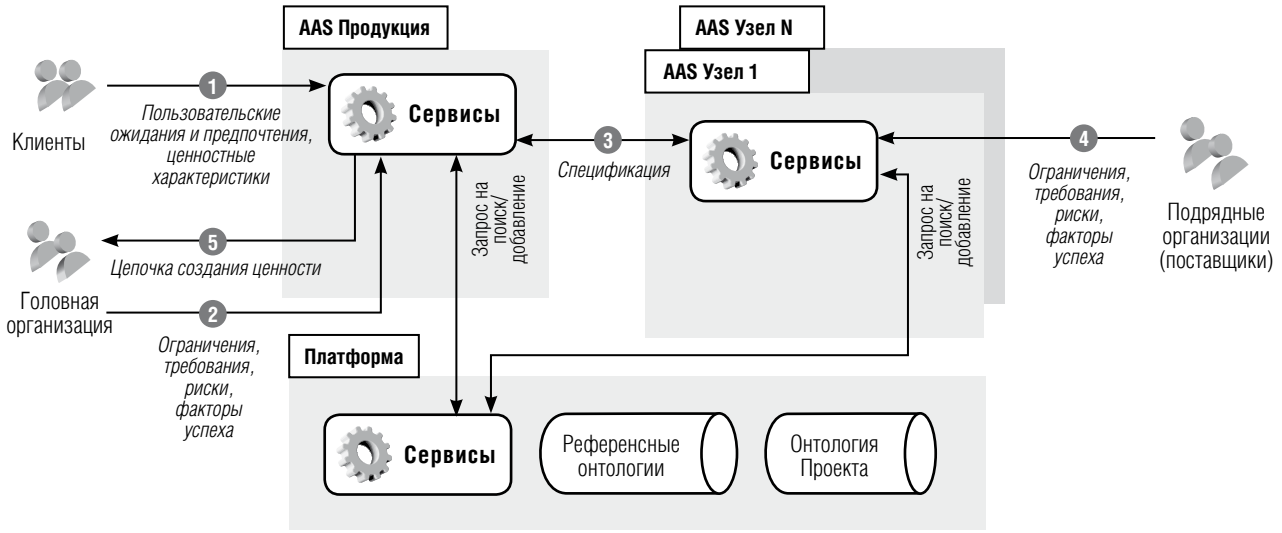

Рис. 4. Схема взаимодействия участников сетевого предприятия в i4.0–системе

тодов QFD и нечеткой логики. В рамках метода QFD при описании каждой качественной характеристики (бизнес-требования) экспертным путем устанавливается приоритет (вес), где самая важная характеристика с наибольшим потребительским интересом имеет максимальный вес. Дальнейшая процедура предусматривает сбор требований и оценку их влияния на ценностные характеристики, выбор наиболее важных требований. Последующая оценка конструктивных элементов с точки зрения их влияния на реализацию требований связана с выбором варианта конструкции продукции, в большей степени отвечающей выбранным требованиям, а оценка рисков, связанных с поставщиками и/или подрядчиками, учитывает сформированные варианты конструкции. В результате осуществляется выбор оптимальной цепочки процесса создания ценности, в которой для всех участников определены требования и связанные риски, организован доступ к данным моделей AAS (распределенному репозиторию). Подробное описание методики использования метода QFD представлено в статье [26].

Формирование проектов продуктов инициируется в AAS и проходит ряд итераций [1, 26], в рамках которых осуществляются вызовы сервисов, реализуемых модулями AAS.

Ценность продукта для потребителя определяется через ценностные (качественные) характеристики (или бизнес-требования), которые описываются в онтологии проекта с помощью сервисов **модуля формирования качественных характеристик**, а также набор функциональных и нефункциональных требований, критериальную базу оценки реализации требований, которые описываются с помощью сервисов **модуля формирования требований**.

Интегрированное выражение когнитивного понимания рыночной ситуации по рассматриваемому виду продукции находит свое представление в методологии SWOT анализа, который в обобщенной форме выявляет достоинства и недостатки производства рассматриваемого вида продукции, а также возможности и угрозы рыночной реализации проекта [27].

Процесс формирования качественных характеристик продукта является слабоформализуемой задачей анализа внешних и внутренних факторов соответствующего рынка продукции и услуг. В этом процессе принимают участие специалисты различных профилей: маркетологи, исследователи новых технологий и материалов, конструкторы и технологи аналогичных видов продукции. В решении задачи отбора важнейших свойств проектируемого продукта могут использоваться методы анализа больших данных о рынках продукции, технологий и материалов, предиктивного прогнозирования тенденций развития, анализа ресурсных ограничений и рисков освоения новых видов продукции и технологий.

Классификация продуктов, типовые (обязательные и опциональные) ценностные характеристики, параметры продукта и некоторые логические пра-

вила, представленные в референсной онтологии, используются при описании инновационного продукта (нового класса продукции) в онтологии проекта, наследующего ряд ценностных характеристик той категории, к которой он принадлежит, и/или имеющего некоторые уникальные, несвойственные для данной категории продуктов, характеристики.

С помощью существующих сервисов дополнительно оцениваются и классифицируются в онтологии проекта ожидаемые и привлекающие характеристики (согласно Кано [28]), а также минимизируется наличие не влияющих, противоречивых и отвращающих характеристик. При этом наибольший приоритет (вес) согласно QFD будут иметь именно обязательные (ожидаемые) и привлекающие характеристики, а противоречивые или отвращающие характеристики – наименьший. В ходе дальнейшей работы над проектом из набора может быть исключена часть опциональных характеристик, реализация которых приводит к значительным издержкам проекта, а также отвращающие и противоречивые характеристики, снижающие ценность продукта для потребителя.

Сведения о качественных (ценностных) характеристиках продукта могут уточняться в ходе проекта и используются в **модуле формирования требований**, где для каждой из выявленных качественных (ценностных) характеристик определяется как минимум одно требование, реализация которого обеспечивает соответствующую характеристику. Функциональные требования должны быть распределены по подсистемам (поддоменам предметной области).

В онтологию проекта из референсной онтологии переносятся типовые требования, свойственные определенным категориям продукта и задаваемые стандартами (например, ТУ и ГОСТами), и вносятся производные от этих требований (или независимые от них) оригинальные требования и ограничения проекта.

Для выявления обязательных требований оценивается степень связанности каждого требования с реализацией качественной характеристики. В результате использования функции фазификации коэффициента уверенности для оценки такой связи приводится к шкале [0, 1]. Суммарная важность для реализации всего набора качественных характеристик рассчитывается для каждого требования по формуле [29]:

$$\hat{T}_j = \sum_f \varphi_f (C_{fj} P_f), \quad (1)$$

где $\hat{T}_j$ – нечеткая оценка важности *j*-го требования для реализации качественных характеристик (бизнес-требований) инновационного продукта;

C_{fj} – уровень связанности *j*-го требования и *f-й* характеристики по шкале [0, 1, 3, 9];

P_f – заданный приоритет *f*-й характеристики по шкале [1, *N*];

φ_f – функция фазификации по шкале [0, 1]: чем больше важность *j*-го требования для реализации *f*-й характеристики, тем ближе значение функции к 1;

$\sum$ – операция аддитивного суммирования нечетких чисел.

Для определения итогового множества групп обязательных и необязательных требований, которые должны обеспечивать наличие всех обязательных и ожидаемых характеристик, используются заданные пороговые значения оценки $\hat{T}_j$. Ожидаемые и необязательные требования, имеющие оценки ниже пороговых, не учитываются в дальнейшем.

Детализация требований проводится до уровня конкретных функций и конструктивных элементов. Они описываются в онтологии проекта в рамках **модуля проектирования конструкции**.

Условием для включения конструктивного элемента в вариант конструкции продукта (bill of materials, BOM) является обеспечение возможности выполнения некоторых функций продукта или реализация обязательных интерфейсных требований. Также может происходить наследование структуры (product breakdown structure, PBS) из онтологии продукта. Таким образом, каждый конструктивный элемент и функция продукта прямо или косвенно связаны с одним или несколькими требованиями, которые в совокупности определяют вариант конструкции продукта.

Ранжировать (сравнивать) различные варианты конструкций продукта можно обращаясь к сервисам метода QFD для оценки влияния конструктивных элементов на обеспечение соответствующих требований. При этом полученные по указанной выше формуле оценки важности требований учитываются при расчете оценок для отдельных конструктивных элементов.

Спецификация BOM – задача слабоформализуемая, итерационная и имеющая инновационный характер. В ходе выполнения этой задачи BOM определяется таким образом, чтобы обеспечить, с

одной стороны, полное соответствие существующим требованиям (в варианте конструкции всегда должен быть предусмотрен хотя бы один элемент для каждого обязательного требования) и, с другой стороны, соответствующий уровень издержек. Для отбора необязательных конструктивных элементов и/или элементов, с которыми связаны высокие издержки, может задаваться и использоваться некоторое пороговое значение.

Определяющим фактором является возможность приобретения выбранных типов конструктивных элементов и/или их производства. Для оценки такой возможности сформированный вариант конструкции передается модулю планировщику, который в свою очередь вызывает сервисы, реализуемые **модулем проектирования цепочки создания ценности**. С помощью указанных сервисов в том числе проводится анализ рынка, выбор варианта инновационного процесса и подбор его участников.

Отсутствие входящих в проект продукта конструктивных элементов у поставщиков, связанных с обязательными требованиями, может привести к одному из следующих организационных сценариев, инициируемых модулем планирования:

- ✦ поиск подрядчиков, которые могли бы обеспечить производство отсутствующего конструктивного элемента на заказ с применением заданных технологий, инструментов и проектных ограничений;
- ✦ выбор согласно рангу другого варианта конструкции продукта, не содержащего отсутствующие элементы;
- ✦ пересмотр концепции продукта с целью уточнения характеристик и требований для исключения отсутствующего элемента конструкции;
- ✦ завершение работ, обусловленное отсутствием возможности пересмотра концепции продукта.

Для того, чтобы выявить предприятия, способные произвести на заказ отсутствующие конструктивные элементы, необходимо сформировать вариант цепочки создания ценности, включающий работы по производству, проектированию, сборке, обработке, наладке, обслуживанию и поставке продукции. Состав и связи таких работ содержатся в онтологии проекта, где также могут быть определены возможные инструменты и технологии, а также соответствие заданным проектным ограничениям и установленным требованиям.

Оценка суммарного влияния всех работ в цепочке процесса на обеспечение качественных характеристик и удовлетворение требований позволяет отобрать участников процесса с учетом их компетенций (способности выполнять некоторые виды работ, владение инструментами и технологиями).

Формула расчета отклонений требований от возможностей предприятия, основанная на суммировании нечетких чисел, представлена ниже; при этом определяется возможность выполнения некоторых видов работ собственными силами или их передача на аутсорсинг [29]:

$$\hat{V}_{iu} = \sum_j \theta_j (T_{iuj} - R_{iuj}), \qquad (2)$$

где $\hat{V}_{iu}$ – нечеткая оценка конкурентоспособности u-го компонента продукции на рынке, поставляемого (производимого) i-м исполнителем;

T_{iuj} – заданный уровень j-го требования для реализации u-го компонента i-м исполнителем;

R_{iuj} – уровень реализации j-го требования для u-го компонента i-м исполнителем;

θ_j – функция фазификации по шкале (0, 1): чем меньше отклонение, тем выше конкурентоспособность.

$\sum$ – операция аддитивного суммирования нечетких чисел.

Уровень реализации j-го требования для u-го компонента i-м исполнителем определяется в процессе согласования требования с исполнителем путем интерпретации получаемых данных от исполнителя (по натуральной или нечеткой шкале [0, 1]).

Соответственно, выбор исполнителя (поставщика или производителя) осуществляется по максимальной оценке конкурентоспособности поставляемого (производимого) u-го компонента на рынке:

$$\hat{V}_u^* = \max_i \hat{V}_{iu} \hat{K}_{iu}, \qquad (3)$$

где $\hat{V}_u^*$ – максимальная оценка конкурентоспособности u-го поставляемого (производимого) компонента;

$\hat{V}_{iu}$ – нечеткая оценка конкурентоспособности u-го компонента продукции, поставляемого (производимого) i-м исполнителем;

$\hat{K}_{iu}$ – коэффициент риска, связанный с реализацией u-го компонента i-м исполнителем.

Коэффициент риска рассчитывается как мультипликативное произведение нечетких чисел, соответствующих отдельным видам рисков, которые определяются по нечеткой шкале [0, 1]:

$$\hat{K}_{iu} = \prod_k K_{iuk}, \quad (4)$$

где $\hat{K}_{iu}$ – коэффициент риска, связанный с реализацией u-го компонента i-м исполнителем;

K_{iuk} – коэффициент риска k-го вида, связанный с реализацией u-го компонента i-м исполнителем;

$\prod$ – операция произведения нечетких чисел.

В ходе поиска подрядчиков используются **платформенные сервисы** обеспечения взаимодействия AAS, посредством которых осуществляется рассылка в адрес производителей запросов-требований. В частности, направляется спецификация набора конструктивных элементов, в которых заинтересована инициирующая разработку продукта организация, описание соответствующих инструментов и технологий, требования к конструктивному элементу и проектные ограничения. Посредством существующего или созданного AAS производитель обращается к сведениям, представленным в базах данных предприятий, и расчетным моделям для оценки возможностей производства. Для этого вызываются аналогичные сервисы, реализуемые модулями формирования качественных характеристик, формирования требований, проектирования конструкции на уровне конструктивного элемента, а не продукта в целом.

Если предприятие не соответствует заданным условиям полностью, то посредством платформенных сервисов направляется соответствующий ответ, в противном случае направляются результаты расчетных моделей и характеристики конструктивного элемента, который может быть разработан. Отсутствие положительных ответов на рассылку со стороны производителей является основанием для перехода к другим вариантам процесса согласно ранее определенному рангу.

Выбранный вариант процесса с перечнем работ и ответственных, детальным описанием продукта и конструктивных элементов сохраняются платформенными сервисами в подмодели проектных документируемых данных AAS и используются на стадии производства для координации работ (прямого общения между сервисами участников процесса), а также в ходе эксплуатации изделий и при разработке новых видов продукции.

Заключение

В результате проведенного исследования технологии проектирования инновационных процессов создания продукции сетевого предприятия с использованием i4.0-системы, основанной на знаниях, можно сделать следующие выводы.

Декомпозицию предметной области для проектирования инновационных процессов создания продукции и услуг целесообразно осуществлять на основе применения предметно-ориентированного подхода, который обеспечивает, с одной стороны, объективное отражение структуры продукции и услуг и цепочек создания ценностей, а с другой стороны, формирование проектных коллективов, способных эффективно взаимодействовать в рамках поставленных задач.

Система, основанная на знаниях, для проектирования инновационных процессов создания продукции и услуг, может быть реализована на платформе индустрии 4.0 (платформа i4.0), которая обеспечивает многоагентную реализацию процесса проектирования в распределенной сетевой архитектуре с использованием технологии цифровых двойников и нитей.

Предметно-ориентированное проектирование позволяет выделять ограниченные контексты создания продукции и услуг по стадиям жизненного цикла, а для этапа проектирования – последовательность работ по формированию концепции, функциональных и нефункциональных требований, проектированию конструкции изделия и цепочки создания ценности. Соответственно, структура i4.0-системы, основанной на предметно-ориентированной декомпозиции, будет включать наборы взаимодействующих оболочек администрирования ресурсов, реализующих ограниченные контексты проектирования.

Особенностью предлагаемой технологии проектирования инновационных процессов создания продукции и услуг является ее итерационный характер, в ходе исполнения которой для цифровых двойников продуктов и их составных частей динамически создаются оболочки администрирования ресурсов, формирующие и оценивающие версии цепочек создания ценностей на предмет наилучшего выполнения функциональных и нефункциональных требований.

Применение стандартизированных онтологических сервисов i4.0-платформы обеспечивает динамическое создание онтологий из референсных моделей и их актуализацию по мере развития инновационного проекта создания продукции и услуг.

Стандартизированные методы i4.0-платформы в части обмена информацией между AAS позволяют выполнять различные режимы активного взаимо-

действия участников инновационного процесса, направленные на получение обоснованных и согласованных проектных решений.

Функциональные модули оболочек администрирования ресурсов базируются на применении стандартизированных сервисов, реализующих когнитивные методы: развертывания функции качества для определения приоритетов реализации бизнес- и функциональных требований, анализа видов и последствий потенциальных несоответствий для оценки рисков, метода обработки нечетких множеств для получения многокритериальных оценок целесообразности принятия тех или иных проектных решений. Применение перечисленных методов позволяет осуществлять многокритериальную оптимизацию инновационного процесса проектирования.

Характеризуя предлагаемую технологию проектирования инновационных процессов создания продукции и услуг в целом, следует отметить ее новизну в части предложенных методов реализации многоагентного взаимодействия участников инновационного процесса в рамках динамического построения i4.0-системы и использования онтологических и когнитивных методов формирования проектных решений. В перспективе предполагается продолжить исследования применения разработанных методов и механизмов i4.0-систем для реализации последующих этапов жизненного цикла создания продукции и услуг. ■

Благодарности

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 19-07-01137а.

Литература

1. Тельнов Ю.Ф., Казаков В.А., Трембач В.М. Разработка системы, основанной на знаниях, для проектирования инновационных процессов создания продукции сетевых предприятий // Бизнес-информатика. 2020. Т. 14. № 3. С. 35–53. DOI: 10.17323/2587-814X.2020.3.35.53.
2. Bajaj M., Hedberg T. System lifecycle handler – Spinning a digital thread for manufacturing // 28th Annual INCOSE International Symposium. Washington, DC, 7–12 July 2018. Vol. 28. P. 1636–1650. DOI: 10.1002/j.2334-5837.2018.00573.x.
3. Digital thread for smart manufacturing // NIST. Created April 25, 2014, Updated December 11, 2020. [Электронный ресурс]: https://www.nist.gov/programs-projects/digital-thread-smart-manufacturing (дата обращения 26.07.2021).
4. Grieves M. Origins of the digital twin concept. 2016. [Электронный ресурс]: https://www.researchgate.net/publication/307509727_Origins_of_the_Digital_Twin_Concept (дата обращения 26.07.2021). DOI: 10.13140/RG.2.2.26367.61609.
5. Минаев В.А., Мазин А.В., Здирук К.Б., Куликов Л.С. Цифровые двойники объектов в решении задач управления // Радиопромышленность. 2019. Т. 29. № 3. С. 68–78. DOI: 10.21778/2413-9599-2019-29-3-68-78.
6. Цифровые двойники в высокотехнологичной промышленности. Экспертно-аналитический доклад // Инфраструктурный центр «Технет» НТИ. Москва, 2019. [Электронный ресурс]: http://assets.fea.ru/uploads/fea/news/2019/12_december/28/cifrovoy_dvoinik.pdf (дата обращения 26.07.2021).
7. Wooldridge M. An introduction to multi-agent systems. New York: Wiley, 2009.
8. Городецкий В.И., Грушинский М.С., Хабалов А.В. Многоагентные системы (обзор) // Новости искусственного интеллекта. 1998. № 2. С. 64–116.
9. Разработка прототипа многоагентной системы сетевого взаимодействия учебных заведений / Ю.Ф. Тельнов и [др.] // Открытое образование. 2018. Т. 22. № 6. С. 14–26. DOI: 10.21686/1818-4243-2018-6-14-26.
10. Uschold M., King M., Moralee S., Zorgios Y. The enterprise ontology // Knowledge Engineer Review. 1998. Vol. 13. No 1. P. 31–89. DOI: 10.1017/S0269888998001088.
11. Гаврилова Т.А., Кудрявцев Д.В., Муромцев Д.И. Инженерия знаний. Модели и методы. Санкт-Петербург: Лань, 2016.
12. Ефименко И.В., Хорошевский В.Ф. Онтологическое моделирование экономики предприятий и отраслей современной России: Часть 1. Онтологическое моделирование: подходы, модели, методы, средства, решения.WP7/2011/08 (ч. 1). М.: ВШЭ, 2011.
13. Evans E. Domain-driven design: Tackling complexity in the heart of software. Boston: Addison-Wesley, 2003.
14. Vernon V. Domain driven design distilled. Boston: Addison-Wesley, 2016.
15. Architecture alignment and interoperability // Industrial Internet Consortium and Plattform Industrie 4.0 Joint Whitepaper, 2017. [Электронный ресурс]: https://www.iiconsortium.org/pdf/JTG2_Whitepaper_final_20171205.pdf (дата обращения 26.07.2021).
16. Details of the asset administration shell from idea to implementation // Plattform Industrie 4.0. 2019. [Электронный ресурс]:

https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/EN/Downloads/Publikation/vws-in-detail-presentation.pdf?__blob=publicationFile&v=12 (дата обращения 26.07.2021).

17. Digital twin and asset administration shell concepts and application in the industrial internet and Industrie 4.0 // Industrial Internet Consortium and Plattform Industrie 4.0 Joint Whitepaper, 2020. [Электронный ресурс]: https://www.iiconsortium.org/pdf/Digital-Twin-and-Asset-Administration-Shell-Concepts-and-Application-Joint-Whitepaper.pdf (дата обращения 26.07.2021).

18. Кузнецов О.П. Когнитивная семантика и искусственный интеллект // Искусственный интеллект и принятие решений. 2012. № 4. С. 95–105.

19. Трембач В.М. Когнитивный подход к созданию интеллектуальных модулей организационно-технических систем // Открытое образование. 2017. Т. 21. № 2. С. 78–87. DOI: 10.21686/1818-4243-2017-2-78-87.

20. Details of the asset administration shell. Part 1 – The exchange of information between partners in the value chain of Industrie 4.0 (Version 3.0RC01) // Plattform Industrie 4.0, 2020. [Электронный ресурс]: https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/EN/Downloads/Publikation/Details_of_the_Asset_Administration_Shell_Part1_V3.pdf?__blob=publicationFile&v=5 (дата обращения 26.07.2021).

21. Usage view of asset administration shell. Discussion paper // Plattform Industrie 4.0, 2019. [Электронный ресурс]: https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/2019-usage-view-asset-administration-shell.pdf?__blob=publicationFile&v=4 (дата обращения 26.07.2021).

22. Functional view of the asset administration shell in an Industrie 4.0 system environment. Discussion paper // Plattform Industrie 4.0, 2019. [Электронный ресурс]: https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/Functional- View.pdf?__blob=publicationFile&v=5 (дата обращения 26.07.2021).

23. Вашуков Ю.А., Дмитриев А.Я., Митрошкина Т.А. QFD: Разработка продукции и технологических процессов на основе требований и ожиданий потребителей: методические указания. Самара: Самар. гос. аэрокосм. ун-т, 2012.

24. Вашуков Ю.А., Дмитриев А.Я., Митрошкина Т.А. Анализ видов, последствий и причин потенциальных несоответствий (FMEA): методические указания. Самара: Самар. гос. аэрокосм. ун-т, 2008.

25. Аверкин А.Н. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта. М.: Книга по требованию, 2013.

26. Построение структуры сетевого предприятия для создания инновационных продуктов / Ю.Ф. Тельнов и [др.] // Открытое образование. 2019. Т. 23. № 6. С. 59–73. DOI: 10.21686/1818-4243-2019-6-59-73.

27. Thompson A.A. Jr., Strickland III A.J. Strategic management: Concepts and cases. Boston, Mass.: McGraw-Hill/Irvin, 2003.

28. Kano N., Seraku N., Takahashi F., Tsuji S. Attractive quality and must-be quality // Journal of the Japanese Society for Quality Control. 1984. Vol. 14. No 2. P. 147–156. DOI: 10.20684/quality.14.2_147.

29. Калачихин П.А., Тельнов Ю.Ф. Формирование цепочек создания ценностей в сетевых структурах взаимодействия на основе интеллектуальных технологий // XVI Национальная научная конференция по искусственному интеллекту с международным участием (КИИ–2018). Москва, 24–27 сентября 2018 г. В 2-х томах. Т. 1. С. 106–115.

Об авторах

Тельнов Юрий Филиппович

доктор экономических наук, профессор;

заведующий кафедрой прикладной информатики и информационной безопасности, Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова, 117997, г. Москва, Стремянный пер., д. 36;

E-mail: Telnov.YUF@rea.ru

ORCID: 0000-0002-2983-8232

Казаков Василий Александрович

кандидат экономических наук;

ведущий научный сотрудник НИИ «Стратегические информационные технологии», Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова, 117997, г. Москва, Стремянный пер., д. 36;

E-mail: Kazakov.VA@rea.ru

ORCID: 0000-0001-8939-2087

Данилов Андрей Владимирович

старший преподаватель кафедры прикладной информатики и информационной безопасности, Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова, 117997, г. Москва, Стремянный пер., д. 36;

E-mail: Danilov.AV@rea.ru

ORCID: 0000-0002-0433-9701

Technology for designing innovative processes for creating products and services of a network enterprise using an i4.0 knowledge-based system

Yury F. Telnov
E-mail: Telnov.YUF@rea.ru

Vasily A. Kazakov
E-mail: Kazakov.VA@rea.ru

Andrey V. Danilov
E-mail: Danilov.AV@rea.ru

Plekhanov Russian University of Economics
Address: 36, Stremyanny Lane, Moscow 117997, Russia

Abstract

The creation of network enterprises based on the digital technologies of the Industrie 4.0 (the 4th Industrial Revolution, i4.0) opens broad opportunities for increasing production flexibility, customer focus and continuous innovation in products and services provided. At the same time, new opportunities necessitate the development of new methods and technologies for designing innovative processes in the context of digital i4.0 platforms, all of which highlights the relevance of the presented research topic. This work aims to define technologies for designing innovative processes to create products and services using i4.0 systems which are based on multi-agent interaction of asset administration shells (AAS), displaying digital twins of product components, and the use of ontological and cognitive methods for forming and justifying design decisions. The work presented here uses the Domain-Driven Design approach, an architectural framework for building i4.0 systems, methods of ontological engineering, quality function deployment (QFD), analysis of the types and consequences of potential inconsistencies (FMEA) and processing of fuzzy sets. The paper proposes principles for identifying bounded contexts of the domain under the design activities for the stages of the life cycle and products' subsystems (components). For bounded contexts of the domain, it is envisaged to create AAS of i4.0 systems, with the help of which the innovative process is supported and the multi-agent interaction of its participants is carried out. As cognitive tools for making design decisions, we proposed to use services for assessing the importance of the determined quality characteristics of products and minimizing deviations of the proposed solutions from the formed functional and non-functional requirements. The methods of ontological engineering and data modelling allow us to dynamically develop an innovative project and support various versions of the project in the design process. Application of the proposed technology for designing innovative processes to create products and services at network enterprises using i4.0 systems will improve the quality of design decisions, increase the dynamism and continuous design of innovative projects.

Key words: innovative process; digital twin; domain-driven design; bounded context; value-added chain; ontology; multi-agent interaction; i4.0 system; i4.0 platform; asset administration shell (AAS).

Citation: Telnov Yu.F., Kazakov V.A., Danilov A.V. (2021) Technology for designing innovative processes for creating products and services of a network enterprise using an i4.0 knowledge-based system. *Business Informatics*, vol. 15, no 4, pp. 76–92. DOI: 10.17323/2587-814X.2021.4.76.92

References

1. Telnov Yu.F., Kazakov V.A., Trembach V.M. (2020) Developing a knowledge-based system for the design of innovative product creation processes for network enterprises. *Business Informatics*, vol. 14, no 3, pp. 35–53. DOI: 10.17323/2587-814X.2020.3.35.53.
2. Bajaj M., Hedberg T. (2018) System lifecycle handler – Spinning a digital thread for manufacturing. Proceedings of the *28th Annual INCOSE International Symposium. Washington, DC, 7–12 July 2018*, vol. 28, pp. 1636–1650. DOI: 10.1002/j.2334-5837.2018.00573.x.
3. NIST (2020) *Digital thread for smart manufacturing*. Available at: https://www.nist.gov/programs-projects/digital-thread-smart-manufacturing (accessed 26 July 2021).
4. Grieves M. (2016) *Origins of the digital twin concept*. Available at: https://www.researchgate.net/publication/307509727_Origins_of_the_Digital_Twin_Concept (accessed 26 July 2021). DOI: 10.13140/RG.2.2.26367.61609.
5. Minaev V.A., Mazin A.V., Zdiruk K.B., Kulikov L.S. (2019) Digital twins of objects in the solution of control problems. *Radioindustry*, vol. 29, no 3, pp. 68–78 (in Russian). DOI: 10.21778/2413-9599-2019-29-3-68-78.
6. NTI (2019) *Digital twins in the high-tech industry. Expert and analytical report*. Available at: http://assets.fea.ru/uploads/fea/news/2019/12_december/28/cifrovoy_dvoinik.pdf (accessed 26 July 2021).
7. Wooldridge M. (2009) *An introduction to multi-agent systems*. New York: Wiley, 2009.
8. Gorodetskiy V.I., Grushinskiy M.S., Khabalov A.V. (1998) Multi-agent systems (review). *Artificial Intelligence News*, no 2, pp. 64–116 (in Russian).
9. Telnov Yu.F., Danilov A.V., Diveev R.I., Kazakov V.A., Yaroshenko E.V. (2018) Development of a prototype of multi-agent system of network interaction of educational institutions. *Open Education*, vol. 22, no 6, pp. 14–26 (in Russian). DOI: 10.21686/1818-4243-2018-6-14-26.
10. Uschold M., King M., Moralee S., Zorgios Y. (1998) The enterprise ontology. *Knowledge Engineer Review*, vol. 13, no 1, pp. 31–89. DOI: 10.1017/S0269888998001088.
11. Gavrilova T.A., Kudryavtsev D.V., Muromtsev D.I. (2016) *Knowledge engineering. Models and methods*. Saint Petersburg: Lan' (in Russian).
12. Efimenko I.V., Khoroshevsky V.F. (2011) *Ontological modeling of enterprises and markets of modern Russia. Part 1. Ontological modeling: Approaches, models, methods, tools, solutions. Working paper WP7/2011/08 (part 1)*. Moscow: HSE Publishing House (in Russian).
13. Evans E. (2003) *Domain-driven design: Tackling complexity in the heart of software*. Boston: Addison-Wesley.
14. Vernon V. (2016) *Domain driven design distilled*. Boston: Addison-Wesley.
15. Industrial Internet Consortium, Plattform Industrie 4.0 (2017) *Architecture alignment and interoperability. Joint Whitepaper*. Available at: https://www.iiconsortium.org/pdf/JTG2_Whitepaper_final_20171205.pdf (accessed 26 July 2021).
16. Plattform Industrie 4.0. (2019) *Details of the asset administration shell from idea to implementation*. Available at: https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/EN/Downloads/Publikation/vws-in-detail-presentation.pdf?__blob=publicationFile&v=12 (accessed 26 July 2021).
17. Industrial Internet Consortium, Plattform Industrie 4.0 (2020) *Digital twin and asset administration shell concepts and application in the industrial internet and Industrie 4.0. Joint Whitepaper*. Available at: https://www.iiconsortium.org/pdf/Digital-Twin-and-Asset-Administration-Shell-Concepts-and-Application-Joint-Whitepaper.pdf (accessed 26 July 2021).
18. Kuznetsov O.P. (2012) Cognitive semantics and artificial intelligence. *Artificial Intelligence and Decision Making*, no 4, pp. 95–105 (in Russian).
19. Trembach V.M. (2017) Cognitive approach to developing the intelligent modules of organizational and technical systems. *Open Education*, vol. 21, no 2, pp. 78–87 (in Russian). DOI: 10.21686/1818-4243-2017-2-78-87.
20. The Plattform Industrie 4.0 (2020) *Details of the asset administration shell. Part 1 – The exchange of information between partners in the value chain of Industrie 4.0 (Version 3.0RC01)*. Available at: https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/EN/Downloads/Publikation/Details_of_the_Asset_Administration_Shell_Part1_V3.pdf?__blob=publicationFile&v=5 (accessed 26 July 2021).
21. Plattform Industrie 4.0 (2019) *Usage view of asset administration shell. Discussion paper*. Available at: https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/2019-usage-view-asset-administration-shell.pdf?__blob=publicationFile&v=4 (accessed 26 July 2021).
22. Plattform Industrie 4.0 (2019) *Functional view of the asset administration shell in an Industrie 4.0 system environment. Discussion paper*. Available at: https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/Functional- View.pdf?__blob=publicationFile&v=5 (accessed 26 July 2021).
23. Vashukov Yu.A., Dmitriyev A.Ya., Mitroshkina T.A. (2012) *QFD: Product and process development based on customer requirements and expectations: A methodological guide*. Samara: SSAU (in Russian).
24. Vashukov Yu.A., Dmitriyev A.Ya., Mitroshkina T.A. (2008) *Type, consequence and cause analysis of potential nonconformities (FMEA): A methodological guide*. Samara: SSAU (in Russian).
25. Averkin A.N. (2013) *Fuzzy sets in management and artificial intelligence models*. Moscow: Kniga po Trebovaniyu (in Russian).
26. Telnov Yu.F., Trembach V.M., Danilov A.V., Yaroshenko E.V., Kazakov V.A., Kozlova O.A. (2019) Constructing network enterprise structure to create innovative products. *Open Education*, vol. 23, no 6, pp. 59–73 (in Russian). DOI: 10.21686/1818-4243-2019-6-59-73.
27. Thompson A.A. Jr., Strickland III A.J. (2003) *Strategic management: Concepts and cases*. Boston, Mass.: McGraw-Hill/Irvin.
28. Kano N., Seraku N., Takahashi F., Tsuji S. (1984) Attractive quality and must-be quality. *Journal of the Japanese Society for Quality Control*, vol. 14, no 2, pp. 147–156. DOI: 10.20684/quality.14.2_147.
29. Kalachikhin P.A., Telnov Yu.F (2018) Value-added chains formation in network structures of interaction based on intelligent technologies. Proceedings of the *XVI National Scientific Conference on Artificial Intelligence with International Participation (KII–2018), Moscow, 24–27 September 2018*, vol. 1, pp. 106–115 (in Russian).

About the authors

Yury F. Telnov

Dr. Sci. (Econ.), Professor;

Head of the Department of Applied Information Technologies and Information Security, Plekhanov Russian University of Economics, 36, Stremyanny Lane, Moscow 117997, Russia;

E-mail: Telnov.YUF@rea.ru

ORCID: 0000-0002-2983-8232

Vasily A. Kazakov

Cand. Sci. (Econ.);

Leading Researcher, Research Institute "Strategic Information Technologies", Plekhanov Russian University of Economics, 36, Stremyanny Lane, Moscow 117997, Russia;

E-mail: Kazakov.VA@rea.ru

ORCID: 0000-0001-8939-2087

Andrey V. Danilov

Senior Lecturer, Department of Applied Information Technologies and Information Security, Plekhanov Russian University of Economics, 36, Stremyanny Lane, Moscow 117997, Russia;

E-mail: Danilov.AV@rea.ru

ORCID: 0000-0002-0433-9701