

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
Отделение нанотехнологий и информационных технологий

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ
ИНСТИТУТ ИНФОРМАТИКИ И АВТОМАТИЗАЦИИ РАН

ТРУДЫ СПИИРАН

proceedings.spiiras.nw.ru



ВЫПУСК 4(41)



Санкт Петербург
2015

18+

Труды СПИИРАН

Выпуск № 4(41), 2015

Научный, научно-образовательный, междисциплинарный журнал с базовой специализацией в области информатики, автоматизации и прикладной математики

Журнал основан в 2002 году

Учредитель и издатель

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук
(СПИИРАН)

Главный редактор

Р.М. Юсупов, чл.-корр. РАН, д-р техн. наук, проф., С-Петербург, РФ

Редакционная коллегия

А.А. Ашимов , академик национальной академии наук Республики Казахстан д-р техн. наук, проф., Алматы, Казахстан	А.Л. Ронжин (зам. главного редактора), д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ
С.Н. Баранов , д-р физ.-мат. наук, проф., С.-Петербург, РФ	А.И. Рудской , член-корр. РАН, д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ
Н.П. Веселкин , академик РАН, д-р мед. наук, проф., С.-Петербург, РФ	В.А. Сарычев , д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ
В.И. Городецкий , д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ	В. Стурев , академик Болгарской академии наук, д-р техн. наук, проф., София, Болгария
О.Ю. Гусихин , Ph.D., Диаборн, США	В.А. Скормин , Ph.D., проф., Бингемптон, США
В. Делич , д-р техн. наук, проф., Нови-Сад, Сербия	А.В. Смирнов , д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ
А.Б. Долгий , Dr. Habil., проф., Сент-Этьен, Франция	Б.Я. Советов , академик РАО, д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ
М. Железны , Ph.D., доцент, Пльзень, Чешская республика	В.А. Соифер , член-корр. РАН, д-р техн. наук, проф., Самара, РФ
Д.А. Иванов , д-р экон. наук, проф., Берлин, Германия	Б.В. Соколов , д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ
О.С. Ипатов , д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ	Л.В. Уткин , д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ
В.П. Леонов , д-р пед. наук, проф., С.-Петербург, РФ	А.Л. Фрадков , д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ
Г.А. Леонов , член-корр. РАН, д-р физ.-мат. наук, проф., С.-Петербург, РФ	Н.В. Хованов , д-р физ.-мат. наук, проф., С.-Петербург, РФ
К.П. Марков , Ph.D., доцент, Аизу, Япония	Д.С. Черешкин , д-р техн. наук, проф., Москва, РФ
Ю.А. Меркурьев , академик Латвийской академии наук, Dr. Habil., проф., Рига, Латвия	Л.Б. Шереметов , д-р техн. наук, Мехико, Мексика
Н.А. Молдовян , д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ	А.В. Язенин , д-р техн. наук, профессор, Тверь, РФ
А.А. Петровский , д-р техн. наук, проф., Минск, Беларусь	
В.В. Попович , д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ	
В.А. Путилов , д-р техн. наук, проф., Апатиты, РФ	

Адрес редакции

191718, Санкт-Петербург, 14-я линия, д. 39,

e-mail: publ@iias.spb.su, сайт: <http://www.proceedings.spiiras.nw.ru/>

Подписано к печати 15.08.2015. Формат 60×90 1/16. Усл. печ. л. 14,0. Заказ № 203. Тираж 200 экз., цена свободная
Отпечатано в Редакционно-издательском центре ГУАП, 190000, Санкт-Петербург, Б. Морская, д. 67

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи и массовых коммуникаций,
свидетельство ПИ № ФС77-41695 от 19 августа 2010 г.
Подписной индекс 29393 по каталогу «Почта России»

Журнал входит в «Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертации на соискание ученой степени доктора и кандидата наук»

© Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук, 2015

Разрешается воспроизведение в прессе, а также сообщение в эфир или по кабелю опубликованных в составе печатного периодического издания-журнала «Труды СПИИРАН» статей по текущим экономическим, политическим, социальным и религиозным вопросам с обязательным указанием имени автора статьи и печатного периодического издания-журнала «Труды СПИИРАН»

SPIIRAS Proceedings

Issue № 4(41), 2015

Scientific, educational, and interdisciplinary journal primarily specialized
in computer science, automation, and applied mathematics

Trudy SPIIRAN ♦ Founded in 2002 ♦ Труды СПИИРАН

Founder and Publisher

Federal State Budget Institution of Science

St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences
(SPIIRAS)

Editor-in-Chief

R.M. Yusupov, Prof., Dr. Sci., Corr. Member of RAS, St. Petersburg, Russia

Editorial Board Members

A.A. Ashimov, Prof., Dr. Sci., Academician
of the National Academy of Sciences of the
Republic of Kazakhstan, Almaty, Kazakhstan
S.N. Baranov, Prof., Dr. Sci., St. Petersburg, Russia
N.P. Veselkin, Prof., Dr. Sci., Academician of RAS,
St. Petersburg, Russia
V.I. Gorodetski, Prof., Dr. Sci., St. Petersburg, Russia
O.Yu. Gusikhin, Ph. D., Dearborn, USA
V. Delic, Prof., Dr. Sci., Novi Sad, Serbia
A. Dolgui, Prof., Dr. Habil., St. Etienne, France
M. Zelezny, Assoc. Prof., Ph.D., Plzen, Czech
Republic
D.A. Ivanov, Prof., Dr. Habil., Berlin, Germany
O.S. Ipatov, Prof., Dr. Sci., St. Petersburg, Russia
V.P. Leonov, Prof., Dr. Sci., St. Petersburg, Russia
G.A. Leonov, Prof., Dr. Sci., Corr. Member of RAS,
St. Petersburg, Russia
K.P. Markov, Assoc. Prof., Ph.D., Aizu, Japan
Yu.A. Merkurjev, Prof., Dr. Habil., Academician
of the Latvian Academy of Sciences, Riga, Latvia
N.A. Moldovian, Prof., Dr. Sci., St. Petersburg, Russia
A.A. Petrovsky, Prof., Dr. Sci., Minsk, Belarus
V.V. Popovich, Prof., Dr. Sci., St. Petersburg, Russia
V.A. Putilov, Prof., Dr. Sci., Apatity, Russia

A.L. Ronzhin (Deputy Editor-in-Chief),
Prof., Dr. Sci., St. Petersburg, Russia
A.I. Rudskoi, Prof., Dr. Sci., Corr. Member of RAS,
St. Petersburg, Russia
V.A. Saruchev, Prof., Dr. Sci., St. Petersburg,
Russia
V. Sgurev, Prof., Dr. Sci., Academician
of the Bulgarian academy of sciences, Sofia,
Bulgaria
V. Skormin, Prof., Ph.D., Binghamton, USA
A.V. Smirnov, Prof., Dr. Sci., St. Petersburg, Russia
B.Ya. Sovetov, Prof., Dr. Sci., Academician of RAE,
St. Petersburg, Russia
V.A. Soyfer, Prof., Dr. Sci., Corr. Member of RAS,
Samara, Russia
B.V. Sokolov, Prof., Dr. Sci., St. Petersburg, Russia
L.V. Utkin, Prof., Dr. Sci., St. Petersburg, Russia
A.L. Fradkov, Prof., Dr. Sci., St. Petersburg, Russia
N.V. Hovanov, Prof., Dr. Sci., St. Petersburg,
Russia
D.S. Chereshekin, Prof., Dr. Sci., Moscow, Russia
L.B. Sheremetov, Assoc. Prof., Dr. Sci., Mexico,
Mexico
A.V. Yazenin, Prof., Dr. Sci. Tver, Russia

Editorial Board's address

14-th line VO, 39, SPIIRAS, St. Petersburg, 199178, Russia,

e-mail: publ@iias.spb.su, web: <http://www.proceedings.spiiras.nw.ru/>

Signed to print 15.08.2015

Printed in Publishing center GUAP, 67, B. Morskaya, St. Petersburg, 190000, Russia

The journal is registered in Russian Federal Agency for Communications and Mass-Media Supervision,
certificate ПИ № ФС77-41695 dated August 19, 2010 r.

Subscription Index 29393, Russian Post Catalog

© Federal State Budget Institution of Science

St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences, 2015

СОДЕРЖАНИЕ

Алабян А.М., Зеленцов В.А., Крыленко И.Н., Потрясаев С.А., Соколов Б.В., Юсупов Р.М. ОПЕРАТИВНОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ НАВОДНЕНИЙ НА ОСНОВЕ КОМПЛЕКСНОГО УПРЕЖДАЮЩЕГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И ИНТЕГРАЦИИ РАЗНОРОДНЫХ ДАННЫХ Калинин В.Н.	5
О НЕКОТОРЫХ ЗАДАЧАХ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННЫМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕМ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА С ПОВЕРХНОСТЬЮ ЗЕМЛИ Орешин А.Н., Сайтов И.А., Орешин Н.А.	34
СТРАТЕГИЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА УСЛУГ ВИДЕОСВЯЗИ НА ОСНОВЕ ФИЛЬТРАЦИИ ВИДЕОПОТОКА, СОДЕРЖАЩЕГО КАДРЫ-ВСТАВКИ С ИНФОРМАЦИОННЫМ ШУМОМ	57
Хомоненко А.Д., Яковлев Е.Л. НЕЙРОСЕТЕВАЯ АППРОКСИМАЦИЯ ХАРАКТЕРИСТИК МНОГОКАНАЛЬНЫХ НЕМАРКОВСКИХ СИСТЕМ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ	81
Ершов А.Л. ИДЕНТИФИКАЦИЯ АЛГОРИТМОВ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ДАННЫХ В ИСПОЛНЯЕМЫХ МОДУЛЯХ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ	94
Копкин Е.В., Чикуров В.А., Алейник В.В., Лазутин О.Г. АЛГОРИТМ ПОСТРОЕНИЯ ГИБКОЙ ПРОГРАММЫ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА ПО КРИТЕРИЮ ЦЕННОСТИ ПОЛУЧАЕМОЙ ИНФОРМАЦИИ	106
Бирюков Д.Н. АССОЦИАТИВНО-РЕФЛЕКТОРНАЯ ПАМЯТЬ КИБЕРСИСТЕМЫ ДЛЯ СИНТЕЗА УПРЕЖДАЮЩИХ РЕАКЦИЙ, НЕЙТРАЛИЗУЮЩИХ ВРЕДНОСНЫЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ	131
Агеев С.А. ПРИМЕНЕНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ МЕТОДОВ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ РИСКАМИ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ В ЗАЩИЩЕННЫХ МУЛЬТИСЕРВИСНЫХ СЕТЯХ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ	149
Доломатов М.Ю., Мартынов В.В., Журавлева Н.А., Филосова Е.И., Закиева Е.Ш. ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА РАСЧЕТА СОЦИАЛЬНОЙ НАПРЯЖЕННОСТИ ОБЩЕСТВА НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ ЗАКОНОВ РАВНОВЕСНОЙ ТЕРМОДИНАМИКИ	163
Микони С.В. СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ НА КОНЕЧНОМ МНОЖЕСТВЕ АЛЬТЕРНАТИВ	180
Мусаев А.А. КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ АНАЛИЗ ХАОТИЧЕСКОЙ ДИНАМИКИ ВАЛЮТНОГО РЫНКА	200
Гейда А.С., Исмаилова З.Ф., Клитный И.В., Лысенко И.В. ОТНОШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ, ПОТЕНЦИАЛА СИСТЕМ И СМЕЖНЫХ ОПЕРАЦИОННЫХ СВОЙСТВ	218

CONTENTS

Alabyan A.M., Zelentsov V.A., Krylenko I.N., Potryasaev S.A., Sokolov B.S., Yusupov R.M. OPERATIONAL FLOOD FORECASTING ON THE BASIS OF COMPLEX PROACTIVE MODELING AND INTEGRATION OF HETEROGENEOUS DATA	5
Kalinin V.N. ON SOME PROBLEMS OF OPTIMUM CONTROL OF INFORMATIONAL INTERACTION OF A SPACE VEHICLE WITH THE SURFACE OF THE EARTH	34
Oreshin A.N., Saitov I.A., Oreshin N.A. STRATEGY OF THE VIDEO COMMUNICATION SERVICES QUALITY ENHANCEMENT BASED ON THE FILTRATION OF A VIDEO STREAM CONTAINING SNAP-INSERTIONS WITH INFORMATION NOISE	57
Khomonenko A.D., Yakovlev E.L. NEURAL NETWORK APPROXIMATION OF CHARACTERISTICS OF MULTI-CHANNEL NON-MARKOVIAN QUEUEING SYSTEMS	81
Ershov A.L. IDENTIFICATION OF DATA CONVERSION ALGORITHMS IN EXECUTABLE SOFTWARE MODULES	94
Kopkin E.V., Chikurov V.A., Aleynik V.V., Lazutin O.G. ALGORITHM FOR CONSTRUCTING A FLEXIBLE PROGRAM FOR TECHNICAL OBJECT DIAGNOSING ON THE CRITERION OF RECEIVED INFORMATION VALUE	106
Biryukov D.N. ASSOCIATIVE-REFLEX MEMORY OF CYBERSYSTEM FOR SYNTHESIS OF THE ANTICIPATORY REACTIONS NEUTRALIZING HARMFUL INFLUENCES	131
Ageev S.A. APPLICATION OF INTELLIGENT METHODS OF INFORMATION REPRESENTATION TO MANAGE INFORMATION SECURITY RISKS IN SECURE MULTISERVICE SPECIAL-PURPOSE NETWORKS	149
Dolomatov M.Ju., Martynov V.V., Zhuravleva N.A., Filosofova E.I., Zakieva E.Sh. INFORMATION SYSTEM FOR SOCIAL DISSATISFACTION CALCULATING BASED ON APPLICATION OF THE LAW OF EQUILIBRIUM THERMODYNAMICS	163
Mikoni S.V. SYSTEM ANALYSIS OF MULTI-CRITERIA OPTIMIZATION METHODS ON A FINITE SET OF ALTERNATIVES	180
Musaev A.A. CORRELATION ANALYSIS OF THE CURRENCY MARKET CHAOTIC DYNAMICS	200
Geida A.S., Ismailova Z.F., Klitnyu I.V., Lysenko I.V. RELATIONS OF EFFECTIVENESS OF SYSTEM FUNCTIONING, SYSTEM POTENTIAL AND ADJACENT OPERATIONAL PROPERTIES	218

А.М. АЛАБЯН, В.А. ЗЕЛЕНЦОВ, И.Н. КРЫЛЕНКО, С.А. ПОТРЯСАЕВ,
Б.В. СОКОЛОВ, Р.М. ЮСУПОВ
**ОПЕРАТИВНОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ НАВОДНЕНИЙ НА
ОСНОВЕ КОМПЛЕКСНОГО УПРЕЖДАЮЩЕГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ И ИНТЕГРАЦИИ РАЗНОРОДНЫХ
ДАННЫХ**

Алабян А.М., Зеленцов В.А., Крыленко И.Н., Потрысаев С.А., Соколов Б.В., Юсупов Р.М.
Оперативное прогнозирование наводнений на основе комплексного упреждающего моделирования и интеграции разнородных данных.

Аннотация. В статье описаны основы построения и практическая реализация систем оперативного прогнозирования речных наводнений, базирующиеся на интегрированном использовании современных разработок в области информационных технологий и комплексного упреждающего (проактивного) моделирования. Отличительными особенностями предлагаемого междисциплинарного подхода являются: а) широкое использование разнородных данных, получаемых от сети гидропостов и от космических аппаратов дистанционного зондирования Земли, б) реализация систем прогнозирования на базе сервис-ориентированной архитектуры, в) создание интеллектуального интерфейса для выбора типа и настройки параметров гидрологических моделей, и обеспечение удобного представления и доступности результатов прогноза, в том числе в виде Веб-сервисов. Практическая апробация созданного программного прототипа системы подтвердила возможность получения в автоматическом режиме высокоточного оперативного (от нескольких часов до нескольких суток) прогноза зон и глубин затоплений участков речных долин.

Ключевые слова: системы мониторинга, наземно-космический мониторинг, моделирование наводнений, прогнозирование наводнений, прогнозирование.

Alabyan A.M., Zelentsov V.A., Krylenko I.N., Potrysaev S.A., Sokolov B.V., Yusupov R.M.
Operational Flood Forecasting on the Basis of Complex Proactive Modeling and Integration of Heterogeneous Data.

Abstract. The article describes the basics of creating operational river flood forecasting systems, based on the integrated use of modern information technologies and integrated proactive modeling. Their practical implementation is also shown. The distinctive features of the proposed interdisciplinary approach are: a) the widespread use of heterogeneous data from a network of gauging stations and Earth remote sensing satellites; b) implementation of forecasting systems based on service-oriented architecture; c) creation of an intelligent interface for selecting the type and parameter setting of hydrological models; d) ensuring convenient and accessible presentation of the forecast results using web-services. Practical testing of the developed software prototype has confirmed the possibility of automatic high-precision operational (from several hours to several days) forecasting of flooding zones and depths of river valleys.

Keywords: monitoring systems, space-ground monitoring, flood modeling, proactive modeling, forecasting.

1. Введение. Мониторинг и прогнозирование наводнений являются в настоящее время ключевыми задачами при обеспечении безопасности жизнедеятельности в населенных пунктах, расположенных в долинах рек. Своевременное предупреждение служб по чрезвычайным ситуациям и населения о надвигающейся угрозе

является условием сохранения жизни и здоровья людей, а также минимизации экономического ущерба в потенциально опасных районах. Крупные города и малые населенные пункты нашей страны за последние годы неоднократно подвергались разрушительному воздействию наводнений, причем в значительных масштабах. По прогнозам, указанная тенденция, как и тренд учащения крупномасштабных природных бедствий гидрологического характера, в обозримом будущем сохранится [1–3]. Это подтверждают, в частности, произошедшие в последние годы катастрофические наводнения в г. Крымске, на реке Амур, в Алтайском крае, Республике Алтай и Хакасии. Серьезные наводнения происходили в эти годы и в Европе: в Сербии, Боснии и Герцеговине, Германии, Болгарии.

Поэтому прогнозирование наводнений, вызываемых весенними половодьями и паводками различного происхождения, является одной из основных задач современной науки [4]. Достоверное и своевременное решение подобных задач имеет первостепенное практическое значение для оценивания ущербов от стихийных бедствий, своевременного принятия превентивных мер и минимизации экономических последствий от наводнений, для управления строительством и режимами функционирования гидротехнических сооружений.

Известные в нашей стране и за рубежом ученые, проводящие исследования по данной проблематике, за последнее время неоднократно, в том числе на страницах Вестника РАН [4, 5], обращались к теме необходимости создания отечественных информационных систем для прогнозирования наводнений. При этом анализировался зарубежный опыт построения подобных систем, и отмечено успешное применение проектных подходов, включающих привлечение значительного числа разнопрофильных организаций, скоординированно работающих над решением поставленной задачи. Такое взаимодействие является оправданным и заслуживающим широкого распространения, поскольку создание систем прогнозирования наводнений носит принципиально междисциплинарный характер и требует участия специалистов различного профиля: как минимум - гидрологов и специалистов по автоматизации моделирования и современным информационным технологиям, по интегрированной обработке разнородных данных, в том числе данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ).

С научно-методической точки зрения одной из основных проблем, возникающих при решении задач прогнозирования наводнений, является обеспечение высокого или требуемого качества

прогноза при имеющемся и фактически доступном объеме исходных данных.

Требования к составу и объему исходных данных определяются типом гидрологической задачи (например, прогноз половодья, паводка, нагона или волны прорыва) и величиной интервала прогноза. Долгосрочный и среднесрочный прогнозы требуют больших объемов исходных данных, таких как характеристики снежного покрова, свойства почв, растительности на водосборе, метеорологических характеристики, и др. В результате долгосрочного и среднесрочного прогнозирования формируются, как правило, обобщенные оценки гидрологической обстановки в анализируемом районе, *возможные* границы зон затопления территории при тех или других *сценариях* развития гидрологической ситуации, а также определение гидравлических параметров водного потока на затопленной территории. Но существующая степень достоверности исходных данных, прежде всего о климатических факторах, не позволяет достаточно точно оценить границы, глубины и время затопления каждого конкретного участка территории. А именно это зачастую необходимо тем лицам и организациям, которые должны использовать результаты прогноза при планировании и проведении аварийно-спасательных мероприятий, а также населению, оказавшемуся в зоне потенциального затопления.

В этом смысле особенное значение имеют методы, технологии и системы оперативного (краткосрочного) прогнозирования наводнений, основанные на численном моделировании перемещения волны половодий и паводков, предназначенные для получения высокоточных оценок параметров затоплений в интервале от нескольких часов до нескольких суток [4]. Состав гидрометеорологических исходных данных в данном случае определяется, прежде всего, достаточно точными результатами измерений текущего уровня и расхода воды при уже начавшемся процессе нарастания интенсивности водного потока.

Необходимо отметить, что именно высокоточное оценивание возможных границ затоплений и уровней подъема воды через заданный интервал времени принципиально отличает рассматриваемые задачи прогнозирования от задач *мониторинга* наводнений, фиксирующих границы зон *уже состоявшихся разливов воды*, и задач *геоинформационного моделирования* [7], позволяющих оценить *возможные* границы зон разлива воды при тех или других *потенциально возможных* уровнях ее подъема.

2. Общий состав систем оперативного прогнозирования наводнений. Научно-методическую основу прогнозирования наводнений составляет анализ количественных связей между

факторами, определяющими их возникновение (снегозапас, жидкие осадки, температура воздуха и т.п.), и гидравлическими параметрами половодного потока [6]. Инерционность природных процессов и наличие хорошо изученных взаимосвязей между ключевыми гидрометеорологическими параметрами, проявляющимися, как правило, с некоторым временным лагом, позволяет выполнять гидрологические прогнозы. В то же время хорошо проработанные и широко применяемые в настоящее время классические методы расчета уровней и расходов воды сами по себе зачастую не могут в оперативном режиме обеспечить пользователей необходимой упреждающей информацией об опасных изменениях водного режима на конкретных участках речных долин, особенно расположенных на значительном удалении от гидрологических постов. Кроме гидрологического моделирования, большое значение при разработке систем оперативного прогнозирования имеет применение современных информационных технологий, обеспечивающих оперативное получение и ввод исходных данных, их обработку и представление результатов на картографической основе в доступной и удобной форме, не требующей от пользователей специальных знаний для интерпретации результатов моделирования.

Можно выделить следующие основные проблемы, для решения которых требуется привлечение современных информационных технологий:

1. Проблема получения, автоматизации сбора и обработки исходных данных из всех доступных источников.

Здесь можно выделить три направления. Первое – необходимость широкого использования и автоматизации процедур обработки материалов космической и (или) авиационной съемки для предварительного формирования цифровой картографической основы анализируемого участка территории (с нанесением границ русла реки, подтопляемых объектов, защитных и гидротехнических сооружений, и т.д.); создания цифровых моделей рельефа (ЦМР), валидации и верификации гидрологических моделей [8, 9]. Второе – обеспечение расчетов результатами измерений расхода и уровня воды в условиях существующей разреженной сети гидрологических постов. В настоящее время достаточно хорошо отработаны и практически апробированы мобильные оперативно устанавливаемые регистраторы уровня, осуществляющие передачу результатов измерений по каналам связи с возможностью автоматической загрузки этих результатов в моделирующие комплексы [10]. Третье – использование технологий краудсорсинга для получения дополнительных данных для адаптации и

валидации гидрологических моделей [11]. Дополнительный эффект при решении рассматриваемой проблемы может быть получен за счет интегрированной обработки всех типов входных данных с синхронизацией моментов поступления той или иной исходной информации, в том числе данных дистанционного зондирования Земли [12–16].

2. Проблема выбора и адаптации используемых моделей и полимодельных комплексов.

Для достижения высокого качества прогнозов принципиально важным является использование при расчетах не одной, а комплекса (ансамбля) гидрологических моделей с возможностью выбора типа и параметров моделей в зависимости от особенностей участка моделирования, характера движения воды по руслу и пойме, состава исходных данных и ряда других факторов. Использование полимодельного подхода, предполагающего наличие комплекса гидрологических моделей и применение наиболее адекватной из них для каждой конкретной ситуации, может существенно повысить качество прогноза, но требует разработки и реализации новых методов автоматического (либо интерактивного) выбора типа модели и настройки ее параметров. Другими словами, требуется привнесение элементов искусственного интеллекта в архитектуру систем оперативного прогнозирования наводнений. Научно-методическую базу такого подхода составляет разрабатываемая авторами данной статьи теория квалиметрии моделей и полимодельных комплексов [17].

3. Проблема доступности результатов прогнозирования.

Основными параметрами наводнений, интересующими конечного пользователя, являются границы потенциально затопляемых территорий, глубины затопления и скорости течения в каждый момент времени на прогнозируемом интервале. Наиболее удобным способом представления результатов моделирования является их отображение в виде динамичной картины изменения границ, глубин затопления и скоростного поля потока с отражением на картографической основе объектов в зоне затопления. Крайне желательно, чтобы эти результаты были реализованы в виде Веб-сервисов, в том числе были доступны при работе с различными персональными цифровыми устройствами (в том числе, планшетными компьютерами, смартфонами и т.п.). В настоящее время накоплен достаточно большой опыт решения и задач этого класса [18].

Проведенный анализ показал, что в настоящее время существуют все необходимые условия для создания систем оперативного прогнозирования наводнений с описанными свойствами: с одной

стороны, это хорошо проработанные и неоднократно апробированные гидрологические модели для различных типов русел и речных долин [19–22], с другой стороны, получившие в последнее время развитие и практическую реализацию необходимые для создания таких систем информационные технологии, в том числе связанные с автоматизацией и интеллектуализацией моделирования [8]. Интеграция этих двух направлений приводит к созданию систем принципиально нового класса – *интеллектуальных информационных систем* оперативного мониторинга и упреждающего моделирования (далее в статье ИИС).

Как следует из изложенного, основными компонентами системы, обеспечивающей решение задач оперативного мониторинга и упреждающего моделирования наводнений, должны являться:

подсистемы получения, ввода и интегрированной обработки данных наземных измерений и материалов аэрокосмосъемки;

информационно-моделирующая подсистема, включающая комплекс гидрологических моделей, а также технологии выбора и адаптации указанных моделей;

подсистема визуализации и доступа к результатам моделирования на основе геопортальных решений и Веб – технологий.

3. Использование данных дистанционного зондирования Земли. При реализации первой из подсистем необходимо учитывать, что исходная информация для решения задач оперативного прогнозирования включает, как минимум, следующие компоненты: векторизованные топографические карты необходимого масштаба, цифровые модели рельефа (или материалы съемок для их разработки), данные режимных наблюдений за расходами и уровнями воды с гидрологических постов и данные специальных гидрологических съемок.

Учитывая обширность речных пойм и недостаток существующих наземных данных, для реализации первой из перечисленных подсистем целесообразно широко использовать методы дистанционного зондирования Земли, в том числе из космоса.

Данные ДЗЗ являются во многих случаях основой проведения мониторинга наводнений как самостоятельной задачи. Их включение в состав систем прогнозирования наводнений позволяет компенсировать недостаток наземных данных, и провести дополнительную адаптацию используемых моделей. Можно выделить следующие направления применения данных ДЗЗ при построении ИИС:

1) Актуализация картографической информации о современной инфраструктуре в речных долинах - границах населенных пунктов в

зоне затопления, дорогах, линейных сооружениях, влияющих на структуру потока на пойме, а также о конфигурации речных русел. Для этих целей необходимы космические снимки высокого пространственного разрешения в видимом диапазоне (получаемые, например, с космических аппаратов (КА) Ресурс-П, GeoEye, WordView), а также материалы аэрофотосъемки (получаемые, в том числе, с помощью беспилотных летательных аппаратов (БПЛА)) в период летне-осенней межени.

2) Получение информации о рельефе речных долин. Для этих целей перспективными являются ЦМР, полученные на основе высокодетальных космических и авиационных съемок. В настоящее время основные возможности получения более точных и пригодных к использованию моделей рельефа связаны с программами работы радарных КА TerraSAR и TanDem по созданию ЦМР Земли с разрешением по высоте порядка 2 м, а также применение для локальных участков съемок с БПЛА, или лазерного сканирования, обеспечивающих сантиметровую точность при построении ЦМР.

3) Калибровка и верификация гидродинамических моделей на основе информации о границах затопления территории с космических снимков [12] и по результатам краудсорсинга. Калибровочными параметрами гидродинамических моделей являются сведения о шероховатости подстилающей поверхности, определяющей гидравлическое сопротивление, и характеризуемой, как правило, коэффициентом шероховатости. Задание полей коэффициентов шероховатости в первом приближении проводится на основе дешифрирования и выделения областей с различным характером растительного покрова и микрорельефа и подбором для них значений коэффициентов по таблицам Срибного, Чоу, Карасева и др. [23]. Для этих целей применимы снимки как среднего, так и высокого разрешения. Обычно выделяется 5–6 основных типов подстилающей поверхности (русла, пашня, луг, лес, городская застройка). Для дешифрирования выделенных типов поверхности успешно разрабатываются и применяются методы и технологии автоматизированной обработки данных [24, 25].

Необходимо отметить, что максимально достоверные результаты расчетов могут быть получены только в результате совместной, интегрированной обработки различных типов данных, полученных в ходе наземных и аэрокосмических измерений.

4. Гидродинамические модели движения речного потока. Базовыми компонентами информационно-моделирующей подсистемы являются гидрологические модели. Независимо от способа конкретной

программной реализации в основу математических моделей движения водных потоков чаще всего положено решение системы уравнений Сен-Венана. Водный поток, при записи системы уравнений Сен-Венана, может быть представлен как в одномерной (характеристики потока осреднены по поперечному сечению), так и в двумерной (осреднение по глубине) схематизации.

К настоящему времени в разных странах разработано и применяется в практических расчетах значительное количество таких моделей: российские программные комплексы *Flood, River u STREAM_2D*, разработанные В.В. Беликовым, А.Н. Милитеевым и др. [26], *Mike 11, Mike 21* Датского гидрологического института [27], *Delft 3D* Института Deltares г. Дельфт (Нидерланды) [28], *HEC-RAS* Американского корпуса военных инженеров [29], *FLO-2D* [30], французский *TELEMAC* и др. Модели различаются, в основном, способами схематизации расчетной области (треугольные, четырехугольные и смешанные сетки), применяемыми схемами и методами (конечных разностей, конечных элементов), набором дополнительных блоков (распространение примесей, транспорт наносов и т.п.). В России наибольшее распространение получила двумерная модель *River* [6, 26, 31], обновленная версия которой выпущена в 2014 г. и зарегистрирована в Роспатенте под названием *STREAM_2D* [32].

При создании автоматизированных систем оперативного прогнозирования наводнений первоочередное значение имеет тот факт, что, как уже отмечалось выше, не существует универсальной модели, пригодной для описания процессов развития наводнений на различных по протяженности и конфигурации участках рек. При выборе гидродинамических моделей для решения задач прогнозирования наводнений целесообразна реализация многомодельного подхода: в зависимости от протяженности участка мониторинга и наличия исходной информации возможен выбор между одномерными гидродинамическими моделями для протяженных (100–1000 км) участков, и двумерными моделями для участков речных долин длиной менее 100 км при значительной ширине русел и пойм, их сложной конфигурации, расположении различных сооружений в руслах и на поймах. Значительного эффекта в экономии сил и средств при исследовании и мониторинге протяженных речных объектов можно достичь за счет совместного (гибридного, комплексного, многомасштабного) расчета по одномерной и двумерной моделям.

Поэтому одним из принципиальных вопросов создания информационных систем и систем прогнозирования наводнений

является формирование механизма выбора наиболее адекватной гидрологической модели для конкретных условий.

5. Методы выбора и адаптации гидрологических моделей. К настоящему времени достаточно хорошо развиты теория, методы и технологии создания и использования различных классов моделей (концептуальных, математических, логико-алгебраических, логико-лингвистических, их комбинаций и т.п.) сложных объектов (СЛО) и процессов (СлП) [33]. Вместе с тем, как показал проведенный анализ, в современных условиях практически остаётся нерешённой проблема оценивания качества моделей, анализа и упорядочения различных классов моделей, обоснованного синтеза новых моделей либо выбора из числа уже существующих моделей наиболее предпочтительных, предназначенных для решения конкретных прикладных задач. Актуальность данной проблемы в ещё большей степени усиливается в том случае, когда исследуемый объект описывается не одной моделью, а полимодельным комплексом, в состав которого могут входить разнородные и комбинированные модели, каждая из которых должна оцениваться своей системой показателей [33]. Дополнительную сложность указанная проблема приобретает в том случае, когда при оценивании качества моделей приходится учитывать фактор времени. Это касается, прежде всего, тех объектов-оригиналов, у которых под действием различных причин (объективных, субъективных, внутренних, внешних и т.п.) наблюдается существенная структурная динамика [34]. В этих условиях для того, чтобы используемые модели сохраняли свою точность и полезность, необходимо проводить их адаптацию к изменяющимся условиям. Для этого необходимо заранее, на этапе синтеза модели, в состав её параметров и структур вводить дополнительные элементы, которые на этапе непосредственного использования модели позволят управлять ее качеством – снизят чувствительность модели и соответствующих показателей ее качества к изменениям состава, структуры и содержания исходных данных.

К настоящему времени в рамках разрабатываемой авторами общей квалиметрии моделей и полимодельных комплексов создано несколько технологий их структурно-параметрической адаптации. Одна из них применительно к задачам оперативного прогнозирования наводнений представлена на рисунке 1.

развиваемые в настоящее время в рамках теории эволюционного моделирования [35].

В целом, создание интеллектуального интерфейса обеспечивает получение синергетического эффекта от совместной обработки и использования разнородных наземно-космических данных и применения комплекса моделей для оценки зон возможных затоплений.

6. Архитектура интеллектуальных информационных систем.

Как следует из описанного выше состава ИИС, она должна обеспечивать гибкое взаимодействие целого ряда компонентов, включая существующие и перспективные программные модули, реализующие гидрологические модели, модули обработки входных данных и визуализации результатов прогнозирования, управляющие модули, и др. С этой точки зрения целесообразно построение ИИС на базе сервис-ориентированной архитектуры (Software as a Service, SaaS) [36]. В этом случае основу предлагаемой ИИС составляют три компонента: управляющее приложение, сервисная шина и интеллектуальный интерфейс.

Общий состав системы приведен на рисунке 2.

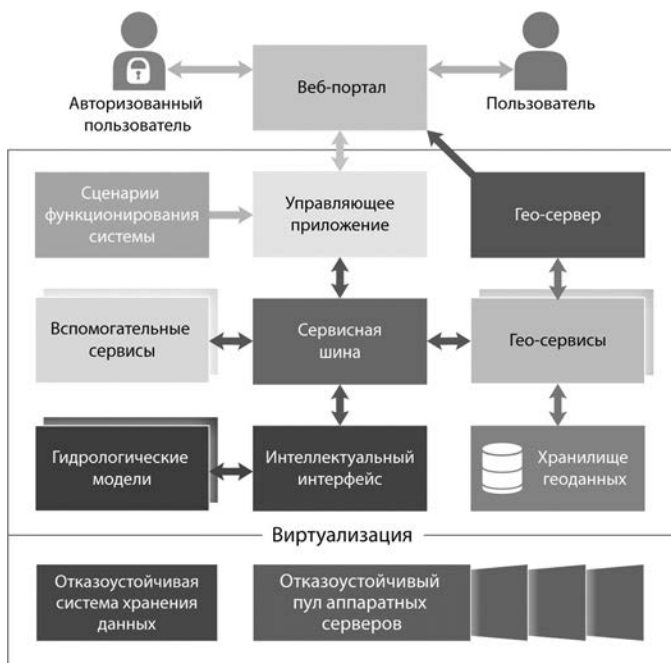


Рис. 2. Структура ИИС

Управляющее приложение предназначено для реализации логики работы системы, которая определяется взаимосвязью операций сбора, обработки данных, опубликования и визуализации данных.

Сервисная шина в данном случае – это программное ядро, хранящее информацию об имеющихся в системе сервисах. Под сервисами понимаются отдельные слабо связанные программные модули, реализующие технологические операции, например, сбор данных от внешних датчиков, обработка космоснимка, публикация векторной карты на геосервере, и другие.

Сервис-ориентированная архитектура системы оперативного прогнозирования наводнений и свойственная ей слабая связность программных модулей позволяют повысить гибкость и перевести разрабатываемую систему в формат «облачного» приложения, реализуемого как сервис, посредством процесса виртуализации ресурсов аппаратного обеспечения. В частности, модули, реализующие алгоритмы обработки данных, прогнозирования и поддержки принятия решений, могут быть значительно распределены территориально и структурно, выполняться на вычислительных мощностях, находящихся не только в разных городах, но и принадлежащих разным организациям. При этом синтезированная система прогнозирования точки зрения конечного пользователя будет функционировать как единое целое локальное решение.

Обязательное требование, реализуемое в рассматриваемой системе – наличие режима автоматической работы, предполагающего выполнение в заданные интервалы времени полного рабочего цикла (сбор данных, моделирование гидрологических процессов, визуализация результатов) без вмешательства оператора.

7. Подсистема доступа к результатам прогнозирования.

Оперативность анализа ситуаций, связанных с наводнениями, и принятие мер по управлению этими ситуациями зачастую зависят от удобства и оперативности доступа к результатам прогнозирования.

В существующих в настоящее время отечественных программных комплексах в результате работы гидрологических моделей, как правило, формируется массив данных, подробно описывающих прогноз наводнений в виде таблиц, матриц уровней, списков значений множества показателей, и т.д. Эти данные могут быть интерпретированы только специалистами. В то же время у широкого круга заинтересованных лиц и организаций существует потребность *оперативного получения* и анализа данных о предстоящем наводнении. Для устранения этого противоречия необходима подсистема

интерпретации, визуализации и распространения информации о прогнозе наводнения.

Ключевой особенностью указанной подсистемы является обеспечение доступности результатов прогнозирования, которая включает:

- доступность интерпретации данных, заключающуюся в автоматизации процесса преобразования большого объёма разнородных технических данных в понятные неспециалисту графические образы (контур затопления на карте местности, графики и диаграммы);

- территориальную доступность информации, достигаемую через распространение результатов прогноза по каналам связи: Интернет, телефонные сети, системы оповещений о чрезвычайных ситуациях;

- доступность накопленного архива прогнозной и реальной информации, необходимой для проведения верификации и корректировки гидрологических моделей и выполнения аналитических работ.

Перечисленные особенности реализуются за счёт применения набора стандартизованных протоколов хранения, обработки и передачи информации.

Основой для хранения пространственно-временной информации является пространственная база данных (БД). К настоящему времени многие классические системы управления базами данных (СУБД) имеют поддержку пространственных данных: OracleSpatial, Microsoft SQL Server, PostgreSQL (расширение PostGIS), MySQL (поддержка типа данных geometry). Пространственные БД позволяют хранить целостный пространственный объект (геометрию и атрибутивную информацию). Кроме того, такие БД позволяют выполнять пространственные аналитические запросы (пересечение, объединение, вычисление площадей и расстояний и т.п.). Таким образом, становится возможным автоматизировать процессы обработки и анализа массивов данных, поступающих от гидрологических моделей.

Несмотря на то, что геоинформационные системы (ГИС) успешно используются специалистами на протяжении уже более 40 лет, в повседневную жизнь обычных граждан, не специалистов, они широко так и не вошли из-за сложности работы и дороговизны. Важным шагом на пути к созданию общедоступных геоинформационных сервисов стало бурное развитие Веб-картографии. Применение Веб-картографии для распространения как прогнозной, так и архивной информации о наводнениях, значительно расширяет круг её потребителей. Достаточно

иметь терминал (смартфон, планшетный или персональный компьютер) и доступ в Интернет для того, чтобы оперативно получить актуальную информацию в доступном для понимания виде. В настоящее время предлагается широкий выбор решений, на основе которых возможно построение геоинформационных сервисов: GeoServer; MapServer; ArcGISServer; OracleMapViewer и другие. Использование стандартных протоколов для передачи картографических данных позволяет не только предоставлять информацию конечным пользователям, но и обмениваться данными между различными профессиональными геоинформационными системами. В предлагаемой системе использование SaS и технологий Веб-картографии даёт возможность организовать доступ к оперативной информации ИИС практически из любой точки пространства и с любого устройства при наличии доступа к сети Интернет.

Новые перспективы для создания комплексного решения по доведению результатов прогнозов и оповещению заинтересованных лиц открывают возможности интеграции со сторонними телекоммуникационными системами. Программная интеграция с сервисами провайдеров сотовой связи упрощает и удешевляет процесс массовой рассылки коротких текстовых сообщений (SMS) на мобильные телефоны заинтересованных лиц. При необходимости возможна также интеграция с городской или сельской системой уличного оповещения о чрезвычайных ситуациях.

Основное преимущество реализованных в ИИС способов межсистемного взаимодействия заключается в сведении к минимуму человеческого фактора в цепочке доведения критически важной информации до потребителя. Так, известны случаи катастрофических природных явлений, в ходе которых, по словам специалистов, неудовлетворительная работа системы оповещений не позволила сократить причинённый ущерб (Крымск, 2012, <http://lenta.ru/news/2012/07/09/pay/>).

Внешний вид разработанного на основе перечисленных принципов геопортала показан на рисунке 3.

В основе интеграции и координации частных моделей лежит темпоральная модель данных (ТМД), позволяющая хранить сведения о жизненном цикле данных. ТМД применяется для хранения как исходных данных (гидрометеорологические, результаты тематической обработки спутниковых снимков), так и результатов моделирования. Доступ пользователя к темпоральным данным реализован в виде временной шкалы в Веб-интерфейсе. Используя этот механизм, пользователь может просматривать различные данные (исходные,

исторические и прогнозируемые) без специальных знаний (например, формального языка запросов), просто перемещая ползунок шкалы.



Рис. 3. Внешний вид экрана геопортала для представления результатов прогнозирования наводнений

Накопленная в пространственных базах данных информация может быть доступна как специалистам-гидрологам, так и другим заинтересованным лицам и организациям, в том числе службам по чрезвычайным ситуациям. Предоставление пользователям Веб-интерфейса с интуитивно понятными элементами для формирования поискового запроса, управления временной шкалой, выполнения пространственных аналитических операций позволяет повторно использовать данные о наводнениях для решения широкого круга задач: от территориального планирования до страхования жизни и имущества граждан.

8. Результаты апробации прототипа интеллектуальных информационных систем. Практическая апробация описанной системы оперативного прогнозирования наводнений проведена в ряде регионов нашей страны и за рубежом. Наиболее показательные результаты получены во время наводнения 2013 г. на р. Даугава (Латвия) в районе г. Даугавпилса. При этом наилучшие результаты с точки зрения расчета и прогнозирования зон затоплений и реализации оперативного оповещения населений и организаций получены для интервала прогноза 12–24 часа.

Эксперимент проводился совместно Санкт-Петербургским институтом информатики и автоматизации РАН и Рижским техническим университетом (Латвия) [37] в рамках выполнения проекта по программе приграничного сотрудничества ESTLATRUS.

Общая структура проведенного эксперимента приведена на рисунке 4.

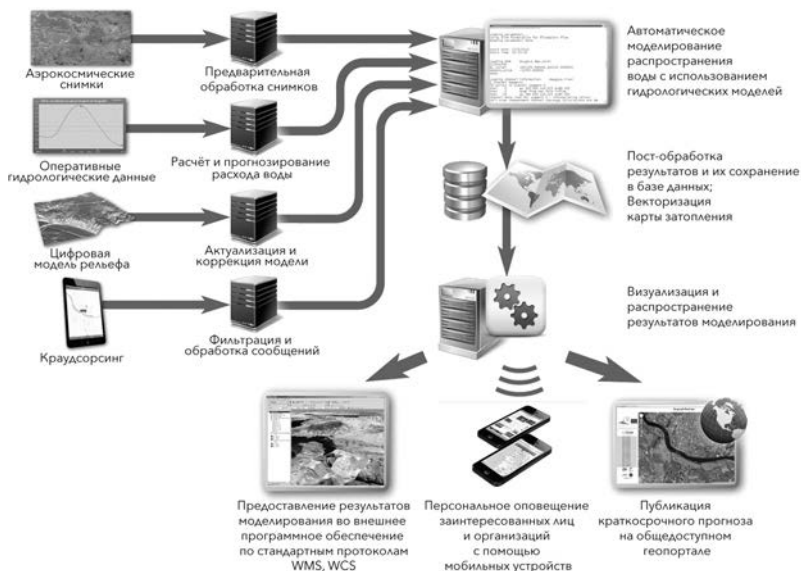


Рис. 4. Схема эксперимента по апробации системы оперативного прогнозирования наводнений

В качестве гидрологического модуля при прототипировании системы оперативного прогнозирования наводнений была использована одна из версий модели LISFLOOD-FP [38]. Тестовое моделирование проводилось на участке реки Даугава в районе города Даугавпилс (Латвия) протяжённостью около 20 км. Интервал времени для проведения тестирования был выбран таким образом, чтобы охватить наиболее вероятный период возникновения весеннего паводка. Процесс подготовки моделирования включал формирование следующих исходных данных:

Цифровую модель рельефа, созданную методом лазерного сканирования.

Морфометрические характеристики русла реки. Для одномерной модели движения воды по русловой сети построена упрощённая модель русла Даугавы на выбранном участке. Данные по

ширине русла реки сформированы на основе спутниковых снимков региона в период межени. Данные о глубине реки были предоставлены гидрологической службы г. Даугавпилса.

Уровень и расход воды. На момент проведения тестового моделирования на выбранном участке Даугавы функционировал один гидрологический пост, способный в автоматическом режиме ежедневно получать данные об уровне воды. Однако для выполнения расчётов данных об уровне воды недостаточно, требуется знать расход воды в реке. Метеорологическая служба в обычном режиме выполняет измерение расхода воды в реке с периодичностью два раза в месяц, и в любом случае не чаще одного раза в сутки. Для получения данных о расходах воды применялась модель, построенная специалистами из Рижского технического университета профессором Галиной Меркурьевой и докторантом Виталием Большаковым. При этом использованы методы линейной регрессии и символьной регрессии с применением генетического программирования. Для обеспечения оперативного доступа к результатам расчета создан Веб-сервис пересчёта уровня воды в реке в расход, Таким образом, значение расхода воды в реке стало доступным ежедневно.

Информационно-моделирующая подсистема была развёрнута в Научно-техническом центре Инновационных космических технологий СПИИРАН. Ежедневно происходил приём информации от созданной системы сбора и первичной обработки данных, и выполнялось моделирование. По его результатам формировался прогноз затопления территории на 12 часов вперёд. Результат представлял собой геопривязанную растровую карту с информацией о глубине потока на затопленной территории (рисунок 5).

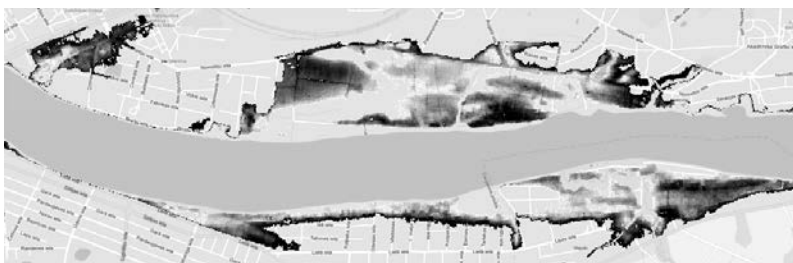


Рис. 5. Растровая карта затопленной территории

Созданная подсистема визуализации выполняла несколько этапов постобработки полученных результатов моделирования. Прежде всего, растровая карта затопления автоматически векторизовалась для обеспечения совместимости со сторонними геоинформационными

системами. Векторная карта и соответствующая метка времени моделирования автоматически сохранялись в базе данных для формирования архива информации о динамике наводнения.

Второй этап визуализации — размещение результатов моделирования на геопортале. Данный сервис предоставлял возможность просмотра слоёв с контурами зоны затопления от начала процесса моделирования до 12-ти часового прогноза. При этом для наглядного представления динамики процесса наводнения допускалось наложение слоёв, соответствующих различным меткам времени.

Следующим этапом работы системы явилось автоматическое оповещение лиц, чье недвижимое имущество попадало в прогнозируемую зону затопления. Иллюстрация данного сервиса представлена на рисунке 6.

Индивидуальное информирование

Интеграция результатов моделирования затоплений с электронной адресной системой

Дома в расчётной зоне затопления

Уп. Речная, д. 1	Петрова И.В.	(81270) 78482
Уп. Речная, д. 3	Петрова А.И.	(81270) 78347
Уп. Речная, д. 5	Сидорова К.Р.	(81270) 78289
Уп. Речная, д. 7	Смирнов Е.П.	(81270) 78654
Уп. Речная, д. 9	Кузнецов Р.Г.	(81270) 78951

Автоматическое оповещение населения (автодозвон, SMS)



Рис. 6. Иллюстрация сервиса оперативного оповещения.

Верификация модели осуществлялась на основе использования космических снимков с КА Radarsat-1. Снимок, полученный 23 марта 2013 года, позволил уточнить текущее состояние русла реки. В дальнейшем была использована технология социальных сетей сбора информации, известная под названием «краудсорсинг». Для реализации данной технологии сформирован сервис <http://daugava.crowdmap.com> на открытой платформе «Ushahidi». Сервис представляет возможность любому пользователю разместить фотографию, привязанную к географическим координатам, и соответствующий комментарий. Данные фотоснимки позволили провести оперативную калибровку модели и уточнить прогноз распространения воды.

Основным итогом проведенной апробации стало подтверждение достаточно высокой точности работы прототипа системы - прогноз затопления значимых объектов инфраструктуры совпал с реальными данными не менее чем на 95%. Высокий уровень достоверности прогноза был достигнут за счёт постоянной актуализации входных параметров (в том числе с использованием технологий краудсорсинга – рисунок 7) для ситуационно выбранных гидрологических моделей. Кроме того, получили экспериментальное подтверждение правильность принятых решений по составу модулей и требованиям к процедурам получения исходных данных, а также подтверждена работоспособность заявленных сервисов.



Рис. 7. Динамика развития наводнения. Фотоснимки с интервалом в сутки

Заключение. В данной статье представлены разработанные к настоящему времени основы построения и апробированные решения по созданию перспективных интеллектуальных информационных продуктов и сервисов оперативного прогнозирования наводнений.

Данные решения и сервисы реализованы в виде системы оперативного прогнозирования наводнений, базирующейся на сервис-ориентированной архитектуре и интегрированной обработке данных наземно-космического мониторинга. Основными элементами системы являются комплекс гидрологических моделей и интеллектуальный интерфейс, обеспечивающий выбор моделей расчета для конкретных условий прогноза и исходных данных. Применение современных интеллектуальных информационных технологий и средств доступа пользователей к результатам прогноза обеспечивают возможность их широкого использования при совершенствовании систем гидрометеорологического моделирования, мониторинга и прогнозирования наводнений в нашей стране.

Литература

1. *Порфирьев Б.Н., Макарова Е.А.* Экономическая оценка ущерба от природных бедствий и катастроф // Вестник Российской академии наук. 2014. Том 84. №12. С. 1059–1072.
 2. *Порфирьев Б.Н.* Экономические последствия катастрофического наводнения на Дальнем Востоке в 2013 г. // Вестник Российской академии наук. 2015. Том 85. №22. С. 128–137.
 3. *Алексеевский Н.И., Фролова Н.Л., Христофоров А.В.* Мониторинг гидрологических процессов и повышение безопасности водопользования // М.: Географический ф-т МГУ. 2011. 367 с.
 4. *Васильев О.Ф.* Создание систем оперативного прогнозирования паводков и паводков // Вестник Российской академии наук. 2012. Том 82. №3. С. 237–242.
 5. *Данилов-Данильян В.И., Гельфан А.Н.* Экстраординарное наводнение в бассейне реки Амур // Вестник Российской академии наук. 2014. Том 84. №9. С. 817–823.
 6. *Алабян А.М., Алексеевский Н.И., Евсеева Л.С., Жук В.А., Иванов В.В., Сурков В.В., Фролова Н.Л., Чалов Р.С., Чернов А.В.* Генетический анализ причин весеннего затопления долины Малой Северной Двины в районе г. Великого Устюга // Эрозионные и русловые процессы. 2004. Том 14. С. 104–130.
 7. *Новаковский Б.А., Колесникова О.Н., Прасолова А.И., Пермяков Р.В.* Геоинформационное моделирование наводнений по материалам космической съемки (на примере г. Бийск, Алтайский край) // Геоинформатика. 2015. №1. С. 15–20.
 8. *Зеленцов В.А., Петухова Ю.Ю., Потрясаев С.А., Рогачев С.А.* Технология оперативного автоматизированного прогнозирования разлива реки в период весенних паводков // Труды СПИИРАН. 2013. Вып. 6(29). С. 40–57.
 9. *Merkuryeva G.V., Merkurjev Yu. A., Lektavers A., Sokolov B.V., Potryasaev S.A., Zelentsov V.A.* Advanced timer flood monitoring, modeling and forecasting // Journal of Computational Science. 2014.
 10. *Шержуков Е.Л.* Региональные системы мониторинга опасных природных и техногенных явлений на примере Краснодарского края // Водная стихия: опасности, возможности прогнозирования, управления и предотвращения угроз. Материалы всероссийской научной конференции. Новочеркасск: Изд. ЛИК. 2013. С. 261–265.
 11. *Romanovs A., Sokolov B.V., Lektavers A., Potryasaev S., Shkodyrev V.* Crowdsourcing interactive technology for natural-technical objects integrated monitoring // Speech and Computer. LNCS vol. 8773. Heidelberg: Springer. 2014. pp. 176–183.
- 24 SPIIRAS Proceedings. 2015. Issue 4(41). ISSN 2078-9181 (print), ISSN 2078-9599 (online)
www.proceedings.spiiras.nw.ru

12. *Крыленко И.Н.* Опыт применения космических снимков для компьютерного моделирования затопления территории при наводнениях на реках // Земля из космоса – наиболее эффективные решения. II Международная конференция: тезисы докладов. М.: Изд-во Бином, 2005. С. 104–106.
13. *Merkuryev Y., Okhtilev M., Sokolov B., Trusina I., Zelentsov V.* Intelligent Technology for Space and Ground based Monitoring of Natural Objects in Cross-Border EU-Russia Territory // Proceedings of International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS 2012). Munich. Germany. 2012. pp. 2759–2762.
14. *Sokolov B.V., Okhtilev M.Yu., Zelentsov V.A., Maslova M.A.* The Intelligent Monitoring Technology Based on Integrated Ground and Aerospace Data // Proceedings of the Int. Conf. on Harbor Maritime and Multimodal Logistics M&S. Vienna, Austria. 2012. pp. 112–117.
15. *Зеленцов В.А., Потрясаев С.А., Соколов Б.В.* Интеллектуальная информационная технология решения задач интегрированного наземно-космического мониторинга // Сборник тезисов шестой международной конференции «Земля из космоса — наиболее эффективные решения». М.:ИТЦ СканЭкс. НП «Прозрачный мир». 2013. С. 143–145.
16. *Зеленцов В.А., Ковалев А.П., Охтлев М.Ю., Соколов Б.В., Юсупов Р.М.* Методология создания и применения интеллектуальных информационных технологий наземно-космического мониторинга сложных объектов // Труды СПИИРАН. 2013. Вып. 5(28). С. 7–81.
17. *Соколов Б.В., Юсупов Р.М.* Концептуальные основы оценивания и анализа качества моделей и полимодельных комплексов // Известия РАН. Теория и системы управления. 2004. №6. С. 5–16.
18. *Зеленцов В.А., Зюбан А.В., Потрясаев С.А., Крыленко И.Н., Хименко В.И.* Формирование системы обработки, хранения и визуализации данных дистанционного зондирования на базе сервис-ориентированной архитектуры // Экология. Экономика. Информатика. Сборник статей: в 2 т. Ростов–на–Дону: Изд. ЮФУ. 2014. Том 2. С. 71–75.
19. *Алексеевский Н.И., Крыленко И.Н., Беликов В.В., Кочетков В.В., Норин С.В.* Численное гидродинамическое моделирование наводнения в г. Крымске 6-7 июля 2012 г. // Гидротехническое строительство. 2013. №3. С. 29–35.
20. *Лебедева С.В., Алабян А.М., Крыленко И.Н., Федорова Т.А.* Наводнения в устье Северной Двины и их моделирование // Геориск. 2015. №1. С. 18–25.
21. *Калугин А.С., Крыленко И.Н.* Математическое моделирование движения паводочной волны при использовании исходной информации различной детальности // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2014. №3. С. 38–57.
22. *Фролова Н.Л., Агафонова С.А., Завадский А.С., Крыленко И.Н.* Оценка опасности гидрологических явлений на региональном и локальном уровнях // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2014. №3. С.58–74.
23. *Барышников Н.Б.* Гидравлические сопротивления речных русел // СПб.: Изд-во РГГМУ. 2003. 147 с.
24. *Sokolov B.V., Zelentsov V.A., Brovkina O., Mochalov V.F., Potryasaev S.A.* Complex Objects Remote Sensing Forest Monitoring and Modeling // Modern Trends and Techniques in Computer Science: Proceedings of the 3rd Computer Science On-line Conference 2014 (CSOC 2014). London: Springer. 2014. vol. 285. pp. 445–453.
25. *Sokolov B.V., Zelentsov V.A., Yusupov R.M., Merkurjev Yu.A.* Multiple models of information fusion processes: Quality definition and estimation // Journal of Computational Science. 2014. vol. 5. Issue 3. pp. 380–386.

26. *Беликов В.В., Милитеев А.Н.* Двуслойная математическая модель катастрофических паводков // В сб. "Вычислительные технологии". Новосибирск. 1992. Т. 1. №3. С. 167–174.
27. *Skotner C. et al.* MIKE FLOOD WATCH - managing real-time forecasting // URL: http://dhigroup.com/upload/publications/mike11/Skotner_MIKE_FLOOD_watch.pdf. (дата обращения: 20.05.2015).
28. Delft3D-FLOW Version 3.06 User Manual. WL | Delft hydraulics. 2001.
29. HEC-RAS river analysis system User's Manual. 2002.
30. FLO-2D. Version 2006.01 User Manual. URL: <http://www.flo-2d.com> (дата обращения: 25.05.2015).
31. *Алабян А.М., Алексеевский Н.И., Евсеева Л.С., Жук В.А., Иванов В.В., Сурков В.В., Фролова, Чалов Р.С. Чернов А.В.* Генетический анализ причин весеннего затопления долины Малой Северной Двины в районе г. Великого Устюга // В сб. Эрозия почв и русловые процессы. М.: Изд-во МГУ. 2003. Вып. 14. С. 105–131.
32. *Таратунин А.А.* Наводнения на территории Российской Федерации / Под ред. Н.И. Коронкевича // Екатеринбург: Изд-во ФГУП Рос НИИВХ. 2008. 432 с.
33. *Беликов В.В., Кочетков В.В.* Программный комплекс STREAM_2D для расчета течений, деформаций дна и переноса загрязнений в открытых потоках // Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2014612181. Российское агентство по интеллектуальной собственности. 2014.
34. *Микони С.В., Соколов Б.В., Юсупов Р.М.* Применение алгебраического подхода в квалиметрии моделей и полимодельных комплексов // Материалы Шестой всероссийской научно-практической конференции "Имитационное моделирование. Теория и практика" ИММОД-2013. Казань: Изд-во "Фэн" Академии наук РТ. 2013. Т. 1. С. 68–79.
35. *Охтилев М.Ю., Соколов Б.В., Юсупов Р.М.* Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов // М.: Наука. 2006. 410 с.
36. *Букатова И.И.* Эволюционное моделирование и его приложения // М.: Наука. 1979. 231 с.
37. *Laurent S. St., Johnston J., Dumbil E.* Programming Web Services with XML-RPC // O'Reilly Media, Inc. 2001. 213p.
38. *Merkuryev Y., Merkuryeva G., Sokolov B., Zelentsov V.* Information Technologies and Tools for Space-Ground Monitoring of Natural and Technological Objects // Riga Technical University. 2014. 110 p.
39. *Van der Knijff J.M., Younis J., De Roo A.P.J.* LISFLOOD: a GIS-based distributed model for river-basin scale water balance and flood simulation // International Journal of Geographical Information Science. 2010. vol. 24. no. 2. pp. 189–212.

References

1. Porfir'ev B.N., Makarova E.A. [Economic assessment of damage from natural disasters and accidents]. *Vestnik Rossijskoj akademii nauk — Bulletin of the Russian Academy of Sciences*. 2014. Issue 84. vol. 12. pp. 1059–1072. (In Russ.).
2. Porfir'ev B.N. [Economic consequences of a catastrophic flood in the Far East in 2013]. *Vestnik Rossijskoj akademii nauk — Bulletin of the Russian Academy of Sciences*. 2015. Issue 85. vol. 22. pp. 128–137. (In Russ.).
3. *Alekseevskij N.I., Frolova N.L., Hristoforov A.V.* *Monitoring gidrologicheskikh processov i povyshenie bezopasnosti vodopol'zovaniya* [Monitoring of hydrological processes and increase of safety of water use]. М.: Географический ф-т МГУ. 2011. 367 p. (In Russ.).

4. Vasil'ev O.F. [Creation of systems of expeditious forecasting of high waters and floods]. *Vestnik Rossijskoj akademii nauk — Bulletin of the Russian Academy of Sciences*. 2012. Issue 82. vol. 3. pp. 237–242. (In Russ.).
5. Danilov-Danil'jan V.I., Gel'fan A.N. [Extraordinary flood in a river basin Amur]. *Vestnik Rossijskoj akademii nauk — Bulletin of the Russian Academy of Sciences*. 2014. Issue 84. vol. 9. pp. 817–823. (In Russ.).
6. Alabjan A.M., Alekseevskij N.I., Evseeva L.S., Zhuk V.A., Ivanov V.V., Surkov V.V., Frolova N.L., Chalov R.S., Chernov A.V. [The reasons genetic analysis of spring flooding of the Small Northern Dvina valley around of Velikiy Ustyug]. *Jerozionnye i ruslovyje processy — Erosive and riverbed processes*. 2004. Issue 14. pp. 104–130. (In Russ.).
7. Novakovskij B.A., Kolesnikova O.N., Prasolova A.I., Permjakov R.V. [Geoinformation modeling of floods on materials of space shooting (on the example of Biysk, Altai Krai)]. *Geoinformatika — Geoinformatika*. 2015. vol. 1. pp. 15–20. (In Russ.).
8. Zelentsov V.A., Petukhova Ju.Ju., Potryasaev S.A., Rogachev S.A [Technology of the operational automated forecasting of river flood in the spring floods period]. *Trudy SPIIRAN — SPIIRAS Proceedings*. 2013. vol. 6(29). pp. 40–57. (In Russ.).
9. Merkuryeva G.V., Merkuryev Yu. A., Lectauers A., Sokolov B.V., Potryasaev S.A., Zelentsov V.A. Advanced timer flood monitoring, modeling and forecasting. *Journal of Computational Science*. 2014.
10. Sherzhukov E.L. [Regional systems of monitoring of the dangerous natural and technogenic phenomena on the example of Krasnodar Krai]. *Vodnaja stihija: opasnosti, vozmozhnosti prognozirovanija, upravlenija i predotvrashhenija ugroz. Materialy vsrossijskoj nauchnoj konferencii*. [Water elements: dangers, possibilities of forecasting, management and prevention of threats. Materials of the All-Russian scientific conference]. Novocherkassk: Izd. LIK. 2013. pp. 261–265. (In Russ.).
11. Romanovs A., Sokolov B.V., Lektuers A., Potryasaev S., Shkodyrev V. Crowdsourcing interactive technology for natural-technical objects integrated monitoring. *Speech and Computer*. LNCS vol. 8773. Heidelberg: Springer. 2014. pp. 176–183.
12. Krylenko I.N. [Experience of application of space pictures for computer modeling of flooding of the territory at floods on the rivers] *Zemlja iz kosmosa — naibolee jeffektivnye reshenija. II Mezhdunarodnaja konferencija: tezisy dokladov* [The earth from space — the most effective decisions. II International conference: theses of reports]. M.: Izd-vo Binom. 2005. pp. 104–106. (In Russ.).
13. Merkuryev Y., Okhtilev M., Sokolov B., Trusina I., Zelentsov V. Intelligent Technology for Space and Ground based Monitoring of Natural Objects in Cross-Border EU-Russia Territory. *Proceedings of International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS 2012)*. Munich. Germany. 2012. pp. 2759–2762.
14. Sokolov B.V., Okhtilev M.Yu., Zelentsov V.A., Maslova M.A. The Intelligent Monitoring Technology Based on Integrated Ground and Aerospace Data // *Proceedings of the Int. Conf. on Harbor Maritime and Multimodal Logistics M&S*. Vienna. Austria. 2012. pp. 112–117.
15. Zelentsov V.A., Potryasaev S.A., Sokolov B.V. [Intellectual information technology of the problems solution of the integrated land and space monitoring] *Sbornik tezisov shestoj mezhdunarodnoj konferencii «Zemlja iz kosmosa — naibolee jeffektivnye reshenija»*. [Collection of theses of sixth international conference "The Earth from Space — the Most Effective Decisions"]. M.: ITC SkanEx, NP «Prozrachny mir». 2013. pp. 143–145. (In Russ.).

16. Zelentsov V.A., Kovalev A.P., Okhtilev M.Ju., Sokolov B.V., Jusupov R.M. [Methodology of creation and application of intellectual information technologies of space-ground monitoring of difficult objects]. *Trudy SPIIRAN — SPIIRAS Proceedings*. 2013. vol. 5(28). pp. 7–81. (In Russ.).
 17. Sokolov B.V., Jusupov R.M. [Conceptual bases of estimation and quality analysis of models and polymodel complexes]. *Izvestija RAN. Teorija i sistemy upravlenija - Journal of Computer and Systems Sciences International*. 2004. no. 6. pp. 5–16. (In Russ.).
 18. Zelentsov V.A., Zjuban A.V., Potryasaev S.A., Krylenko I.N., Khimenko V.I. [Formation of system of processing, storage and visualization of data of remote sensing on base of service-oriented architecture]. *Jekologija. Jekonomika. Informatika. Sbornik statej: v 2 t. — Ecology. Economy. Informatics. Collection of articles: in 2 vol.* Rostov-na-Donu: Izd. JuFU. 2014. Issue 2. pp. 71–75. (In Russ.).
 19. Alekseevskij N.I., Krylenko I.N., Belikov V.V., Kochetkov V.V., Norin S.V. [Numerical hydrodynamic modeling of a flood in Krymsk on July 6-7, 2012]. *Gidrotehnicheskoe stroitel'stvo — Hydrotechnical construction*. 2013. no. 3. pp. 29–35. (In Russ.).
 20. Lebedeva S.V., Alabjan A.M., Krylenko I.N., Fedorova T.A. [Floods to the mouth of Northern Dvina and their modeling]. *Georisk - Georisk*. 2015. vol. 1. pp. 18–25. (In Russ.).
 21. Kalugin A.S., Krylenko I.N. [Mathematical modeling of the movement of a pavodochny wave when using initial information of various detail]. *Vodnoe hozjajstvo Rossii: problemy, tehnologii, upravlenie — Water management of Russia: problems, technologies, management*. 2014. vol. 3. pp. 38–57. (In Russ.).
 22. Frolova N.L., Agafonova S.A., Zavadskij A.S., Krylenko I.N. [Danger assessment of the hydrological phenomena at the regional and local levels]. *Vodnoe hozjajstvo Rossii: problemy, tehnologii, upravlenie — Waterv management of Russia: problems, technologies, management*. 2014. vol. 3. pp. 58–74. (In Russ.).
 23. Baryshnikov N.B. *Gidravlicheskie soprotivlenija rechnyh rusel* [Hydraulic resistance of river courses]. SPb.: Izd-vo RGGMU. 2003. 147 p. (In Russ.).
 24. Sokolov B.V., Zelentsov V.A., Brovkina O., Mochalov V.F., Potryasaev S.A. Complex Objects Remote Sensing Forest Monitoring and Modeling. Modern Trends and Techniques in Computer Science: Proceedings of the 3rd Computer Science On-line Conference 2014 (CSOC 2014). London: Springer. 2014. vol. 285. pp. 445–453.
 25. Sokolov B.V., Zelentsov V.A., Yusupov R.M., Merkurjev Yu.A. Multiple models of information fusion processes: Quality definition and estimation. *Journal of Computational Science*. 2014. vol. 5. Issue 3. pp. 380–386.
 26. Belikov V.V., Militeev A.N. [Two-layer mathematical model of catastrophic floods] *V sb. «Vychislitel'nye tehnologii» — Collection of papers «Computing technologies»*. Novosibirsk. 1992. Issue 1. vol. 3. pp. 167–174. (In Russ.).
 27. Skotner C. et al. MIKE FLOOD WATCH — managing real-time forecasting. Available at: http://dhigroup.com/upload/publications/mike11/Skotner_MIKE_FLOOD_watch.pdf. (accessed: 20.05.2015).
 28. Delft3D-FLOW Version 3.06 User Manual. WL | Delft hydraulics. 2001.
 29. HEC-RAS river analysis system User's Manual. 2002.
 30. FLO-2D. Version 2006.01 User Manual. <http://www.flo-2d.com> (accessed: 25.05.2015).
 31. Alabjan A.M., Alekseevskij N.I., Evseeva L.S., Zhuk V.A., Ivanov V.V., Surkov V.V., Frolova, Chalov R.S. Chernov A.V. [The reasons genetic analysis of spring flooding of the valley of Small Northern Dvina around of Velikiy Ustyug]. *V sb. Jerozija pochv i ruslovyje process — Collection of papers Erosion of soils and riverbed processes*. M.:Izd-vo MGU. 2003. vol. 14. pp. 105–131. (In Russ.).
- 28 SPIIRAS Proceedings. 2015. Issue 4(41). ISSN 2078-9181 (print), ISSN 2078-9599 (online)
www.proceedings.spiiras.nw.ru

32. Taratunin A.A. *Navodnenija na territorii Rossijskoj Federacii* [Floods in the territory of the Russian Federation. Edired by N.I. Koronkevich]. Ekaterinburg: Izd-vo FGUP Ros NII VH. 2008. 432 p. (In Russ.).
33. Belikov V.V., Kochetkov V.V. [The program STREAM_2D complex for calculation of currents, deformations of a bottom and transfer of pollution in open streams]. Certificate on the state registration of the computer programs no. 2014612181. The Russian agency on intellectual property. 2014. (In Russ.).
34. Mikoni S.V., Sokolov B.V., Jusupov R.M. [Application of algebraic approach in a kvalimetriya of models and polymodel complexes] *Materialy Shestoj vsrossijskoj nauchno-prakticheskoj konferencii "Imitacionnoe modelirovanie. Teorija i praktika" IMMOD-2013* [Proceedings of the Sixth All-Russian scientific and practical conference "Simulation. Theory and practice" IMMOD-2013]. Kazan': Izd-vo "Fjen" Akademii nauk RT. 2013. Issue 1. pp. 68–79. (In Russ.).
35. Ohtilev M.Ju., Sokolov B.V., Jusupov R.M. *Intellektual'nye tehnologii monitoringa i upravlenija strukturnoj dinamikoj slozhnyh tehnicheskix ob'ektov* [Intellectual technologies of monitoring and management of difficult technical objects structural dynamics]. M.: Nauka. 2006. 410 p. (In Russ.).
36. Bukatova I.L. *Jevoljucionnoe modelirovanie i ego prilozhenija* [Evolutionary modeling and its applacation]. M.: Nauka. 1979. 231 p. (In Russ.).
37. Laurent S. St., Johnston J., Dumbil E. *Programming Web Services with XML-RPC*. O'Reilly Media, Inc. 2001. 213p.
38. Merkurjev Y., Merkurjeva G., Sokolov B., Zelentsov V. *Information Technologies and Tools for Space-Ground Monitoring of Natural and Technological Objects*. Riga Technical University. 2014. 110 p.
39. Van der Knijff J.M., Younis J., De Roo A.P.J. LISFLOOD: a GIS-based distributed model for river-basin scale water balance and flood simulation. *International Journal of Geographical Information Science*. 2010. vol. 24. no. 2. pp. 189–212.

Алабян Андрей Михайлович — к-т геогр. наук, доцент кафедры гидрологии суши географического факультета, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, (МГУ). Область научных интересов: динамика русловых потоков, русловые процессы, моделирование, технологии ГИС и ДЗЗ. Число научных публикаций — 50. andrei_alabyan@mail.ru; Ленинские горы, 1, Москва, 119991; р.т.: (495)939-1533.

Alabyan Andrey Mikhailovich — Ph.D., associate professor, associate professor of hydrology department of geography faculty, Lomonosov Moscow State University. Research interests: river flow dynamic, river channel processes, modelling, GIS, remote sensing. The number of publications — 50. andrei_alabyan@mail.ru; 1, Leninskiye Gory, Moscow, 119899; office phone: (495)939-1533.

Зеленцов Вячеслав Алексеевич — д-р техн. наук, профессор, ведущий научный сотрудник лаборатории информационных технологий в системном анализе и моделировании, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации Российской академии наук (СПИИРАН). Область научных интересов: системный анализ, теория надежности, модели и методы принятия решений в сложных организационно-технических системах с использованием аэрокосмических данных. Число научных публикаций — 250. v.a.zelentsov@gmail.com; 14-я линия В.О., д. 39, Санкт-Петербург, 199178; р.т.: (812)328-0103, Факс: (812)328-4450.

Zelentsov Viacheslav Alekseevich — Ph.D., Dr. Sci., professor, chief researcher of laboratory for information technologies in systems analysis and modeling, St. Petersburg Institute for

Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences (SPIIRAS). Research interests: analyses of systems, reliability theory, mathematical models and methods of decision-making support in complex technical-organizational systems with the use of aerospace data. The number of publications — 250. v.a.zelentsov@gmail.com; 39, 14-th Line V.O., St. Petersburg, 199178, Russia; office phone: (812)328-0103, Fax: (812)328-4450.

Крыленко Инна Николаевна — к-т геогр. наук, старший научный сотрудник кафедры гидрологии суши географического факультета, Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, (МГУ). Область научных интересов: опасные гидрологические процессы, гидрологическая безопасность, моделирование, технологии ДЗЗ. Число научных публикаций — 30. krylenko_i@mail.ru; Ленинские горы, 1, Москва, 119991; р.т.: (495)939-1533.

Krylenko Inna Nikolaevna — Ph.D., senior researcher of hydrology department of geography faculty, Lomonosov Moscow State University. Research interests: hydrological modelling, natural hazards, water safety, remote sensing. The number of publications — 30. krylenko_i@mail.ru; 1, Leninskiye Gory, Moscow, 119899; office phone: (495)939-1533.

Потрысаев Семен Алексеевич — к-т техн. наук, старший научный сотрудник лаборатории информационных технологий в системном анализе и моделировании, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации Российской академии наук (СПИИРАН). Область научных интересов: разработка научных основ теории управления структурной динамикой сложных организационно-технических систем. Число научных публикаций — 40. spotryasaev@gmail.com; 14-я линия В.О., д. 39, Санкт-Петербург, 199178; р.т.: (812)328-0103, Факс: (812)328-4450.

Potryasaev Semen Alekseevich — Ph.D., senior researcher of laboratory for information technologies in systems analysis and modeling, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences (SPIIRAS). Research interests: analyses of systems, reliability theory, mathematical models and methods of decision-making support in complex technical-organizational systems with the use of aerospace data. The number of publications — 40. spotryasaev@gmail.com; 39, 14-th Line V.O., St. Petersburg, 199178, Russia; office phone: (812)328-0103, Fax: (812)328-4450.

Соколов Борис Владимирович — д-р техн. наук, профессор, Заслуженный деятель науки РФ, заместитель директора по научной работе, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации Российской академии наук (СПИИРАН). Область научных интересов: разработка научных основ теории управления структурной динамикой сложных организационно-технических систем. Число научных публикаций — 450. sokol@iias.spb.su; 14-я линия В.О., д. 39, Санкт-Петербург, 199178; р.т.: +7-812-328-3311.

Sokolov Boris Vladimirovich — Ph.D., Dr. Sci., professor, Honored scientist of Russian Federation, deputy director for research, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences (SPIIRAS). Research interests: development of research fundamentals for the control theory by structural dynamics of complex organizational-technical systems. The number of publications — 450. sokol@iias.spb.su; 39, 14-th Line V.O., St. Petersburg, 199178, Russia; office phone: +7-812-328-3311.

Юсупов Рафаэль Мидхатович — д-р техн. наук, профессор, член-корреспондент РАН, заслуженный деятель науки и техники РФ, директор, Федеральное государственное

бюджетное учреждение науки Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук (СПИИРАН), президент, НП Национальное общество имитационного моделирования («НОИМ»). Область научных интересов: теория управления, информатика, теоретические основы информатизации и информационного общества, информационная безопасность. Число научных публикаций — 390. spiiran@iias.spb.su; 199178, Санкт-Петербург, 14 линия, д. 39; р.т.: +7-812-328-3311.

Yusupov Rafael Midhatovich — Dr. Sci., professor, Corr. Member of RAS, director, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of Russian Academy of Sciences (SPIIRAS), president of NP National Simulation Society («NSS»). Research interests: control theory, informatics, theoretic basics of informatization and information society, information security. The number of publications — 390. spiiran@iias.spb.su; 39, 14-th Line, St. Petersburg, 199178, Russia; office phone: +7-812-328-3311.

Поддержка исследований. Исследования, выполненные по данной тематике, проводились при финансовой поддержке ведущих университетов Российской Федерации: СПбГПУ (мероприятие 6.1.1), ИТМО (субсидия 074-U01), Программы НТС Союзного государства «Мониторинг СГ» (проект 1.4.1-1), грантов РФ №14-21-00135, 14-11-00748; РФФИ №12-07-00302, 13-07-00279, 13-08-00702, 13-08-01250, 13-07-12120, 13-06-0087, 15-29-01294-офи-м, 15-07-08391, 15-08-08459, 15-07-01230, 15-06-04195; ОНИТ РАН (проект №2.11); проекта ESTLATRUS/1.2./ELRI-121/2011/13 «Baltic ICT Platform».

Acknowledgements. This research is supported by ITMO (project 074-U01), program “Monitoring SG” (project 1.4.1-1), RSF (projects 14-21-00135, 14-11-00748); RFBR (grants 12-07-00302, 13-07-00279, 13-08-00702, 13-08-01250, 13-07-12120, 13-06-0087, 15-29-01294-офи-м, 15-07-08391, 15-08-08459, 15-07-01230, 15-06-04195); ONITRAS (project №2.11); project ESTLATRUS/1.2./ELRI-121/2011/13 «Baltic ICT Platform».

РЕФЕРАТ

*Алабян А.М., Зеленцов В.А., Крыленко И.Н., Потрясаев С.А.,
Соколов Б.В., Юсупов Р.М.* **Оперативное прогнозирование
наводнений на основе комплексного упреждающего
моделирования и интеграции разнородных данных.**

В настоящее время перспективным направлением повышения точности прогноза зон и глубин затоплений при разливах рек является проведение междисциплинарных исследований и создание систем прогнозирования на базе интегрированного использования достижений в гидрологии, информационных технологиях, обработке данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и моделировании.

Привлечение информационных технологий и методов упреждающего моделирования позволяет решить следующие основные проблемы:

1. Проблему получения, автоматизации сбора и обработки исходных данных из всех доступных источников, включая данные с гидрологических постов, цифровые модели рельефа и данные ДЗЗ.
2. Проблему выбора и адаптации используемых гидрологических моделей.
3. Проблему доступности результатов прогнозирования.

В статье решение данных проблем рассматривается на примере построения системы оперативного (на 12-48 часов) прогнозирования наводнений. Система строится на базе сервис-ориентированной архитектуры с реализацией интеллектуального интерфейса для выбора и адаптации гидрологических моделей с учетом особенностей распространения воды по руслу реки. Доступ к результатам прогнозирования обеспечивается за счет применения геопортальных технологий и Веб-сервисов. Тестирование системы проведено во время весеннего половодья 2013 г. на р. Даугава (Латвия). Прогноз затопления значимых объектов инфраструктуры совпал с реальными данными не менее, чем на 95%.

SUMMARY

Alabyan A.M., Zelentsov V.A., Krylenko I.N., Potryasaev S.A., Sokolov B.V., Yusupov R.M. **Operational Flood Forecasting on the Basis of Complex Proactive Modeling and Integration of Heterogeneous Data.**

Currently, a promising way to increase the accuracy of the forecast of zones and depths of flooding in river impoundments is to conduct interdisciplinary research and create forecasting systems based on integrated use of achievements in hydrology, information technologies, Earth remote sensing data processing and modeling.

The use of information technologies and methods of proactive modeling allows one to solve the following main problems:

1. The problem of obtaining, automating the collection and processing of raw data from all available sources, including data from gauging stations, digital elevation models and Earth remote sensing data.

2. The problem of selection and adaptation of used hydrological models.

3. The problem of access to the forecasting results.

The paper examines a solution to these problems using evidence from the constructed short-term (for 12-48 hours) flood forecasting system.

The system was created on the basis of service-oriented architecture with the implementation of an intelligent interface for selecting and adapting hydrological models taking into account features of the water spread along the riverbed.

Access to the results of forecasting was provided by the application of geoportal technologies and Web services. System testing was performed during the spring flood in 2013 on the Daugava river (Latvia). Forecasting results for the significant infrastructure objects agreed with the real data (not less than 95%).

О НЕКОТОРЫХ ЗАДАЧАХ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННЫМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕМ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА С ПОВЕРХНОСТЬЮ ЗЕМЛИ

Калинин В.Н. О некоторых задачах оптимального управления информационным взаимодействием космического аппарата с поверхностью Земли.

Аннотация. В статье рассматривается ряд задач космической кибернетики, связанных с оптимальным управлением процессами информационного взаимодействия космического аппарата с поверхностью Земли. Космический аппарат при этом рассматривается как информационный активный подвижный объект, т.е. как сложная подвижная система, снабженная необходимыми приборами для осуществления информационного взаимодействия с окружающей физической средой и соответствующим необходимым бортовым ресурсом. Показано, что эти задачи сводятся к задачам оптимального программного управления некоторой специальной дифференциальной динамической системой в гильбертовом пространстве состояний. Для решения указанных задач в статье использованы расширенный принцип максимума Л.С. Понтрягина и общая концепция Лагранжа.

Ключевые слова: космическая кибернетика, космический аппарат, информационное взаимодействие, информационный активный подвижный объект, пространство информационных состояний, гильбертово пространство, выпуклость, слабая компактность, оптимальное терминальное управление.

Kalinin V.N. On Some Problems of Optimum Control of Informational Interaction of a Space Vehicle with the Surface of the Earth.

Abstract. The article discusses a number of problems of space cybernetics connected with the optimum process control of informational interaction of a spacecraft with the surface of the Earth. A spacecraft is regarded as an informational active mobile plant, i.e. as a complicated mobile system supplied with necessary devices for the realization of informational interaction with the enclosing physical medium and the corresponding necessary onboard resource. It is shown that these problems are reduced to the problems of optimum programmed control by some special differential dynamic system in a Hilbert space of conditions. For a solution of the specified problems, the paper uses L.S. Pontrjagin's expanded maximum principle and the general concept of Lagrange.

Keywords: space cybernetics, spacecraft, informational interaction, informational active mobile plant, space of informational conditions, a Hilbert space, convexity, weak compactness, optimum terminal control.

1. Введение. В современной *космической кибернетике* [10, 11] важнейшее место занимает исследование проблемы оптимального управления *космическим аппаратом* (далее сокращенно КА). Рассмотрение целевых и системных аспектов функционирования КА приводит к целесообразности использования для его математического описания *концепции активного подвижного объекта* [9], под которым понимается сложная подвижная система, предназначенная для информационного, энергетического или вещественного взаимодействия с окружающей физической средой или с другими подобными системами и снабженная соответствующей бортовой аппаратурой и необходимым ре-

сурсом. Эта концепция в последнее время успешно применяется как инструмент адекватного концептуального и математического моделирования сложных объектов современной ракетно-космической техники и разработки алгоритмического и программного обеспечения соответствующих автоматизированных систем управления [2, 13, 14].

В данной статье космический аппарат интерпретируется как *информационный активный подвижный объект* [7, 10, 11], предназначенный для осуществления *информационного взаимодействия с поверхностью Земли*, под которым понимается сбор информации о состоянии объектов на земной поверхности с помощью бортовых оптических и радиоэлектронных средств (соответствующие процессы в литературе получили название процессов дистанционного зондирования Земли [6]). Концептуальное и математическое описание подобных КА приведено в работах [8, 11], где рассмотрены математические модели этих КА как объектов управления, реализующих указанное информационное взаимодействие.

Следует отметить важную принципиальную особенность указанных моделей, связанную с тем, что *состояние информационного взаимодействия* характеризуется достигнутым к рассматриваемому моменту времени распределением информации по заданному множеству точек земной поверхности. Это означает, что для описания указанного состояния недостаточно использования конечномерных конструкций, а требуется представление текущего состояния соответствующего процесса в виде элемента бесконечномерного, функционального пространства. Сам указанный процесс при этом описывается с помощью соответствующих *специальных дифференциальных уравнений в гильбертовом функциональном пространстве* [8].

В настоящей статье на основе этих математических моделей рассматриваются некоторые *детерминированные* задачи оптимального управления *информационным взаимодействием* космического аппарата с поверхностью Земли с учетом ограниченности имеющегося на борту КА ресурса (энергетического или вещественного), расходуемого в процессе информационного взаимодействия. В качестве критерия оптимальности принято условие максимального приближения достигнутого в результате управления информационного состояния к заданному. Для постановки рассматриваемых в настоящей статье задач оптимального управления уточним исходные допущения, лежащие в основе используемых моделей и общей характеристики рассматриваемых процессов информационного взаимодействия. А именно, примем следующие предположения.

а) КА совершает неуправляемый орбитальный полет в центральном гравитационном поле Земли при отсутствии механических возмущений.

б) Информационное взаимодействие с поверхностью Земли осуществляется с помощью одного прибора.

в) Множество информационного взаимодействия представляет собой отрезок трассы полета КА на поверхности Земли.

г) На борту КА имеется один непополняемый ресурс, расходующийся в процессе информационного взаимодействия.

д) Запоздыванием информационных сигналов вследствие конечной скорости их распространения можно пренебречь.

е) Возмущающие воздействия на рассматриваемые информационные процессы (случайные или целенаправленные искажения получаемой информации в процессе ее распространения) отсутствуют.

Для дальнейшего рассмотрения соответствующих задач управления уточним необходимые математические элементы их постановки.

2. Основные элементы математической постановки задач.

Выделим следующие три элемента постановки рассматриваемых задач.

2.1. Математическая модель информационного взаимодействия КА с поверхностью Земли. Будем рассматривать исследуемые процессы информационного взаимодействия на некотором заданном интервале времени

$$\sigma = [t_0, t_f] \subset [0, \infty), t_f > t_0, \quad (1)$$

где t_0 – начальный, t_f – конечный моменты времени.

При указанных выше допущениях центр масс КА в соответствии с законами Кеплера будет совершать плоское движение по эллиптической орбите, один из фокусов которой совпадает с центром Земли. Будем считать это движение заданным и представленным *кинематической моделью* вида:

$$\vec{r} = \vec{r}(t), t \in \sigma, \quad (2)$$

в которой \vec{r} – радиус-вектор, соединяющий центр Земли с центром масс КА, а $\vec{r}(\cdot)$ – соответствующее заданное инъективное отображение: $\sigma \rightarrow \mathbb{R}^3$ (рисунок 1).

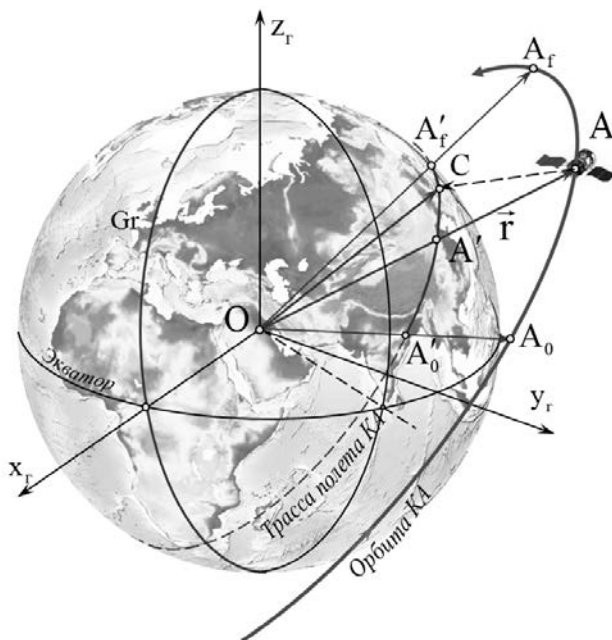


Рис.1. Орбита и трасса полета КА

Будем рассматривать этот радиус-вектор в *относительной экваториальной геоцентрической декартовой системе координат*. При этом центр масс КА, которому на рисунке 1 соответствует точка A , перемещается из некоторого начального положения A_0 в конечное A_f . На рисунке 1 показана также *трасса полета КА* (геометрическое место подспутниковых точек A' пересечения радиус-вектора центра масс КА с поверхностью Земли) и ее отрезок $A'_0A'_f$, который отвечает рассматриваемому интервалу времени.

Уточним *множество информационного взаимодействия*, а именно, ограничимся предположением, что оно совпадает с указанным отрезком $A'_0A'_f$ *трассы полета КА*. В этом случае целесообразно ввести естественную параметризацию этого отрезка, сопоставив каждой его точке C длину дуги трассы, отсчитываемую от точки пересечения трассы с плоскостью экватора. Обозначим эту длину через ρ и будем рассматривать ее как координату указанной точки. При этом участку трассы $A'_0A'_f$ взаимно однозначно сопоставляется отрезок веществен-

ной оси $\Delta = [a_0, a_f] \subset \mathbb{R}^1$, где a_0 и a_f – значения параметра ρ , отвечающие начальной и конечной точкам дуги $A'_0 A'_f$ соответственно.

В соответствии с [8] текущее *состояние информационного взаимодействия* для каждого момента времени будем характеризовать неотрицательной функцией $\gamma(\cdot, t) : \Delta \rightarrow \mathbb{R}^1$, представляющей линейную плотность полученной информации, отвечающую данным значениям ρ и t . Определенное таким образом *информационное состояние* является элементом функционального пространства вещественных функций, определенных на множестве Δ . Обозначим это пространство через $X(\Delta)$ и будем называть его *пространством информационных состояний*.

Исходя из общей модели информационного взаимодействия КА с поверхностью Земли [8, 11], соответствующее принятым допущениям *уравнение информационного состояния* представим в виде:

$$\gamma(\rho, t) = \int_{t_0}^t M(\rho, \tau) u(\tau) d\tau, \quad (3)$$

где $\rho \in \Delta = [a_0, a_f]$, $t \in \sigma = [t_0, t_f]$, $M(\rho, \tau)$ – заданная функция $\Delta \times \sigma \rightarrow \mathbb{R}^1$, $u = u(t)$ – интенсивность (скорость) информационного взаимодействия, рассматриваемая в дальнейшем как соответствующее управляющее воздействие.

С математической точки зрения правая часть уравнения (3) представляет собой *линейный интегральный оператор Фредгольма* с ядром $M(\rho, \tau)$. Конкретный вид этого ядра определяется движением центра масс КА, ориентацией корпуса КА, ориентацией прибора относительно корпуса и диаграммой направленности информационного взаимодействия, его аналитическое представление имеет весьма сложный вид, однако всегда можно указать алгоритм вычислений его значений, который может быть легко реализован на современных ЭВМ. Примеры таких алгоритмов приведены в работе [11]. В дальнейшем будем полагать, что ядро оператора $M(\rho, \tau)$ задано и является *ограниченным и кусочно-непрерывным* на $\Delta \times \sigma \subset \mathbb{R}^2$.

Как уже указывалось, определенное выше *информационное состояние* является элементом функционального пространства вещественных функций $X(\Delta)$, определенных на отрезке Δ . Движение рас-

смаатриваемой динамической системы (3) в этом пространстве можно представить в виде абстрактной функции

$$x(t) = \gamma(\bullet, t). \quad (4)$$

Очевидно, что интегральное соотношение (3) эквивалентно дифференциальному уравнению в функциональном пространстве $X(\Delta)$ следующего вида:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{\partial \gamma(\bullet, t)}{\partial t} = M(\bullet, t)u \quad (5)$$

при начальном условии:

$$x(t_0) = \gamma(\bullet, t_0) = 0. \quad (6)$$

Завершая описание модели эволюции информационного состояния, уточним соответствующий *класс допустимых управляющих воздействий (допустимых управлений)*. А именно, зададим этот класс в виде:

$$U_\sigma = \{u_\sigma = u(\cdot) : \sigma \rightarrow R^1 | (\forall \tau \in \sigma)(0 \leq u \leq c); S_u\}, \quad (7)$$

где c – заданное положительное число (максимальная интенсивность взаимодействия, S_u – теоретико-функциональные условия, накладываемые на управляющее воздействие и в данном случае трактуемые как измеримость по Лебегу.

2.2. Математическая модель бортового ресурса. Будем предполагать, что на борту космического аппарата имеется один расходимый ресурс (запас носителя информации, энергии или т. п.), характеризимый уравнением:

$$\dot{q} = -\alpha u \quad (8)$$

при начальном условии $q(t_0) = q_0 > 0$. Здесь q – величина ресурса, u – управление взаимодействием, α – положительная константа, характеризующая скорость расхода ресурса. На конечное состояние ресурса наложим следующее естественное условие:

$$q(t_f) = q_f \geq 0, \quad (9)$$

которое является краевым условием на правом конце траектории состояния ресурса.

2.3. Показатель качества процесса управления информационным взаимодействием. Показатель качества рассматриваемых процессов управления информационным взаимодействием зададим в виде *терминального функционала* (функционала Майера)

$$J(x_\sigma, u_\sigma) = h(x(t_f)), \quad (10)$$

в котором $h(\cdot)$ – заданное отображение: $X(\Delta) \rightarrow \mathbb{R}^1$, характеризующее финальное информационное состояние. При этом в качестве указанного функционала $h(x(t_f))$ будут рассмотрены *квадратичные и линейные функционалы*, математическое представление которых приводится далее при рассмотрении соответствующих задач.

3. Общая постановка задачи оптимального управления информационным взаимодействием. Некоторые замечания о существовании оптимальных решений и методе их нахождения. Приведем общую формулировку рассматриваемой задачи оптимального управления.

Среди всех допустимых управляющих воздействий найти такое, которое доставляет абсолютный минимум функционалу (10) при выполнении ограничения на оставшийся ресурс (9).

Если такое управляющее воздействие существует, то будем называть его *оптимальным* и обозначать через $u_\sigma^* = u^*(\bullet)$.

Сделаем некоторые замечания по поводу существования оптимального решения. С этой целью отметим, что, как показано в работе [8], при принятых выше допущениях класс допустимых управлений (9) при погружении его в гильбертово пространство $L^2(\sigma)$ всех измеримых и суммируемых с квадратом модуля вещественных функций, определенных на отрезке σ , является *выпуклым компактом* в слабой $L^2(\sigma)$ -топологии. При этом вследствие линейности оператора (3) соответствующее ему *множество достижимости* представляет собой *выпуклый компакт* в пространстве информационных состояний $X(\Delta)$, если рассматривать это пространство как соответствующее гильбертово пространство $L^2(\Delta)$. Далее, так как речь идет о минимизации квадратичных или линейных терминальных функционалов вида (10), то в условиях рассматриваемой задачи они вследствие выпуклости *слабо полунепрерывны снизу* [4] на классе допустимых управлений $U_\sigma \subset L^2(\sigma)$ (7), откуда в соответствии с известными теоремами функционального анализа [1, 4, 12] следует, что нижняя грань указанных

функционалов в классе допустимых управлений всегда достигается (обобщенная теорема Вейерштрасса), т. е. *искомое оптимальное управление заведомо существует(!)* и при этом либо единственно, либо принадлежит выпуклому подмножеству класса допустимых управлений.

Для практического нахождения искомых решений в данном случае целесообразно использовать соответствующую модификацию *принципа максимума Понтрягина* [15] применительно к бесконечномерному уравнению состояния (5) [5]. В нашем случае применение этой теории облегчается вследствие сравнительно простого вида указанного уравнения, правая часть которых *не зависит от состояния* и *линейна* по управлению. При этом оказывается, что применительно к квадратичным (и линейным) терминальным функционалам в данном случае вследствие линейности объекта управления принцип максимума является не только необходимым, но и достаточным условием оптимальности, т. е. позволяет решить задачу до конца. Перейдем к рассмотрению соответствующих конкретных задач, основанных на принятых выше условиях и допущениях.

4. Некоторые задачи оптимального управления информационного взаимодействия КА с поверхностью Земли. Рассмотрим четыре конкретных варианта поставленной выше общей задачи оптимального управления и соответствующие алгоритмы их решения.

4.1. Общая задача – квадратичный функционал. Для удобства дальнейших рассуждений несколько преобразуем исходную модель (3). А именно, в соответствии с введенной выше параметризацией трассы полета обозначим координату подспутниковой точки A' в момент времени $\tau \in \sigma$ через $s = s(\tau)$. Функция $s(\tau)$ определена на интервале времени $\sigma = [t_0, t_f]$ и обладает важным свойством – в соответствии с введенной выше параметризацией трассы положение подспутниковой точки A' является *строго монотонно возрастающей аналитической* (т. е. бесконечно дифференцируемой) функцией от τ и представляет собой биективное отображение $\sigma = [t_0, t_f] \rightarrow \Delta = [a_0, a_f]$. Поэтому для нее существует единственная и бесконечно дифференцируемая обратная функция $\tau = \tau(s)$, где $\tau(\cdot): \Delta \rightarrow \sigma$. Обе указанные функции однозначно определяются заданием элементов орбиты космического аппарата. В дальнейшем будем считать их, как и ядро оператора в уравнении (3), заданными и удов-

летворяющими указанным условиям. Отсюда следует, что уравнение информационного состояния (3) можно представить в следующем виде:

$$\gamma_1(\rho, s) = \int_{a_0}^s M_1(\rho, s) \tilde{u}(s) ds, \quad (11)$$

где

$$M_1(\rho, s) = \tilde{M}(\rho, s) v^{-1}(s), \quad \tilde{M}(\rho, s) = M(\rho, \tau(s)), \quad \tilde{u}(s) = u(\tau(s)), \quad (12)$$

$\tau(s)$ – указанная выше функция, обратная по отношению к $s(\tau)$, $v(s)$ – скорость подспутниковой точки с координатой s , равная

$$v(s) = \dot{s}(\tau(s)) = \left. \frac{ds}{d\tau} \right|_{\tau=\tau(s)}. \quad (13)$$

При этом очевидно, что $v(s) > 0$ при любом рассматриваемом значении s . Новое ядро интегрального оператора (11) $M_1(\rho, s)$ определено на квадрате Δ^2 , является на нем *неотрицательным, ограниченным и кусочно-непрерывным*. Указанная замена переменной делает запись уравнения состояния более наглядной.

При этом будем предполагать, что соответствующий класс допустимых управляющих воздействий (7) с учетом введенных выше преобразований задан в виде:

$$U_{\Delta} = \{ \tilde{u}_{\Delta} = \tilde{u}(\cdot) : \Delta \rightarrow \mathbb{R}^1 \mid (\forall s \in \Delta)(0 \leq \tilde{u}(s) \leq c); S_{\tilde{u}} \}. \quad (14)$$

С прикладной точки зрения функцию $\tilde{M}(\rho, s)$ целесообразно представить в виде:

$$\tilde{M}(\rho, s) = K(\rho - s), \quad (15)$$

где $K(\alpha)$ – некоторая *неотрицательная четная интегрируемая функция*, удовлетворяющая условию нормировки:

$$\int_{-\infty}^{\infty} K(\alpha) d\alpha = 1. \quad (16)$$

Например, функцию $K(\alpha)$ можно задать следующим образом:

$$K(\alpha) = 1/2\varepsilon \text{ при } |\alpha| \leq \varepsilon, \quad K(\alpha) = 0 \text{ при } |\alpha| > \varepsilon, \quad (17)$$

где ε – заданная положительная величина. Очевидно, что в этом случае финальное состояние взаимодействия может быть найдено по формуле:

$$\gamma_1(\rho, a_f) = (2\varepsilon)^{-1} \int_{\rho-\varepsilon}^{\rho+\varepsilon} v^{-1}(s) \tilde{u}(s) ds. \quad (18)$$

Зададим минимизируемый терминальный функционал в следующем виде:

$$\begin{aligned} J(\tilde{u}_\sigma) &= h(\gamma_1(\cdot, a_f)) = 0,5 \|\gamma_1(\cdot, a_f) - \gamma_3(\cdot)\|_{L^2(\Delta)}^2 = \\ &= 0,5 \int_{a_0}^{a_f} |\gamma_1(\rho, a_f) - \gamma_3(\rho)|^2 d\rho, \end{aligned} \quad (19)$$

где $\gamma_3(\rho)$ – заданная неотрицательная вещественная ограниченная функция, заданная на отрезке $\Delta = [a_0, a_f]$ и отражающая *желательный конечный эффект взаимодействия*. Будем называть управляющее воздействие *оптимальным*, если функционал (19), характеризующий ”расстояние” между достигнутым и заданным информационными состояниями в метрике гильбертова пространства $L^2(\Delta)$, достигает *минимального* значения.

При переходе от текущего времени τ к координате подспутниковой точки s уравнение расхода ресурса (8) для $\tilde{q}(s) = q(\tau(s))$ примет следующий вид:

$$\frac{d\tilde{q}}{ds} = -\alpha v^{-1}(s) \tilde{u}(s) \quad (20)$$

при начальном условии $\tilde{q}(a_0) = q_0 > 0$. Конечное состояние ресурса в соответствии с (9) должно удовлетворять краевому условию:

$$\tilde{q}(a_f) = q_f \geq 0. \quad (21)$$

Как уже отмечалось выше, оптимальное решение соответствующей задачи минимизации функционала (19) существует и может

быть найдено с помощью принципа максимума для уравнений в гильбертовом пространстве [5]. При этом искомое решение удовлетворяет условию максимума соответствующей функции Понтрягина:

$$\tilde{H}(\psi_0(\cdot), p_0, s, u^*(s)) = \max_{0 \leq \tilde{u} \leq c} \tilde{H}(\psi_0(\cdot), p_0, s, \tilde{u}), \quad (22)$$

где

$$\tilde{H}(\psi_0(\cdot), p_0, s, u) = \tilde{g}(\psi_0(\cdot), p_0, s) \tilde{u}, \quad (23)$$

$$\tilde{g}(\psi_0(\cdot), p_0, s) = \tilde{d}(\psi_0(\cdot), s) - p_0 \alpha v^{-1}(s). \quad (24)$$

Здесь $\tilde{d}(\psi_0(\cdot), s)$ определяется соотношением:

$$\tilde{d}(\psi_0(\cdot), s) = \int_{a_0}^{a_1} \psi_0(\rho) M_1(\rho, s) d\rho, \quad (25)$$

в котором $\psi_0(\cdot)$ – сопряженная переменная, не зависящая от времени и представляющая собой вещественную функцию, определенную на Δ , а p_0 – дополнительная сопряженная величина, которая в данном случае представляет собой неотрицательную константу.

Предположим дополнительно, что в данной задаче выполняется следующее условие:

$$\text{mes}\{s \mid \tilde{d}(\psi_0(\cdot), s) - p_0 \alpha v^{-1}(s) = 0\} = 0, \quad (26)$$

которое будем называть *условием регулярности*.

При выполнении условия регулярности рассматриваемой задачи соответствующая экстремаль Понтрягина определяется однозначно следующей формулой:

$$\tilde{u}'(s, \psi(\cdot), p) = \arg \max_{0 \leq \tilde{u} \leq c} [\tilde{g}(\psi(\cdot), p, s) \tilde{u}] = \chi_- [\tilde{g}(\psi(\cdot), p, s)], \quad (27)$$

где

$$\chi_-(z) = \begin{cases} 1 & \text{при } z > 0, \\ 0 & \text{при } z \leq 0. \end{cases} \quad (28)$$

Искомые сопряженные переменные $\Psi_0(\cdot)$, p_0 при этом определяются следующими условиями трансверсальности:

$$\left. \begin{aligned} \Psi(\rho) &= \gamma_3(\rho) - \int_{a_0}^{a_f} M_1(\rho, s) \tilde{u}(s, \Psi(\cdot), \rho) ds, \\ p \left(q_0 - \alpha \int_{a_0}^{a_f} v^{-1}(s) \tilde{u}'(s, \Psi(\cdot), \rho) ds \right) &= 0, \end{aligned} \right\}, \quad (29)$$

в которые следует подставить выражение (27). В результате получим искомое оптимальное управление в виде:

$$\tilde{u}_1^*(s) = \tilde{u}'(s, \Psi_0(\cdot), p_0). \quad (30)$$

Отметим, что в данном случае можно исключить сопряженную переменную $\Psi_0(\cdot)$ подстановкой первого из уравнений (29) в (27). В результате получим параметрическое нелинейное *интегральное уравнение Бутковского* [3] относительно искомого управления:

$$\tilde{u}(s, p) = \chi_- \left\{ \int_{a_0}^{a_f} M_1(\rho, s) \left[\gamma_3(\rho) - \int_{a_0}^{a_f} M_1(\rho, \sigma) \tilde{u}(\sigma, p) d\sigma \right] - p \alpha v^{-1}(s) \right\}. \quad (31)$$

Обозначая решение этого уравнения через $\tilde{u} = \tilde{w}(s, p)$, рассмотрим функции:

$$\tilde{f}_1(p) = \alpha \int_{a_0}^{a_f} v^{-1}(s) \tilde{w}(s, p) ds \quad (32)$$

и

$$\tilde{f}_2(p) = 0,5 \int_{a_0}^{a_f} \left| \int_{a_0}^{a_f} M_1(\rho, s) \tilde{w}(s, p) ds - \gamma_3(\rho) \right|^2 d\rho, \quad (33)$$

первая из которых характеризует *расход* ресурса, а вторая – *финальное отклонение* достигнутого информационного состояния от заданного.

Анализ этих функций показывает, что в общем случае искомое значение параметра p может быть найдено по формуле:

$$p_0 = \max \left\{ p_1, \max_{p \geq 0} \arg \min f_2(p) \right\}, \quad (34)$$

где p_1 – решение алгебраического уравнения:

$$f_1(p) = q_0, \quad (35)$$

в котором q_0 – заданное начальное значение бортового ресурса.

В результате искомое оптимальное управление (30) может быть представлено в виде:

$$\tilde{u}_1^*(s) = \tilde{w}(s, p_0). \quad (36)$$

При этом естественно предположить, что

$$q_0 < \alpha \int_{a_0}^{a_f} \tilde{w}(s, 0) v^{-1}(s) ds < q_{\max} = c \alpha (t_f - t_0). \quad (37)$$

В заключение настоящего п. 4.1. отметим важное свойство полученного оптимального управления – вследствие линейности функции Понтрягина оптимальное управление (скалярное по условию задачи) является кусочно-постоянным и носит *релейный характер*, т. е. оптимальная программа информационного взаимодействия КА с поверхностью Земли сводится к включению и выключению бортового прибора в некоторые моменты времени (в конечном счете, и подлежащие определению) при максимально возможной интенсивности информационного взаимодействия. Отсюда, в частности, следует возможный метод решения интегрального уравнения (31) путем соответствующего сведения его к конечномерной задаче оптимизации.

4.2. Общая задача – линейный функционал. При постановке и решении задач оптимального управления информационным взаимодействием определенным прикладной интерес представляет рассмотрение *линейных терминальных функционалов* качества процесса управления, заданных в следующем виде:

$$J(\tilde{u}_\Delta) = h(\gamma_1(\cdot, a_f)) = \int_{a_0}^{a_f} \xi(\rho) \gamma_1(\rho, a_f) d\rho, \quad (38)$$

где $\xi(\rho)$ – заданная *ограниченная неотрицательная вещественная* функция, заданная на множестве $\Delta = [a_0, a_f]$ и отражающая *относительную ценность информации*, получаемой от подспутниковой точки с координатой ρ . Будем считать рассматриваемый процесс управления *оптимальным*, если интеграл (38) достигает своего *максимального*

значения. Из принципа максимума следует, что если в данном случае оптимальное управление существует, то оно доставляет максимум соответствующей функции Понтрягина, которая определяется теми же выражениями (22) – (25), что и в предыдущей задаче п. 4.1. Вместе с тем, уравнение для сопряженной переменной $\Psi_0(\cdot)$, определяемое соответствующим условием трансверсальности, в данном случае имеет (вследствие линейности функционала) следующий простой вид:

$$\Psi_0(\rho) = \xi(\rho). \quad (39)$$

Соответствующая экстремаль Понтрягина при этом определяется выражением (27) при условии (39), откуда следует, что она в этом случае определяется формулой:

$$\tilde{u}'(s, \xi(\cdot), p) = c\chi_- \left[\tilde{d}(\xi(\cdot), s) - p\alpha v^{-1}(s) \right], \quad (40)$$

где

$$\tilde{d}(\xi(\cdot), s) = \int_{a_0}^{a_f} M_1(\rho, s) \xi(\rho) d\rho. \quad (41)$$

Требуемое значение неизвестной сопряженной константы $p = p_0$ при этом определяется как решение алгебраического уравнения:

$$\alpha \int_{a_0}^{a_f} u'(s, \xi(\cdot), p) v^{-1}(s) ds = q_0. \quad (42)$$

Тогда искомое оптимальное управление можно представить формулой:

$$\tilde{u}_2^*(s) = \tilde{u}'(s, \xi(\cdot), p_0). \quad (43)$$

При этом, как и в п. 4.1, предполагается, что

$$q_0 < \alpha \int_{a_0}^{a_f} \tilde{u}'(s, \xi(\cdot), 0) v^{-1}(s) ds < q_{\max} = \alpha c(t_f - t_0). \quad (44)$$

4.3. Предельная локализация информационного взаимодействия – квадратичный функционал. В заключение настоящей статьи рассмотрим варианты задач пп. 4.1. и 4.2 для случая, когда в соответ-

ствующем уравнении состояния (11) с учетом (12) ядро $\tilde{M}(\rho, s)$ задано соотношениями (16) – (17) при условии $\varepsilon \rightarrow 0$, т. е. представляет собой обобщенную δ -функцию. Назовем этот случай случаем *предельной локализации*. В этом случае модель информационного взаимодействия существенно упрощается и определяется выражением:

$$\gamma(\rho, t_f) = \gamma_1(\rho, a_f) = v^{-1}(\rho) \tilde{u}(\rho). \quad (45)$$

Класс допустимых управлений по-прежнему будем определять соотношением (14). Относительная простота математической модели (45) позволяет легко получить оптимальное управление. Вместе с тем, подобная модель имеет практическое значение в тех случаях, когда диаграмма направленности взаимодействия имеет вид достаточно узкого луча, ориентированного в подспутниковую точку КА.

Рассмотрим вначале соответствующую задачу минимизации квадратичного терминального функционала (19), который здесь принимает следующий вид:

$$J(\tilde{u}_\Delta) = 0,5 \int_{a_0}^{a_f} |v^{-1}(s) \tilde{u} - \gamma_3(s)|^2 ds, \quad (46)$$

где $\gamma_3(\rho)$ – заданная неотрицательная вещественная ограниченная функция, определенная на множестве $\Delta = [a_0, a_f]$. При этом будем предполагать, что бортовой ресурс ограничен и описывается прежней моделью (20)–(21).

Для нахождения оптимального управления воспользуемся методом Лагранжа, который позволяет свести рассматриваемую задачу к задаче безусловной минимизации [1]. С этой целью запишем ограничение на расход ресурса (21) в виде:

$$-q_f = \alpha \int_{a_0}^{a_f} v^{-1}(s) \tilde{u} ds - q_0 \leq 0 \quad (47)$$

и рассмотрим соответствующий функционал Лагранжа

$$J_L(\tilde{u}_\Delta) = 0,5 \int_{a_0}^{a_f} |v^{-1}(s) \tilde{u} - \gamma_3(s)|^2 ds + p \left(\alpha \int_{a_0}^{a_f} v^{-1}(s) \tilde{u} ds - q_0 \right), \quad (48)$$

в котором p – неопределенный множитель Лагранжа, удовлетворяющий условию $p \geq 0$. Раскрывая скобки в функционале (48), получим выражение:

$$J_L(\tilde{u}_\Delta) = \int_{a_0}^{a_f} (0,5v^{-2}(s)\tilde{u}^2 - v^{-1}(s)(\gamma_3(s) - p\alpha)\tilde{u}) ds + \dots, \quad (49)$$

в котором через ... обозначены слагаемые, не зависящие от \tilde{u} . Отсюда следует, что функционал Лагранжа (48) достигает абсолютного минимума при

$$\tilde{u}_3^*(s) = \text{sat}_{[0,c]} \left[v(s)(\gamma_3(s) - p_0\alpha) \right], \quad (50)$$

где

$$\text{sat}_{[0,c]}(z) = \begin{cases} c & \text{при } z > 0, \\ z & \text{при } z \in [0,c], \\ 0 & \text{при } z < 0 \end{cases} \quad (51)$$

– неотрицательная функция "насыщения" с порогом c . При этом очевидно, что неопределенный множитель Лагранжа - число p_0 :

а) определяется как неотрицательный корень нелинейного алгебраического уравнения:

$$q(p) = \alpha \int_{a_0}^{a_f} v^{-1}(s) \text{sat}_{[0,c]} \left[v(s)(\gamma_3(s) - p\alpha) \right] ds = q_0, \quad (52)$$

если

$$q_0 < q_3^* = \alpha \int_{a_0}^{a_f} v^{-1}(s) \text{sat}_{[0,c]} \left[v(s)\gamma_3(s) \right] ds, \quad (53)$$

где q_3^* – расход ресурса без учета его ограниченности;

б) равно 0 в противном случае (т. е. при $q_0 > q_3^*$).

Отметим, что если $c = \infty$, то

$$q_3^* = \alpha \int_{a_0}^{a_f} \gamma_3(s) ds \quad (54)$$

и от скорости подспутниковой точки $v(s)$ не зависит.

В заключение данного пункта рассмотрим случай, когда множество допустимых значений управляющего воздействия \tilde{u} состоит из двух значений: $u = 0$ (взаимодействие не осуществляется) и $u = c$ (взаимодействие осуществляется с максимальной интенсивностью) – управление носит дискретный характер. В этом случае минимизация функционала Лагранжа (48) на указанном множестве приводит к следующему результату:

$$\tilde{u}_{3d}^*(s) = c\chi_- \left[v(s)(\gamma_3(s) - p_0c) - 0,5c \right] \quad (55)$$

При этом множитель Лагранжа p_0 определяется по следующему правилу:

а) как неотрицательный корень алгебраического уравнения:

$$c\alpha \int_{a_0}^{a_f} v^{-1}(s) \chi_- \left[v(s)(\gamma_3(s) - p_0c) - 0,5c \right] ds = q_0 \quad (56)$$

– в случае, если:

$$q_0 < q_{3d}^* = c\alpha \int_{a_0}^{a_f} v^{-1}(s) \gamma_- \left[v(s)\gamma_3(s) - 0,5c \right] ds; \quad (57)$$

б) $p_0 = 0$ при $q_0 > q_{3d}^*$ (последнее означает, что имеющийся ресурс достаточно велик, так что в данных условиях его можно считать неограниченным).

4.4. Предельная локализация информационного взаимодействия – линейный функционал. Эта задача аналогична задаче п. 4.2, в которой оптимальность понимается в смысле максимума линейного терминального функционала (38), который в данном случае с учетом (45) принимает вид:

$$J(\tilde{u}_\Delta) = h(\gamma_1(\cdot, a_f)) = \int_{a_0}^{a_f} \xi(\rho) v^{-1}(\rho) \tilde{u}(\rho) d\rho, \quad (58)$$

где $\xi(\rho)$ – заданная ограниченная неотрицательная вещественная функция, заданная на множестве $\Delta = [a_0, a_f]$. Сохраняя ограничения на ресурс (47), по аналогии с предыдущем пунктом введем соответствующую функцию Лагранжа (здесь задача преобразована в эквивалентную задачу минимизации):

$$J_L(\tilde{u}_\Delta) = - \int_{a_0}^{a_f} \xi(s) v^{-1}(s) \tilde{u} ds + p \left(\alpha \int_{a_0}^{a_f} v^{-1}(s) \tilde{u} ds - q_0 \right), \quad (59)$$

в котором p – неопределенный множитель Лагранжа, удовлетворяющий условию $p \geq 0$. Отсюда следует, что искомое оптимальное управление имеет следующий вид:

$$\tilde{u}_4^*(t) = c \chi_- [\xi(s) - p_0 c], \quad (60)$$

где число p_0 :

а) определяется как неотрицательный корень алгебраического уравнения относительно p :

$$\alpha c \int_{a_0}^{a_f} v^{-1}(s) \chi_- [\xi(s) - pc] ds = q_0 \quad (61)$$

в предположении, что:

$$q_0 < q_4^* = \alpha c \int_{a_0}^{a_f} v^{-1}(s) \gamma_- [\xi(s)] ds, \quad (62)$$

где q_4^* – расход ресурса при отсутствии ограничений;

б) равно 0 в противном случае.

Последнее означает, что имеющийся ресурс достаточно велик, так что его можно считать неограниченным и использовать максимальную интенсивность взаимодействия всегда, когда функция $\xi(s)$ принимает положительные значения. Таким образом, в рассмотренной задаче оптимальное управление информационным взаимодействием носит достаточно очевидный *релейный* характер – бортовой прибор взаимодействия при ограниченном ресурсе включается с максимальной интенсивностью только на тех участках трассы, для которых функция ценности получаемой информации превышает некоторое пороговое значение, определяемое величиной имеющегося бортового ресурса.

5. Заключение. Проектирование и создание космических аппаратов для сбора информации о состоянии окружающей физической среды (и, прежде всего, о состоянии объектов на поверхности Земли) представляет собой исключительно трудную инженерно-техническую проблему. Это связано со сложными условиями их функционирования

и высокой стоимостью выведения на требуемую орбиту. При этом особую актуальность приобретает обеспечение высокой эффективности целевого функционирования подобных орбитальных средств и, в связи с этим, разработка соответствующих оптимальных алгоритмов управления целевой бортовой аппаратурой с учетом ограниченности расходуемых при этом бортовых ресурсов. В настоящей статье рассмотрены некоторые из подобных задач космической кибернетики. Показано, что в рамках принятой модели информационного взаимодействия эти задачи сводятся к задачам оптимального программного управления некоторой специальной дифференциальной динамической системой в гильбертовом пространстве состояний. Для решения указанных задач в статье использованы расширенный принцип максимума Л.С. Понтрягина и общая концепция Лагранжа. Предложенные алгоритмы управления могут быть использованы как эталонные решения в практической космонавтике при совершенствовании существующих и при разработке перспективных космических аппаратов, предназначенных для информационного взаимодействия с окружающей физической средой.

Литература

1. *Алексеев В.М., Тихомиров В.М., Фомин С.В.* Оптимальное управление // М.: Физматлит. 2007. 407 с.
2. *Ахметов Р.Н., Васильев И.Е., Капитонов В.А., Охтилев М.Ю., Соколов Б.В.* Концепция создания и применения перспективной АСУ подготовки и пуска ракеты космического назначения "Союз-2": новые подходы к интеграции, интеллектуализации, управлению // *Авиакосмическое приборостроение*. М.: ООО Издательство «Научтехлитиздат». 2015. №4. С.3–54.
3. *Бутковский А.Г.* Теория оптимального управления системами с распределенными параметрами // М.: Наука. 1965. 474 с.
4. *Вайнберг М.М.* Вариационный метод и метод монотонных операторов // М.: Наука. 1972. 416 с.
5. *Егоров Ю.В.* Необходимые условия оптимальности управления в банаховых пространствах // *Математический сборник*. 1964. Т.64. №1. С. 79–101.
6. Журнал "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса". 2004–2014. URL: <http://jr.rse.cosmos.ru>. (дата обращения: 12.05.2015).
7. *Калинин В.Н.* Космический аппарат как объект системных исследований // *Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского*. СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского. 2014. Вып. 640. С. 80–89.
8. *Калинин В.Н.* Математическая модель информационного взаимодействия космического аппарата с поверхностью Земли // *Труды СПИИРАН*. 2014. Вып. 3(34). С. 33–56.
9. *Калинин В.Н.* О теории управления активными подвижными объектами // *Известия вузов. Приборостроение*. 1981. № 6. С. 26–31.
10. *Калинин В.Н.* Современная космическая кибернетика – методологические основы и направления исследований // *Информация и космос*. 2007. № 3. С. 7–16.

11. Калинин В.Н. Теория управления космическим аппаратом: на основе концепции активного подвижного объекта: монография // СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского. 2014. 188 с.
12. Колмогоров А.Н., Фомин С.В. Элементы теории функций и функционального анализа // М.: Физматлит. 2004. 572 с.
13. Майданович О.В., Охтилев М.Ю., Соколов Б.В., Юсупов Р.М. Комплексная автоматизация мониторинга состояния космических средств на основе интеллектуальных информационных технологий // Приложение к журналу «Информационные технологии». 2011. №10. 32 с.
14. Охтилев М.Ю., Соколов Б.В., Юсупов Р.М. Теоретические и технологические основы концепции проактивного мониторинга и управления сложными объектами // Известия ЮФУ. Технические науки. Таганрог: Южный федеральный университет. 2015. №1. С.162–174.
15. Понтрягин Л.С. Математическая теория оптимальных процессов // М.: Наука. 1969. 391 с.

References

1. Alekseev V.M., Tichomirov V.M., Fomin S.V. *Optimal'noe upravlenie* [Optimum control]. М.: Fizmatlit. 2007. 407 p. (In Russ.).
2. Ahmetov R.N., Vasiliev I.E., Kapitonov V.A, Ohtilev M.Ju, Sokolov B.V. [The concept of creation and application of the perspective automated control system by preparation and rocket firing of space assigning of "Sojuz-2": new approaches to integration, intellectualizations, to control]. *Aviakosmicheskoe priborostroenie – Aerospace instrument making*. М.: ООО Izdatel'stvo "Nauchtehlitizdat". 2015. vol. 4. pp. 3–54. (In Russ.).
3. Butkovsky A.G. *Teoriia optimal'nogo upravleniia sistemami s raspredelennymi parametrami* [The theory of optimum control of systems with the distributed parameters]. М.: Nauka. 1965. 474 p. (In Russ.).
4. Vajnberg M.M. *Variazionnyi metod i metod monotonykh operatorov* [Variation method and method of monotonous operators]. М.: Nauka. 1972. 416 p. (In Russ.).
5. Egorov Ju.V. [Necessary conditions of an optimality of management in Banach spaces]. *Mathematicheskij sbornik – Mathematics collection*. 1964. vol. 64. pp. 79–101. (In Russ.).
6. *Zhurnal "Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa"* [Journal Current problems in remote sensing of the earth from space]. 2004–2014. Available at: <http://jr.rse.cosmos.ru>. (accessed: 12.05.2015). (In Russ.).
7. Kalinin V.N. [The spacecraft as object of system researches]. *Trudy Voenno-kosmicheskoi akademii imeni A.F. Mozhajskogo – Proceedings of Mozhajsky Military-space academy*. SPb.:VKA im. A.F. Mozhajskogo. 2014. vol. 640. pp. 80–89. (In Russ.).
8. Kalinin V.N. [Mathematical model of informational interaction of the spacecraft with a surface of the Earth]. *Trudy SPIIRAN – SPIIRAS Proceedings*. 2014. vol. 3(34). pp. 33–56. (In Russ.).
9. Kalinin V.N. [About the theory of management of active mobile objects]. *Izv. vyssh. uchebn. zavedenij: Priborostroenie – Proceedings of the higher educational institution: Instrumentation*. 1981. vol. 6. pp. 26–31. (In Russ.).
10. Kalinin V.N. [Modern space cybernetics – methodological bases and the directions of researches]. *Informacija i kosmos — Information and space*. 2007. vol. 3. pp. 7–16. (In Russ.).
11. Kalinin V.N. *Teoria upravlenija kosmicheskim apparatom: na osnove koncepcii aktivnogo podvizhnogo ob'ekta* [Theoretical bases of management of the spacecraft on

- the basis of the active mobile object concept]. SPb.:VKA im. A.F. Mozhajskogo. 2014. 188 p. (In Russ.).
12. Kolmogorov A.N., Fomin S.V. *Elementy teorii funktsii i funktsional'nogo analiza* [Elements of the theory of functions and the functional analysis]. M.: Fizmatlit. 2004. 572 p. (In Russ.).
 13. Majdanovich O.V., Ohtilev M.Ju, Sokolov B.V., Jusupov R.M. *Kompleks-naja avtomatizacija monitoringa sostojanja kosmicheskikh sredstv na osnove intellektual'nykh informacionnykh tehnologij* [Complex automatization of monitoring of a condition of space means on the basis of intellectual information technology. Application to magazine "Information technology"]. 2011. no. 10. 32 p. (In Russ.).
 14. Ohtilev M.Ju, Sokolov B.V., Jusupov R.M. [Theoretical and technological bases of the concept of proactive monitoring and control of complicated plants]. *Izvestija JuFU. Tehnicheskie nauki – Informations SFU*. Engineering science. Taganrog: Southern federal university. 2015. vol. 1. pp. 162–174. (In Russ.).
 15. Pontrjagin L.S. *Matematicheskaia teoriia optimal'nykh processov* [The mathematical theory of optimum processes]. M.: Nauka. 1969. 391 p. (In Russ.).

Калинин Владимир Николаевич — д-р техн. наук, профессор, Заслуженный деятель науки и техники РФ; действительный член Российской академии космонавтики имени К.Э. Циолковского, профессор, Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского. Область научных интересов: теория системных исследований, космическая кибернетика и информатика, теория оптимального управления динамическими системами, автоматизированные системы управления, подготовка инженерных кадров и новые информационно-дидактические технологии в высшем образовании. Число научных публикаций — 170. kvn.112@mail.ru; ул. Ждановская 13, Санкт-Петербург, 197198; п.т.: +7(812)3479508, Факс: +7(812)3284450.

Kalinin Vladimir Nikolaevich — Ph.D., Dr. Sci., professor, Honored Scientists of the Russian Federation; The full member of the Russian academy of astronautics of a name K.E. Tsiolkovsky, professor, Mozhaisky Military Space Academy. Research interests: the theory of system researches, space cybernetics and computer science, the theory of optimum control of the dynamic systems, the automated control systems, preparation of the engineering staff and new information-didactic technologies in higher education. The number of publications — 170. kvn.112@mail.ru; 13, Zhdanovskaya street, St.-Petersburg, 197198, Russia; office phone: +7(812)3479508, Fax: +7(812)3284450.

РЕФЕРАТ

Калинин В.Н. **О некоторых задачах оптимального управления информационным взаимодействием космического аппарата с поверхностью Земли.**

В настоящей статье рассматриваются некоторые детерминированные задачи оптимального управления информационным взаимодействием космического аппарата с поверхностью Земли. Предполагается, что космический аппарат совершает неуправляемый полет по орбите вокруг Земли, информационное взаимодействие с областью на поверхности Земли осуществляется с помощью одного прибора. На борту космического аппарата имеется один ограниченный непополняемый ресурс, расходуемый в процессе информационного взаимодействия.

В качестве множества информационного взаимодействия на земной поверхности рассматривается отрезок трассы полета. При этом состояние информационного взаимодействия для каждого момента времени характеризуется неотрицательной функцией координаты подспутниковой точки, представляющей распределение линейной плотности полученной информации по заданному отрезку трассы полета. Соответствующая динамическая модель информационного взаимодействия представлена в виде линейного интегрального оператора, отображающего класс допустимых управляющих воздействий в пространство информационных состояний, в котором вводится топология гильбертова пространства измеримых по Лебегу и суммируемых с квадратом модуля вещественных функций. Под управляющим воздействием здесь понимается интенсивность (скорость) поступления информации. Процесс расхода ресурса при этом описывается обыкновенным дифференциальным уравнением.

Рассматриваемые задачи программного оптимального управления ставятся как задачи минимизации в классе допустимых управлений выпуклых терминальных функционалов Майера, представляющих собой квадратичные или линейные функционалы от конечного информационного состояния. Класс допустимых управлений при этом представляет собой выпуклый компакт в соответствующем гильбертовом пространстве управлений. Показано, что в этом случае множества достижимости в пространстве информационных состояний слабо компактны, а минимизируемые функционалы слабо полунепрерывны снизу в классе допустимых управлений, откуда следует, что решение рассматриваемых задач управления существует.

В статье рассмотрены четыре варианта указанных задач оптимального управления в гильбертовом пространстве информационных состояний. Для их решения использованы расширенный принцип максимума Л.С. Понтрягина и общая концепция Лагранжа. Получены соответствующие алгоритмы формирования искомых оптимальных программ управления.

SUMMARY

Kalinin V.N. On Some Problems of Optimum Control of Informational Interaction of a Space Vehicle with the Surface of the Earth.

In the present paper, some determined problems of optimum control of informational interaction of the spacecraft with the surface of the Earth are considered. It is supposed that the spacecraft makes uncontrollable earth-orbital flight ; informational interaction with an area on the surface of the Earth is carried out by means of one device. Onboard spacecraft there is one not supplemented resource spent in the course of informational interaction.

As a set of informational interaction on the Earth's surface, the segment of a line of flight is considered. Thus, the condition of informational interaction for each instant is characterized by nonnegative function of coordinate of the subsatellite point representing distribution of a linear denseness of the received information on the set segment of a line of flight. The corresponding dynamic model of informational interaction is presented in the form of the linear integral operator mapping a class of admissible operating actions in space of informational conditions, in which the Hilbert space topology on Lebesgue-measurable and summarized with quadrate of the module of real functions is introduced. Operating action here is understood as intensity (velocity) of inflow of the information. Process of the expense of a resource is thus described by an ordinary differential equation.

Considered problems of program optimum control are put as a minimization problem in a class of admissible controls of convex terminal functionals of Mayer representing square or linear functionals from a final informational condition. The class of admissible controls thus represents a convex compact set in a corresponding Hilbert space of controls. It is shown that in this case sets of accessibility in space of informational conditions are poorly compact, and minimized functionals are poorly semicontinuous from below in a class of admissible controls, whence follows that the solution of considered problems of control exists.

In this paper, four variants of the specified problems of optimum control in a Hilbert space of informational conditions are considered. For their solution, the expanded maximum principle of Pontrjagin's and the general concept of Lagrange are used. Corresponding algorithms of shaping of required optimum time schedule controls are received.

А.Н. ОРЕШИН, И.А. САИТОВ, Н.А. ОРЕШИН
**СТРАТЕГИЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА УСЛУГ
ВИДЕОСВЯЗИ НА ОСНОВЕ ФИЛЬТРАЦИИ ВИДЕОПОТОКА,
СОДЕРЖАЩЕГО КАДРЫ-ВСТАВКИ С ИНФОРМАЦИОННЫМ
ШУМОМ**

Орешин А.Н., Саитов И.А., Орешин Н.А. Стратегия повышения качества услуг видеосвязи на основе фильтрации видеопотока, содержащего кадры-вставки с информационным шумом.

Аннотация. На основе проведенных исследований свойств изображений в работе предложена модель информационного шума в видеопотоке, а также алгоритм идентификации кадров, содержащих дополнительную информацию. Представлена методика идентификации кадров с информационным шумом на основе оценки интегральной яркости изображений кадров, корреляционного анализа гистограмм и сравнения коэффициентов аппроксимирующих полиномов. Показано, что совместное применение разработанной методики и технологий, обеспечивающих плавную трансформацию одного изображения в другое, способствует повышению качества предоставляемых услуг видеосвязи, защищая пользователя от различных негативных воздействий.

Ключевые слова: видеопоток, кадр-вставка, информационный шум, интенсивность пикселя, яркость изображения кадров.

Oreshin A.N., Saitov I.A., Oreshin N.A. Strategy of the Video Communication Services Quality Enhancement Based on the Filtration of a Video Stream Containing Snap-Insertions with Information Noise.

Abstract. Based on the performed image quality research, the given paper offers an information noise model in a video stream and an identification algorithm of the snapshots containing additional information. An identification procedure for the snapshots with information noise based on the integral brightness snaps image, correlation analysis of histograms and comparison of approximate polynomial indexes is presented. It is shown that a combined application of the developed procedure and technologies ensuring facile transformation of one image into another supports the available video communication services quality enhancement thus protecting users from various negative effects.

Keywords: video stream, snap-insertion, information noise, pixel intensity, shot image brightness.

1. Введение. Вследствие событий в Украине экономика России оказалась в блокаде санкций. Аппарат правительства прорабатывает ответ на санкции Запада для защиты интересов государства, граждан, национальной экономики и финансовой системы. Ключевое звено в системе экономики и финансов занимает человек, поэтому в первую очередь необходимо учесть все возможные каналы дестабилизирующего воздействия на него. Один из таких каналов возникает при оказании услуг видеосвязи. Качество услуг видеосвязи существенно зависит от достоверности передаваемых по каналу видеосвязи данных, в том числе отсутствия или наличия в видеокдрах информационного шума инъективно или биективно дополняющего изображения. Информационный шум различного характера может оказывать негативное воздей-

стве на пользователя и использоваться как инструмент влияния на лиц принимающих решения, определяющих вектор развития нашего государства.

2. Актуальность решаемой технической задачи. Высокая технологическая и психологическая активность, современные технологии, а вследствие этого жесткая конкуренция подталкивают человечество к поиску дополнительных механизмов генерации и активации информационного шума в видеопотоке, оказывающего в большей степени сублиминальное влияние – воздействие на уровень бессознательного восприятия человека с помощью подпороговых стимулов.

Одним из вариантов воздействия на подсознание интересующего лица является внедрение в некоторые изображения видеокadres информационного шума, как во время трансляций телепередач, так и во время видеоконференций.

На плановом заседании рабочей группы депутатов РФ, спикер Государственной думы РФ Сергей Нарышкин затронул вопрос о создании и поддержки Евросоюзом информационного шума вокруг Украины, использующегося как часть информационной войны и информационного давления на отдельные политические силы, а не достоверного, объективного информационного пространства.

Ввести информацию в канал видеосвязи можно разными способами:

- генерацией информационного шума и отображением его на изображениях кадров видеопотока обслуживающим персоналом;
- видеовставкой кадра с информационным шумом с помощью специальных программ;
- видеовставкой на абонентском или линейном кроссе и др.

Для предотвращения такого рода влияния на общественное и индивидуальное мнение, убеждение, восприятие и сознание, актуальными становятся задачи по идентификации кадров с информационным шумом и восстановления видеопотока.

Концептуальным решением большинства известных методов идентификации кадров видеопотока является сравнение интегральных яркостей двух последовательных кадров с априорно заданным ее пороговым значением. Данный механизм не является идеальным, с точки зрения ошибки принятия решения по идентификации интересующих кадров, так как динамика смены изображений в кадрах видеопотока не позволяет вычислить требуемое для сравнения пороговое значение яркости.

3. Свойства изображений в кадрах видеопотока. Идентификацию кадров с информационным шумом в видеопотоке будем осуществлять в предположении, что изображения видеокadres $K_{видк}$

и кадров-вставок $K_{вст k}$ являются растровыми, то есть представляющие собой сетку пикселей – цветных точек на носителе цифрового изображения.

К важным характеристикам растрового изображения отнесем:

- ограниченное количество пикселей, которое может указываться отдельно как по ширине и высоте, так и в целом на изображение;
- достаточное для практики количество используемых цветов, то есть глубина цвета;
- возможность использования различных цветовых моделей (цветовых пространств), в частности *RGB*, *HSI*, *CMYK*;
- высокое разрешение.

При растровом изображении k -ый кадр можно представить в виде множества пикселей $\pi_{i,j}^k$ на прямоугольном носителе, которое математически будем описывать двумерной матрицей $K_{пот k} = \|\pi_{i,j}^k\|, i = \overline{1, I}, j = \overline{1, J}$, где k – номер наблюдаемого кадра, i и j – соответственно номера столбца и строки матрицы, на пересечениях которых расположен пиксель.

Поскольку пиксель $\pi_{i,j}^k$ характеризуется определённым цветом $c_{i,j}^k, c_{ij}^k = (r_{ij}^k, g_{ij}^k, b_{ij}^k)$, то растровым изображением кадра является множество цветных точек на носителе видеoinформации: $I_k = \|\|c_{i,j}^k\|\|, i = \overline{1, I}, j = \overline{1, J}$.

С учетом введенных обозначений цвета пикселя $c_{i,j}^k$ и определения кадра K , изображение I_k k -го кадра представим в форме матрицы размером $I \times J$, где I и J – соответственно число столбцов и строк матрицы:

$$I_k = \begin{bmatrix} c_{0,0}^k & c_{0,1}^k & \cdots & c_{0,J-1}^k \\ c_{1,0}^k & c_{1,1}^k & \cdots & c_{1,J-1}^k \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ c_{I-1,0}^k & c_{I-1,1}^k & \cdots & c_{I-1,J-1}^k \end{bmatrix}. \quad (1)$$

4. Модель информационного шума. Природа информационного шума на изображениях кадров видеопотока многогранна. Предста-

вим информационный шум $I_{k''}$ k'' -го кадра в виде матрицы размером $L \times S$:

$$I_{k''} = \begin{bmatrix} c_{0,0}^{k''} & c_{0,1}^{k''} & \cdots & c_{0,S-1}^{k''} \\ c_{1,0}^{k''} & c_{1,1}^{k''} & \cdots & c_{1,S-1}^{k''} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ c_{L-1,0}^{k''} & c_{L-1,1}^{k''} & \cdots & c_{L-1,S-1}^{k''} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где L и S – соответственно число столбцов и строк матрицы; $c_{l,s}^{k''}$ – цвет пикселя матрицы информационного шума, поддерживающий прозрачность (цвет в глобальной палитре формата *GIF*).

Процедуру заливки изображения видеопотока информационным шумом изобразим в виде отображения $f: I_{k''} \rightarrow I_k$, носящего или инъективный $\forall c_{i,j}^k \in f(I_{k''}) \subseteq I_k \exists! c_{l,s}^{k''} \in I_{k''} : f(c_{l,s}^{k''}) = c_{i,j}^k$, или биективный $\forall c_{i,j}^k \in f(I_{k''}) = I_k \exists! c_{l,s}^{k''} \in I_{k''} : f(c_{l,s}^{k''}) = c_{i,j}^k$ характер, тогда пиксели изображения I_k k -го кадра (1) с информационным шумом примут цвет, при следующих условиях:

$$c_{i,j}^k = \begin{cases} c_{i,j}^k, & i, j \notin I_{k''}; \\ c_{l,s}^{k''}, & i, j \in I_{k''}, \text{ и } c_{l,s}^{k''} \text{ – непрозрачный}; \\ c_{i,j}^k, & i, j \in I_{k''}, \text{ и } c_{l,s}^{k''} \text{ – прозрачный.} \end{cases} \quad (3)$$

5. Обобщенный алгоритм идентификации кадров-вставок с информационным шумом в видеопотоке. Исследования статистических свойств изображений двух последовательных кадров в одном и разных сюжетах, а также кадров-вставок с информационным шумом показывают, что уменьшение значений ошибок первого α и второго β рода возможно благодаря использованию математического аппарата, обеспечивающего возможность осуществлять следующие операции:

- оценку интегральной яркости изображений кадров-сверток;
- проведение корреляционного анализа гистограмм изображений кадров видеопотока;

- сравнение коэффициентов полиномов, аппроксимирующих гистограммы изображений кадров видеопотока;
- принятие решения о классе кадров видеопотока.

С учетом сказанного, обобщенный алгоритм идентификации кадров-вставок с информационным шумом в видеопотоке представим в следующем виде (рисунок 1).

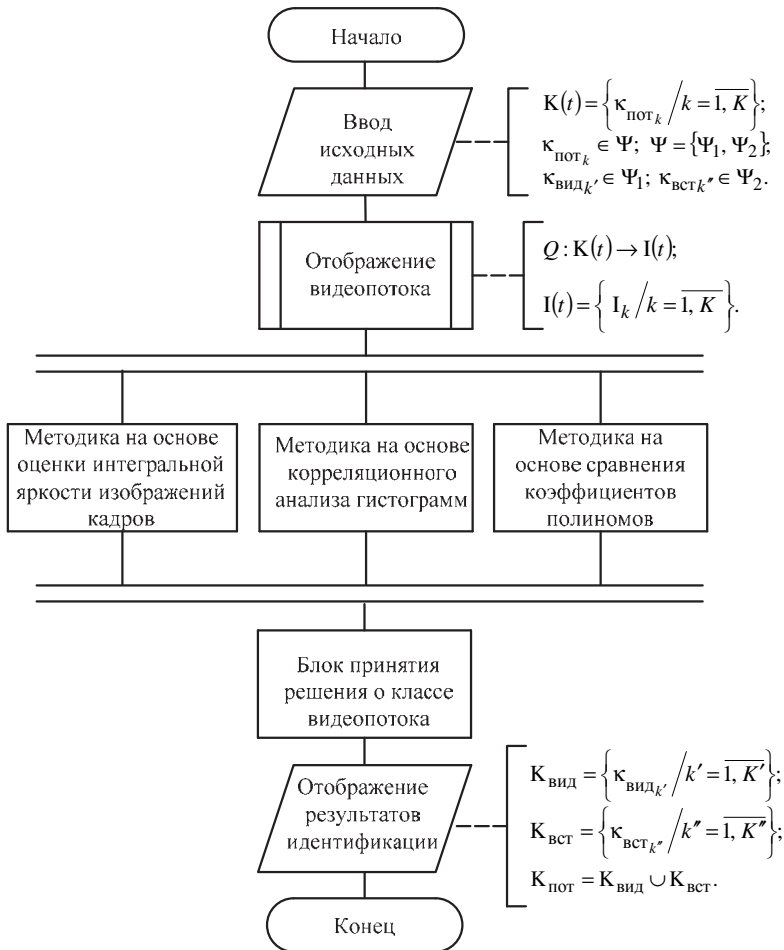


Рис. 1. Алгоритм идентификации кадров-вставок с информационным шумом в видеопотоке

Исходными данными для его функционирования являются:

$K(t) = \left\{ \kappa_{\text{пот}_k} \right\} = \kappa_{\text{пот}_1}, \kappa_{\text{пот}_2}, \kappa_{\text{пот}_3}, \dots$ – множество кадров в потоке видеоданных;

$\Psi_1, \Psi_2 \in \Psi$ – множество классов кадров в видеопотоке;

Ψ_1 – класс, включающий кадры видеоизображения $\kappa_{\text{вид}_k} \in \Psi_1$;

Ψ_2 – класс, включающий кадры-вставки $\kappa_{\text{вст}_k} \in \Psi_2$.

Предлагаемый алгоритм идентификации кадров-вставок с информационным шумом $K_{\text{вст}} = \left\{ \kappa_{\text{вст}_k} / k = \overline{1, K} \right\} \in \Psi_2$ основывается

на цифровых способах обработки видеоданных и начинается с определения последовательности изображений $I(t) = \left\{ I_k / k = \overline{1, K} \right\}$, элементами которого являются изображения I_k k -го кадра, входящего в видеопоток

$K(t) = \left\{ \kappa_{\text{пот}_k} / k = \overline{1, K} \right\}$, по выражению (1). Это действие математически опишем в виде отображения $Q: K(t) \rightarrow I(t)$, где

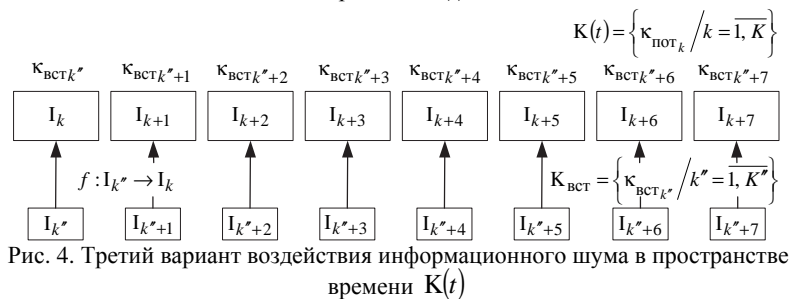
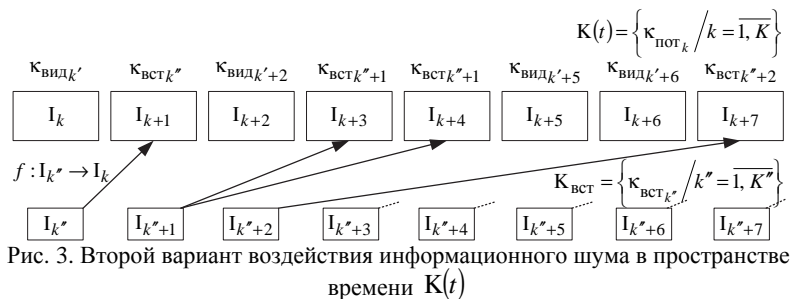
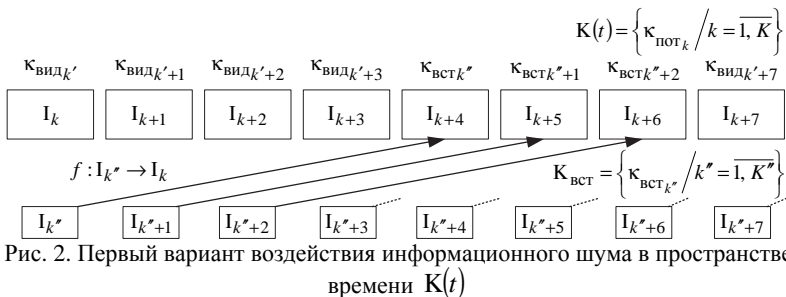
$I(t) = \left\{ I_k / k = \overline{1, K} \right\}$.

Затем путем цифровой обработки потока изображений кадров $I(t)$ тремя подходами, основанными на вычислении интегральной яркости изображений кадров-сверток, проведении корреляционно-го анализа гистограмм изображений кадров и сравнении коэффициентов полиномов, аппроксимируемых гистограммы изображений кадров, определяется по мажоритарному способу класс кадров видеопотока: $\kappa_{\text{вид}_k} \in \Psi_1, \kappa_{\text{вст}_k} \in \Psi_2$.

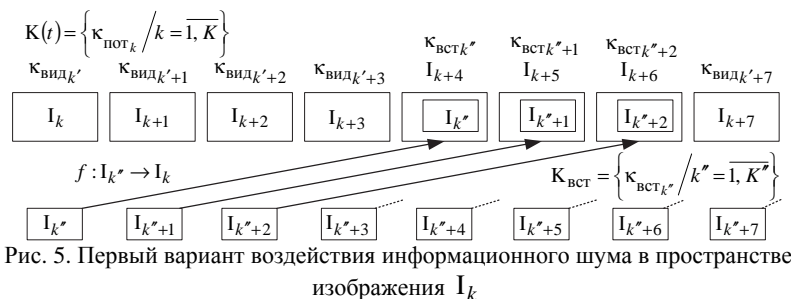
При решении задач фильтрации необходимо учитывать следующие особенности информационного шума в видеопотоке:

1. Характер воздействия информационного шума на изображения кадров видеопотока:

– в пространстве времени $K(t) = \left\{ \kappa_{\text{пот}_k} / k = \overline{1, K} \right\}$ (рисунки 2–4):



– в пространстве изображения I_k (рисунки 5–7)



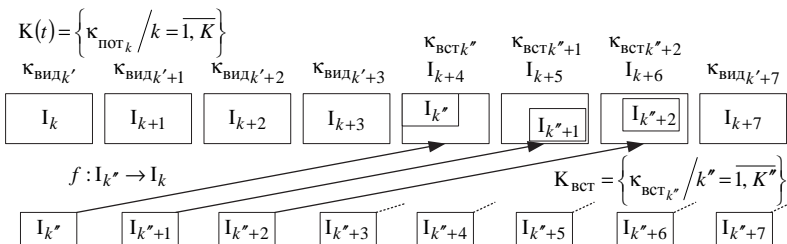


Рис. 6. Второй вариант воздействия информационного шума в пространстве изображения I_k

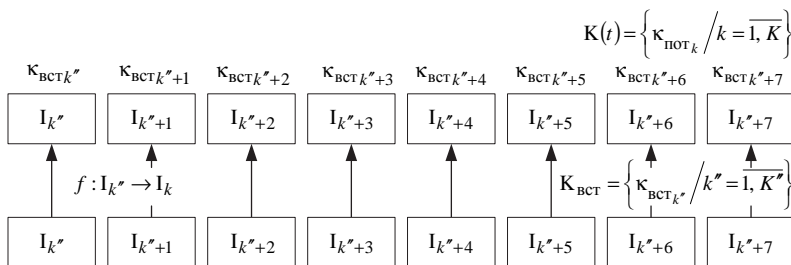


Рис. 7. Третий вариант воздействия информационного шума в пространстве изображения I_k

2. Яростные и цветные составляющие информационного шума по отношению к изображению.

3. Детерминированный или случайный характер информационного шума на изображениях I_k'' кадров видеопотока

$$K_{вст} = \left\{ K_{встk''} / k'' = \overline{1, K''} \right\}.$$

4. Процесс удаления информационного шума с изображения не позволит получить исходное изображение, как очистка принимаемого сигнала с аддитивным шумом в канале связи.

6. Методика идентификации кадров-вставок на основе оценки интегральной яркости изображений кадров-сверток. Первый подход к идентификации кадров-вставок с информационным шумом позволяет по отношению к известным методам обработки видеоданных уменьшить ошибки первого α и второго β рода при оценке классов кадров, в которых интегральная яркость изображений кадров сюжетной линии характеризуется некоторой стационарностью.

Он основан на анализе свойств и цифровой обработке изображений кадров, образующих последовательность (наблюдаемое окно), состоящую из восьми кадров: $I_{окн} = \left\{ I_k / k = \overline{1, 8} \right\}$. При этом для каж-

дого изображения I_k k -го кадра определяется интегральная яркость по выражению:

$$C_k = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J r_{i,j}^k + \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J g_{i,j}^k + \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J b_{i,j}^k. \quad (4)$$

В результате цифровой обработки пар изображений I_k и I_{k+1} кадров $\mathcal{K}_{\text{пот}_k}$, $\mathcal{K}_{\text{пот}_{k+1}}$ наблюдаемого окна находится окно $I_{\text{сверт}} = \left\{ I_{k,k+1} / k = \overline{1,7} \right\}$ изображений $I_{k,k+1}$ кадров-сверток, выражаемых матрицей

$$I_{k,k+1} = |I_k - I_{k+1}| = \begin{bmatrix} c_{0,0}^{(k,k+1)} & c_{0,1}^{(k,k+1)} & \dots & c_{0,J-1}^{(k,k+1)} \\ c_{1,0}^{(k,k+1)} & c_{1,1}^{(k,k+1)} & \dots & c_{1,J-1}^{(k,k+1)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ c_{I-1,0}^{(k,k+1)} & c_{I-1,1}^{(k,k+1)} & \dots & c_{I-1,J-1}^{(k,k+1)} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Элементами данной матрицы являются трехэлементные кортежи $c_{i,j}^{(k,k+1)} = \left(\left| r_{i,j}^k - r_{i,j}^{k,k+1} \right|, \left| g_{i,j}^k - g_{i,j}^{k,k+1} \right|, \left| b_{i,j}^k - b_{i,j}^{k,k+1} \right| \right)$, полученные путем вычитания по модулю соответствующих интенсивностей изображений I_k, I_{k+1} и которые в дальнейшем используются для определения интегральной яркости $C_{k,k+1}$ изображения $I_{k,k+1}$ кадра-свертки:

$$C_{k,k+1} = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \left| r_{i,j}^k - r_{i,j}^{k+1} \right| + \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \left| g_{i,j}^k - g_{i,j}^{k+1} \right| + \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \left| b_{i,j}^k - b_{i,j}^{k+1} \right|. \quad (6)$$

Оценка класса кадра $\Psi_1, \Psi_2 \in \Psi$ при таком подходе осуществляется способом сравнения величин $C_{k,k+1} \in C_{\text{сверт}}$, где $k = \overline{4,7}$ с пороговым значением $C_{\text{пор}_1}$ (рисунки 8–10), определяемым (с учетом априорно заданной абсолютной погрешности интегральной яркости изображений кадров-сверток Δ_1) как среднее арифметическое инте-

гральных яркостей изображений первых трех кадров-сверток, полученных в анализируемом окне:

$$C_{пор1} = \frac{\sum_{k=1}^3 C_{k,k+1}}{3} + \Delta_1. \quad (7)$$

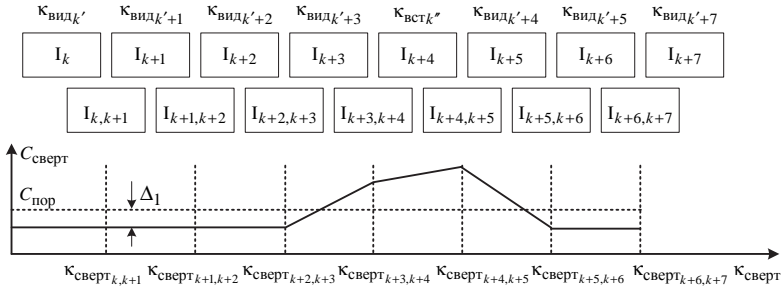


Рис. 8. Оценка интегральной яркости изображений кадров-сверток, при одном кадре-вставке

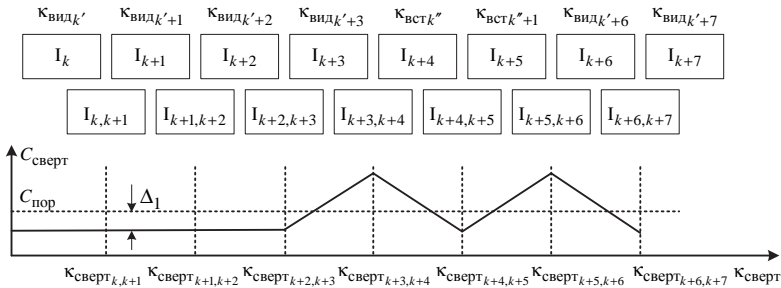


Рис. 9. Оценка интегральной яркости изображений кадров-сверток, при двух кадрах-вставок

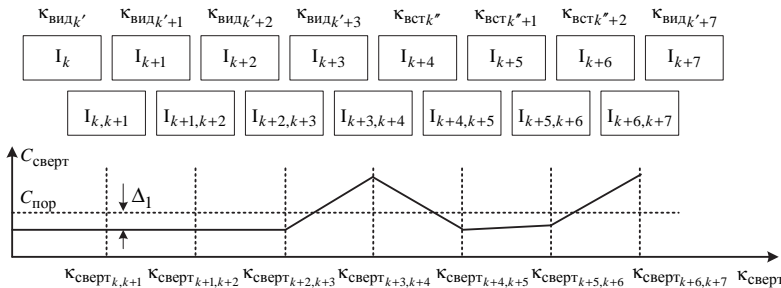


Рис. 10. Оценка интегральной яркости изображений кадров-сверток, при трех кадрах-вставок

Если вторая граница дифференциальной яркостной составляющей кадра-свертки, превышающая $C_{пор1}$, выходит за пределы наблюдаемого окна, то идентифицируется переход на следующую сюжетную линию, т. е. $\kappa_{потk'} \in \Psi_1$.

7. Методика идентификации кадров-вставок на основе корреляционного анализа гистограмм изображений кадров видеопотока. Второй подход к идентификации кадров-вставок с информационным шумом позволяет по отношению к первому подходу уменьшить ошибки первого α и второго β рода при оценке классов кадров, в которых изображения динамично изменяются. Этот подход основан на анализе свойств и цифровой обработки изображений кадров видеопотока, образующих последовательность окон, состоящих из восьми кадров: $I_{окн} = \left\{ I_k / k = \overline{1,8} \right\}$.

При этом, поскольку в цветовой модели *RGB* основные составляющие r_{ij}^k , g_{ij}^k , b_{ij}^k цвета c_{ij}^k пикселя $\tau_{i,j}^k$ являются случайными величинами, то для сравнительного анализа изображений кадров $\kappa_{потk}$ наблюдаемого окна в данном подходе используется закон распределения $p^k(\xi)$ этих величин, который устанавливает связь между возможными значениями интенсивностями $\xi_{i,\xi}^k$ цветов пикселя k -ого кадра и соответствующими им статистическими вероятностями $p^k(\xi_{i,\xi}^k)$. Этот закон распределения будем задавать в виде гистограммы, в которой по горизонтальной оси указывается интенсивность $r_{i,r}^k$ ($g_{i,g}^k$, $b_{i,b}^k$) пикселей k -того кадра, а по вертикали – относительное число пикселей $p^k(r)$ ($p^k(g)$, $p^k(b)$) с конкретным значением интенсивности (рисунк 11).

Поскольку в *RGB* изображении каждая из компонент цвета $c_{ij}^k = \left(r_{ij}^k, g_{ij}^k, b_{ij}^k \right)$ пикселя (красная, зеленая и синяя) является 8-битовой, то суммарное число всевозможных интенсивностей составля-

ет $2^8 = 256$ (то есть $r_{i^r}^k = \overline{0, 255}$, $i^r = \overline{1, 256}$; $g_{i^g}^k = \overline{0, 255}$, $i^g = \overline{1, 256}$; $b_{i^b}^k = \overline{0, 255}$, $i^b = \overline{1, 256}$), а суммарное число всевозможных цветов пикселя – $2^{8^3} = 11777\ 216$.

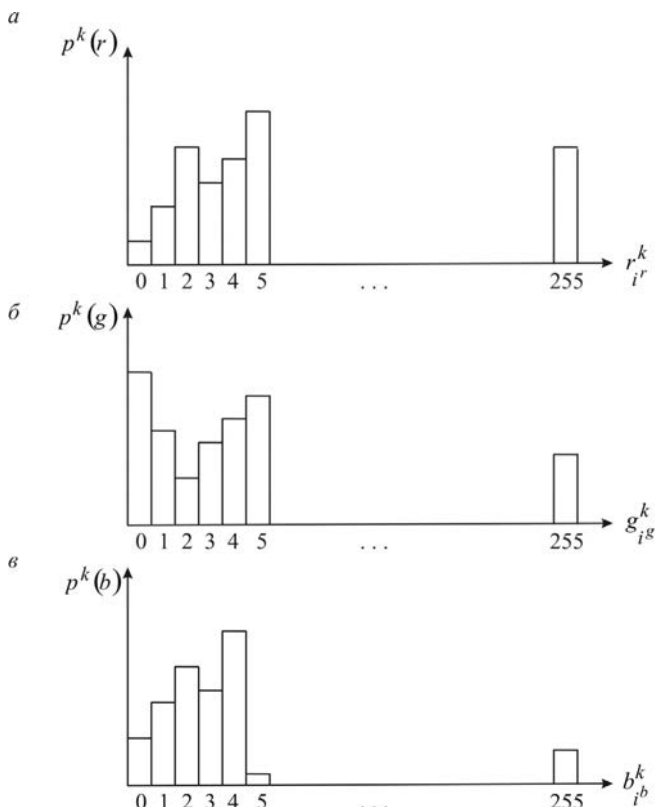


Рис. 11. Гистограммы изображения по основным компонентам цвета: а – по красному цвету; б – по синему цвету; в – по зеленому цвету.

Относительное число $p^k(r)$ ($p^k(g)$, $p^k(b)$) пикселей с конкретным значением интенсивности определяется по выражению $p = n/I \times J$, где n – число пикселей $\pi_{i,j}^k$ с конкретным значением интенсивности, I и J – соответственно число столбцов и строк матрицы изображения, $I \times J$ – общее число пикселей в изображении.

По графикам $p^k(\xi)$ статистического распределения интенсивностей ξ в цифровом изображении кадра k -го окна определяются следующие характеристики:

– оценка математического ожидания интенсивности изображения кадра:

$$\tilde{m}_{p^k(\xi)} = \sum_{i^{\xi}=1}^{256} p^k(\xi_{i^{\xi}}^k) \times \xi_{i^{\xi}}^k ; \quad (8)$$

– оценка дисперсии интенсивности изображения кадра

$$\tilde{D}_{p^k(\xi)} = \frac{\sum_{i^{\xi}=1}^{256} (\xi_{i^{\xi}}^k - \tilde{m}_{p^k(\xi)})^2}{255} ; \quad (9)$$

– оценка среднеквадратичного отклонения:

$$\tilde{\sigma}_{p^k(\xi)} = \sqrt{\tilde{D}_{p^k(\xi)}} = \sqrt{\frac{\sum_{i^{\xi}=1}^{256} (\xi_{i^{\xi}}^k - \tilde{m}_{p^k(\xi)})^2}{255}} . \quad (10)$$

Затем для семи пар кадров окна по всем основным компонентам цвета r, g, b пикселя определяются оценки коэффициентов корреляции по формуле:

$$\tilde{K}_{k,k+1}(\xi) = \frac{\sum_{i^{\xi}=1}^{256} (\xi_{i^{\xi}}^k - \tilde{m}_{p^k(\xi)}) (\xi_{i^{\xi}}^{k+1} - \tilde{m}_{p^{k+1}(\xi)})}{255 \times \tilde{\sigma}_{p^k(\xi)} \tilde{\sigma}_{p^{k+1}(\xi)}} , \quad (11)$$

а для четырехэлементных групп изображений кадров:

$$\{I_k, I_{k+1}, I_{k+2}, I_{k+3}\}, \{I_{k+1}, I_{k+2}, I_{k+3}, I_{k+4}\}, \dots, \{I_{k+4}, I_{k+5}, I_{k+6}, I_{k+7}\} \quad (12)$$

находятся средние арифметические значения коэффициентов корреляции:

$$\tilde{K}_{\text{средн}_k}(\xi) = \frac{\tilde{K}_{k,k+1}(\xi) + \tilde{K}_{k+1,k+2}(\xi) + \tilde{K}_{k,k+3}(\xi)}{3}, \quad (13)$$

где $k = \overline{1, 3}$. По результатам сравнения коэффициентов корреляции $\tilde{K}_{k,k+1}(\xi)$ со средними значениями коэффициентов корреляции $\tilde{K}_{\text{средн}_k}(\xi)$ по критерию $\tilde{K}_{\text{средн}_k}(\xi) > \tilde{K}_{k+h,k+h+1}(\xi) + \Delta_3$, $h = \overline{0,6}$ (рисунки 12–14), принимается решение о классе кадра входного потока, где Δ_2 – абсолютная погрешность, определяемая эмпирически.

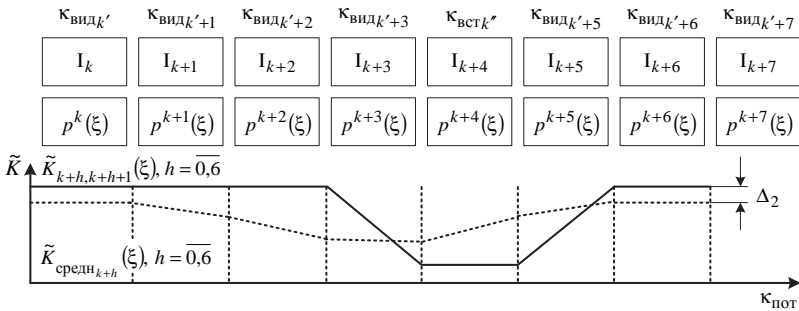


Рис. 12. Корреляционный анализ гистограмм изображений кадров, при одном кадре-вставке

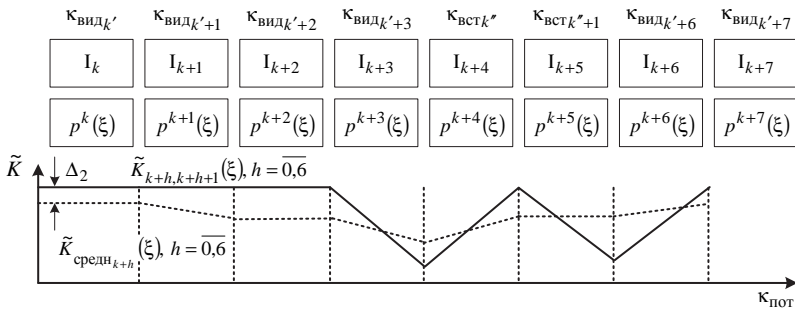


Рис. 13. Корреляционный анализ гистограмм изображений кадров, при двух кадрах-вставок

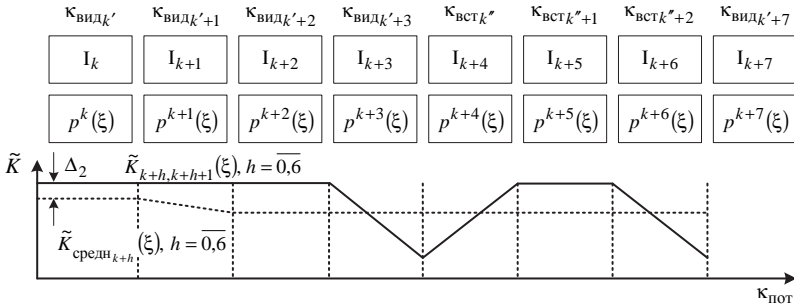


Рис. 14. Корреляционный анализ гистограмм изображений кадров, при трех кадрах-вставках

Проведенный эксперимент показал низкую чувствительность данного подхода к кадрам-вставкам со слабо изменяющимися гистограммами изображений.

8. Методика идентификации кадров-вставок на основе сравнения коэффициентов полиномов, аппроксимирующих гистограммы изображений кадров видеопотока. Третий подход к идентификации кадров-вставок позволяет при совместном использовании предыдущих методов существенно уменьшить ошибки первого α и второго β рода при оценке классов кадров, в которых часть изображений статична, а другая часть динамично изменяется. Этот подход, также как и второй, основан на анализе свойств и цифровой обработке изображений кадров, образующих последовательность наблюдаемых окон, состоящих из восьми кадров: $I_{окн} = \left\{ I_k / k = \overline{1,8} \right\}$. При этом для

каждого изображения I_k окна аналогично, как и ранее, находятся три гистограммы $p^k(\xi)$ по интенсивностям $\xi \in (r, g, b)$ основных компонентов цвета пикселя.

Применяя дроби Чебышева:

$$f(\xi) = \frac{A_0 \xi^N + A_1 \xi^{N-1} + \dots + A_N}{\xi^M + B_1 \xi^{M-1} + \dots + B_M}, \quad (14)$$

где $A_n / n = \overline{1, N}$ – параметры числителя дроби; $B_m / m = \overline{1, M}$ – параметры знаменателя дроби; $M + N = 255$ – число варьируемых параметров дроби, аппроксимируем методом интерполирования все 24 гис-

тограммы $p^{k^o}(\xi)$, $k^o = \overline{1, 8}$, $\xi \in (r, g, b)$, характеризующие изображения всех восьми кадров наблюдаемого окна по трем основным компонентам цвета пикселя.

При интерполировании гистограмм $p^{k^o}(\xi)$ варьируемые параметры A_n и B_m дробей Чебышева $f(\xi)$ выбираются с такими значениями, при которых выполняются условия $f^{k^o}\left(\xi_{i^{\xi}}^{k^o}\right) = p^{k^o}\left(\xi_{i^{\xi}}^{k^o}\right)$, где $k^o = \overline{1, 8}$, $\xi \in (r, g, b)$, $i^{\xi} = \overline{1, 256}$ – узлы интерполирования.

Заметим, что разность $f^{k^o}\left(\xi_{i^{\xi}}^{k^o}\right) - p^{k^o}\left(\xi_{i^{\xi}}^{k^o}\right)$, характеризующая отклонение аппроксимирующей функции $f(\xi)$ от аппроксимируемой гистограммы $p(\xi)$, равна нулю в узлах интерполирования $\xi_{i^{\xi}}^{k^o}$. При переходе функции через узел интерполирования эта разность изменяет знак на противоположное значение. Между соседними узлами интерполирования значение знака не изменяется.

Несмотря на то, что поведение дробно рациональной функции $f^{k^o}(\xi)$ между узлами интерполирования не контролируется и значения ее в этом интервале могут существенно отличаться от значений аппроксимируемой гистограммы, данная процедура обеспечивает преобразование гистограммы, заданной таблицей, в функцию, описываемую аналитически.

Затем, объединяя варьируемые параметры A_n и B_m дробей Чебышева $f(\xi)$ в множество

$$H_k = \left\| \begin{array}{cccccccc} A_{r_0}^k & A_{r_1}^k & \dots & A_{r_N}^k & B_{r_0}^k & B_{r_1}^k & \dots & B_{r_M}^k \\ A_{g_0}^k & A_{g_1}^k & \dots & A_{g_N}^k & B_{g_0}^k & B_{g_1}^k & \dots & B_{g_M}^k \\ A_{b_0}^k & A_{b_1}^k & \dots & A_{b_N}^k & B_{b_0}^k & B_{b_1}^k & \dots & B_{b_M}^k \end{array} \right\|, \quad (15)$$

определяем семь разностей матриц:

$$\begin{aligned}
H_{k,k+1} &= |H_k - H_{k+1}| = \\
&= \left| \begin{array}{cccc}
A_{r_0}^{k,k+1} & A_{r_1}^{k,k+1} & \dots & A_{r_N}^{k,k+1} \\
A_{g_0}^{k,k+1} & A_{g_1}^{k,k+1} & \dots & A_{g_N}^{k,k+1} \\
A_{b_0}^{k,k+1} & A_{b_1}^{k,k+1} & \dots & A_{b_N}^{k,k+1} \\
B_{r_0}^{k,k+1} & B_{r_1}^{k,k+1} & \dots & B_{r_M}^{k,k+1} \\
B_{g_0}^{k,k+1} & B_{g_1}^{k,k+1} & \dots & B_{g_M}^{k,k+1} \\
B_{b_0}^{k,k+1} & B_{b_1}^{k,k+1} & \dots & B_{b_M}^{k,k+1}
\end{array} \right|, \tag{16}
\end{aligned}$$

где $k = \overline{1,7}$ – текущий номер разностей матриц в $I_{\text{ОКН}} = \{I_k / k = \overline{1,8}\}$.

По результатам поэлементного сравнения значений параметров полиномов Чебышева, множеств $H_{k+h,k+h+1}$, $h = \overline{3,6}$ в наблюдаемом окне, с пороговым значением:

$$\sup\{H_{k+h,k+h+1} / h = \overline{0,2}\} + \Delta_3, \tag{17}$$

где Δ_3 – абсолютная погрешность, принимается решение о классе кадров входного потока (рисунки 15–17).

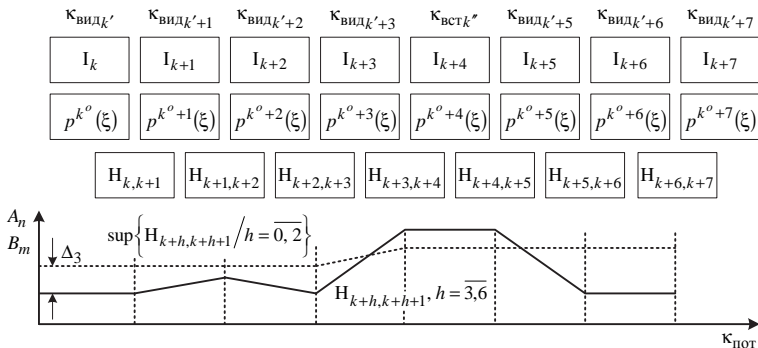


Рис. 15. Сравнение коэффициентов полиномов, аппроксимируемых гистограммы изображений кадров, при одном кадре-вставки

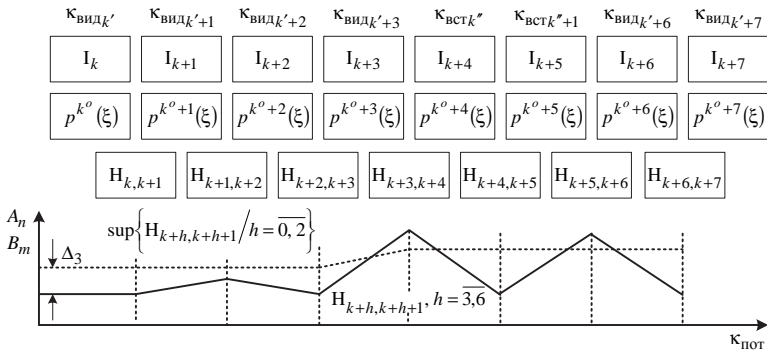


Рис. 16. Сравнение коэффициентов полиномов, аппроксимируемых гистограммы изображений кадров, при двух кадрах-вставок

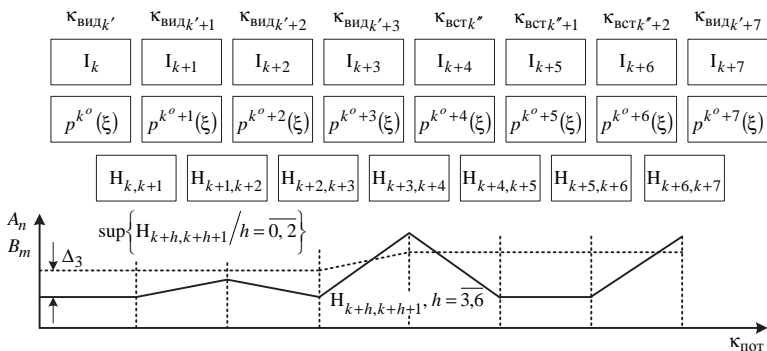


Рис. 17. Сравнение коэффициентов полиномов, аппроксимируемых гистограммы изображений кадров, при трех кадрах-вставок

Окончательное решение о классе кадров $\Psi_1, \Psi_2 \in \Psi$ принимается по мажоритарному правилу, то есть в случае если две из трех параллельно работающие методики идентифицировали кадр как кадр-вставку с информационным шумом $\kappa_{\text{вст}k''} \in \Psi_2$ и эти кадры совпадают, то считается что это вставка.

На следующем этапе осуществляется верификация кадров-вставок по дифференциальной интегральной яркости кадров обрамляющих идентифицированные кадры $C_{k,k+n+1}$, где n – количество идентифицированных кадров. На практике это значение не должно

превышать порог принятия решения Δ_4 , определяемый экспериментальным путем в зависимости от динамики смены изображений.

Предлагаемый подход позволяет идентифицировать кадры-вставки при следующих ограничениях:

- количество кадров в визуальной вставке не превышает трех;
- первые четыре кадра сюжетной линии не являются вставкой;
- вставка не располагается на границе двух сюжетных линий;
- информационный шум в группе соседних изображений кадров-вставок находится в фиксированном, а не хаотичном пространстве изображения I_k (рисунок 6);

- все кадры видеопотока не являются информационным шумом (рисунок 7).

При удалении идентифицированных кадров-вставок с информационным шумом формируется видеопоток с дискретным изменением сюжетной линии в изображениях. Также может оказаться, что полезная информация сосредоточена именно на удаленных кадрах не закрытых информационным шумом. Сегментируя пространство информационного шума на изображениях кадров-вставок [3, 8, 16, 17, 18] и используя технологии, обеспечивающие плавную трансформацию одного изображения в другое [19], предоставляется возможность получить видеопоток без дополнений, не применяя процедуры удаления кадров. Существует множество подходов к решению задачи сегментации [3, 8], основанных на разности яркости информационного шума и изображения. Математическое обоснование методов заключается в вычислении производных, представленных для цифровых изображений в виде дискретных приближений градиента. В качестве градиентных методов выделяют операторы Робертса, Превитта, Собела, Лапласиана и др. Для обнаружения границ информационного шума на изображении предлагается использовать оператор Лапласиана в сочетании со сглаживанием по методу Гаусса [3, 8, 16, 17, 18].

11. Заключение. На основе проведенных исследований свойств изображений, в статье представлена модель, учитывающая различные особенности информационного шума в кадрах видеопотока. Применение сформулированной стратегии позволит повысить качество предоставления услуг видеосвязи, существенно снижая риск дестабилизирующих воздействий на пользователей, на основе предложенных механизмов идентификации кадров с информационным шумом, включающих разработанные методики оценки интегральной яркости изображений кадров, корреляционного анализа гистограмм и сравнения коэффициентов полиномов их аппроксимирующих, а также фильтрации, направленной на восстановление видеопотока.

Литература

1. *Ерош И.Л., Сергеев М.Б., Соловьев Н.В.* Обработка и распознавание изображений в системах превентивной безопасности // СПб.: ГУАП. 2005. 154 с.
2. *Красильников Н.Н.* Цифровая обработка изображений // М.: Вузовская книга. 2001. 320 с.
3. *Грузман И.С.* Цифровая обработка изображений в информационных системах // НГТУ.: Новосибирск. 2000. 156 с.
4. *Потапов А.А., Пахомов А.А., Никитин С.А., Гуляев Ю.В.* Новейшие методы обработки изображений // М.: Физматлит. 2008. 496 с.
5. *Яншин В.В.* Анализ и обработка изображений: принципы и алгоритмы // М.: Машиностроение. 1994. 112 с.
6. *Анисимов Б.В., Курчатова В.Д., Злобин В.К.* Распознавание и цифровая обработка изображений // М.: Высшая школа. 1983. 295 с.
7. *Ярославский Л.П.* Введение в цифровую обработку изображений // М.: Советское радио. 1979. 312 с.
8. *Гонсалес Р., Вудс Р., Чочиа П.А.* Мир цифровой обработки. Цифровая обработка изображений // М.: Техносфера. 2006. 1072 с.
9. *Визильтер Ю., Желтов С., Князь В., Ходарев А., Моржин А.* Обработка и анализ цифровых изображений с примерами на LabVIEW и IMAQ Vision // М.: ДМК Пресс. 2008. 464 с.
10. *Орешин А.Н., Скурнович А.В., Тукелев А.В.* Стратегия определения видеовставок в мультимедийном потоке информации // Телекоммуникации. 2011. № 4. С. 35–43.
11. *Орешин А.Н., Лысанов И.Ю.* Методика идентификации кадра-вставки в потоке видеоданных на основе корреляционного анализа гистограмм изображений кадров с динамическим порогом принятия решения // Информационные системы и технологии. 2014. № 6. С. 129–138.
12. *Орешин А.Н., Лысанов И.Ю., Романов Н.В.* Разработка стратегии определения видеовставок в мультимедийном потоке информации процесса мониторинга функционирования станков с дистанционным числовым программным управлением // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2013. № 4. С. 37–44.
13. *Таха Хэмди А.* Введение в исследование операций. 6-е издание // М.: Издательский дом "Вильямс". 2001. 915 с.
14. *Arora S., Hazan E., Kale S.* The multiplicative weights update method: A meta-algorithm and applications // Theory OF Computing. 2012. pp. 121–164.
15. *Кормен Т., Лейзерсон Ч., Ривест Р., Штайн К.* Алгоритмы: построение и анализ. 3-е издание // М.: Издательский дом "Вильямс". 2013. 1323 с.
16. *Shapiro L.G., Stockman G.C.* Computer Vision // New Jersey. Prentice-Hall. 2001. 608 p.
17. *Dzung L. Pham, Chenyang Xu and Jerry L.* Current Methods in Medical Image Segmentation // Annual Review of Biomedical Engineering. 2000. vol. 2. pp. 315–337.
18. *Grady L.* Random Walks for Image Segmentation // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2006. vol. 28. no. 11. pp. 1768–1783.
19. *FantaMorph Deluxe 5.4.6, CrazyTalk Pro 7.32.3114.1, CrazyTalk 7.3.2215.1 Pro Retail + Custom Content Packs + Portable, Portable Morpheus Photo Animation Suite 3.17 Build 4188.0 Industrial, Morpheus Photo Animation Suite 3.17 Build 4188.0 Industrial + Rus.* URL: www.cwer.ws/tag (soft:;) (дата обращения: 15.02.2015).

References

1. *Erosh I.L., Sergeev M.B., Solov'ev N.V.* *Obrabotka i raspoznavanie izobrazhenij v sistemah preventivnoj bezopasnosti* [Image processing and recognition in preventive safety systems]. SPb.: GUAP. 2005. 154 p. (In Russ.).

2. Krasil'nikov N.N. *Cifrovaja obrabotka izobrazhenij* [Image digital processing]. Moscow: Vuzovskaja kniga. 2001. 320 p. (In Russ.).
3. Gruzman I.S. *Cifrovaja obrabotka izobrazhenij v informacionnyh sistemah* [Image digital processing in information systems]. NGTU.: Novosibirsk. 2000. 156 p. (In Russ.).
4. Potapov A.A., Pahomov A.A., Nikitin S.A., Guljaev Ju.V. *Novejschie metody obrabotki izobrazhenij* [The latest methods of image processing]. Moscow: Fizmatlit. 2008. 496 p. (In Russ.).
5. Janshin V.V. *Analiz i obrabotka izobrazhenij: principy i algoritmy* [Image analysis and processing: principles and algorithms]. Moscow: Mashinostroenie. 1994. 112 p. (In Russ.).
6. Anisimov B.V., Kurchatov V.D., Zlobin V.K. *Raspoznavanie i cifrovaja obrabotka izobrazhenij* [Image recognition and digital processing]. Moscow: Vysshaja shkola. 1983. 295 p. (In Russ.).
7. Jaroslavskij L.P. *Vvedenie v cifrovuju obrabotku izobrazhenij* [Introduction into image digital processing]. Moscow: Sovetskoe radio. 1979. 312 p. (In Russ.).
8. Gonsales R., Vuds R., Chochia P.A. *World of the digital processing* [Digital Image Processing]. Moscow: Tehnosfera Publ. 2006. 1072 p. (In Russ.).
9. Vizil'ter Ju., Zheltov S., Knjaz' V., Hodarev A., Morzhin A. *Obrabotka i analiz cifrovyyh izobrazhenij s primerami na LabVIEW i IMAQ Vision* [Digital images processing and analysis with examples in LabVIEW and IMAQ Vision]. Moscow: DMK Press. 2008. 464 p. (In Russ.).
10. Oreshin A.N., Skurnovich A.V., Tukelev A.V. [Snap-insertion definition strategy in a multimedia information stream]. *Telekommunikacii – Telecommunications*. 2011. vol. 4. pp. 35–43. (In Russ.).
11. Oreshin A.N., Lysanov I.Ju. [Snap-insertion identification procedure in a video data stream based on the correlative analysis of the histograms of snap images with a dynamic threshold of decision making]. *Informacionnye sistemy i tehnologii – Information systems and technologies*. 2014. vol. 6. pp. 129–138. (In Russ.).
12. Oreshin A.N., Lysanov I.Ju., Romanov N.V. [Developing a video-insertion designation strategy in a multimedia information stream of the functioning monitoring process of the machines with a remote numeric control]. *Fundamental'nye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii – Fundamental and applied problems of engineering and technology*. 2013. vol. 4. pp. 37–44. (In Russ.).
13. Taha Hjemdi A. *Vvedenie v issledovanie operacija* [Introduction into operation research]. Moscow: Izdatel'skij dom "Vil'jams". 2001. 915 p.
14. Arora S., Hazan E., Kale S. The multiplicative weights update method: A meta-algorithm and applications. *Theory OF Computing*. 2012. pp. 121–164.
15. Kormen T., Lejzerson Ch., Rivest R., Shtajn K. *Algoritmy: postroenie i analiz. 3-e izdanie* [Algorithms: design and analysis. 3rd Edition]. Moscow: "Vil'jams". 2013. 1323 p.
16. Shapiro L.G., Stockman G.C. *Computer Vision*. New Jersey. Prentice-Hall. 2001. 608 p.
17. Dzung L. Pham, Chenyang Xu and Jerry L. Current Methods in Medical Image Segmentation. *Annual Review of Biomedical Engineering*. 2000. vol. 2. pp. 315–337.
18. Grady L. Random Walks for Image Segmentation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2006. vol. 28. no. 11. pp. 1768–1783.
19. FantaMorph Deluxe 5.4.6, CrazyTalk Pro 7.32.3114.1, CrazyTalk 7.3.2215.1 Pro Retail + Custom Content Packs + Portable, Portable Morpheus Photo Animation Suite 3.17 Build 4188.0 Industrial, Morpheus Photo Animation Suite 3.17 Build 4188.0 Industrial + Rus. Available at: www.cwer.ws/tag (soft:) (accessed 15.02.2015). (In Russ.).

Орешин Андрей Николаевич — к-т техн. наук, доцент, сотрудник, Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации. Область научных интересов: теория информации, теория графов, теория массового обслуживания, теория вероятностей, теория принятия решений, применение методов математического и имитационного моделирования в телекоммуникациях. Число научных публикаций — 57. strongnuts@mail.ru; Приборостроительная, 35, Орел, 302034; р.т.: +7(4862)549500.

Oreshin Andrey Nikolaevich — Ph.D., associate professor, researcher, The Academy of Federal Security Guard Service of the Russian Federation. Research interests: information theory, graph theory, a waiting-line theory, theory of chances, decision principle, methods of mathematic and imitational modeling application in telecommunication. The number of publications — 57. strongnuts@mail.ru; 35, Priborostroitel'naya Street, Orel, 302034, Russia; office phone: +7(4862)549500.

Сантов Игорь Акрамович — д-р техн. наук, профессор, сотрудник, Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации. Область научных интересов: оптическая связь, транспортные сети связи. Число научных публикаций — 160. Akramovich@mail.ru; ул. Приборостроительная, 35, Орел, 302034, РФ; р.т.: +7(4862)549801.

Saitov Igor' Akramovich — Ph.D., Dr. Sci., professor, researcher, The Academy of Federal Security Guard Service of the Russian Federation. Research interests: optical communication, transport communication networks. The number of publications — 160. Akramovich@mail.ru; 35, Priborostroitel'naya Street, Orel, 302034, Russia; office phone: +7(4862)549801.

Орешин Николай Алексеевич — к-т техн. наук, профессор, сотрудник, Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации. Область научных интересов: теория вероятностей, теория графов, теория массового обслуживания, теория принятия решений, применение методов математического моделирования в телекоммуникациях. Число научных публикаций — 65. strongnuts2505@mail.ru; Приборостроительная, 35, Орел, 302034; р.т.: +7(4862)549500.

Oreshin Alekseevich Nikolay — Ph.D., professor, researcher, The Academy of Federal Security Guard Service of the Russian Federation. Research interests: information theory, graph theory, a waiting-line theory, theory of chances, decision principle, methods of mathematic and imitational modeling application in telecommunication. The number of publications — 65. strongnuts2505@mail.ru; 35, Priborostroitel'naya Street, Orel, 302034, Russia; office phone: +7(4862)549500.

РЕФЕРАТ

Орешин А.Н., Саитов И.А., Орешин Н.А. Стратегия повышения качества услуг видеосвязи на основе фильтрации видеопотока, содержащего кадры-вставки с информационным шумом.

Целенаправленное изменение структуры и свойств видеопотока, с учетом физиологически обусловленных особенностей зрительного анализатора человека, позволяет оказывать скрытые различного рода воздействия на его психофизиологическое состояние, убеждения и поведение. Примером такого воздействия являются кадры видеопотока с информационным шумом, проявляющиеся в виде контрастных изменений цвета фона, интенсивных колебаний яркости в области биоэффективных частот или диспаратных вставок. Довольно часто эти воздействия носят дестабилизирующий характер или направлены на смещение визуального акцента в сторону шума, вынуждая пользователей пропустить полезную информацию в видеопотоке.

На основе проведенных исследований свойств изображений, в работе предлагаются модель информационного шума в видеопотоке и его особенности, а также алгоритм идентификации кадров, содержащих дополнительную информацию, при определенных ограничениях.

В представленном подходе описывается методика идентификации кадров с информационным шумом на основе оценки интегральной яркости изображений кадров, корреляционного анализа гистограмм и сравнения коэффициентов полиномов их аппроксимирующих.

Совместное применение методики идентификации кадров видеопотока с информационным шумом и технологий, обеспечивающих плавную трансформацию одного изображения в другое в пространстве близко размещенных кадров, способствует повышению качества предоставляемых услуг видеосвязи, защищая пользователя от различных негативных воздействий.

SUMMARY

Oreshin A.N., Saitov I.A., Oreshin N.A. **Strategy of the Video Communication Services Quality Enhancement Based on the Filtration of a Video Stream Containing Snap-Insertions with Information Noise.**

The task-oriented change in the structure and qualities of a video stream with an account of physiologically predetermined qualities of the human visual analyzer helps to exert various kinds of concealed influence on his psychophysiological state, beliefs and behavior. An example of such effect is video-stream snaps containing information noise which reveals itself through a contrast change in the background color, intensive brightness fluctuation in the field of bioeffective frequencies or disparate insertions. Quite often these influences possess a destabilizing character or are aimed at the visual emphasis shift towards the noise forcing users to overlook useful information in the video stream.

Based on the carried research of the image qualities the paper offers a model of information noise in a video stream and its peculiarities and, moreover, an identification algorithms of the snaps containing additional information with specified restrictions.

In the approach under consideration an identification procedure for the snapshots with information noise based on the integral brightness snaps image, histograms correlative analysis and comparison of polynomials indexes and their approximates is described.

A combined application of the identification procedure for the snapshots in the video stream with information noise and technologies providing facile transformation of one image into another in the space of closely placed snapshots supports the presented video communication services quality enhancement protecting users from various negative effects.

А.Д. ХОМОНЕНКО, Е.Л. ЯКОВЛЕВ
**НЕЙРОСЕТЕВАЯ АППРОКСИМАЦИЯ ХАРАКТЕРИСТИК
МНОГОКАНАЛЬНЫХ НЕМАРКОВСКИХ СИСТЕМ
МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ**

Хомоненко А.Д., Яковлев Е.Л. **Нейросетевая аппроксимация характеристик многоканальных немарковских систем массового обслуживания.**

Аннотация. Предлагается использование нейросетевой аппроксимации для расчета вероятностно-временных характеристик многоканальных систем массового обслуживания (СМО) и неограниченной емкостью очереди. Приводятся результаты численных экспериментов, показывающие, что по сравнению с численными итерационными алгоритмами достигается существенное снижение трудоемкости вычислений вероятностно-временных характеристик многоканальных СМО с «разогревом» при незначительной погрешности расчета характеристик. Обоснованы целесообразность применения метода Байесовской регуляризации для обучения нейросети и наилучшее число нейронов.

Ключевые слова: многоканальные системы массового обслуживания, нейросети, аппроксимация, системы обслуживания с «разогревом».

Khomonenko A.D., Yakovlev E.L. **Neural Network Approximation of Characteristics of Multi-Channel Non-Markovian Queuing Systems.**

Abstract. It is proposed to use a neural network to calculate an approximation of the probabilistic-time characteristics of multichannel queuing systems (QS) with a "warm-up" and the unlimited capacity of the queue. From the results of numerical experiments, we observe a significant reduction in the complexity of computing probabilistic-time characteristics of the multi-channel QS with "warm-up" with minor errors of calculation of characteristics, compared with the numerical iterative algorithms. The advisability of the use of Bayesian regularization method for training a neural network and the best number of neurons are shown.

Keywords: multichannel queuing systems, neural networks, approximation, service systems with "warm-up".

1. Введение. При проведении моделирования сложных процессов исследователи стремятся к получению как можно более общих результатов при относительно невысоких вычислительных затратах на исследование. Обеспечение именно этого условия на основе нейросетевой аппроксимации составляет цель настоящей статьи.

При исследовании оперативности функционирования сложных систем, в том числе информационных систем, часто используются модели многоканальных систем массового обслуживания (СМО). Широко распространенными моделями являются модели $M/M/1/\infty$ и $M/M/n/\infty$ с неограниченной очередью, представляющие, соответственно, одноканальную и многоканальную системы с пуассоновским входящим потоком и экспоненциальным распределением длительности обслуживания. Марковские модели не вполне подходят для описания большого количества практических задач.

Наибольший интерес представляют модели многоканальных немарковских СМО, хорошо описывающие функционирование, например, компонентов информационных систем [1]. При расчете характеристик многоканальных немарковских СМО удобно использовать аппроксимирующие распределения фазового типа.

Кокс показал [2], что произвольное распределение длительности некоторой случайной величины можно представить смесью экспоненциальных фаз, или распределением фазового типа (гиперэкспоненциальным, Эрланга, Кокса). При этом обеспечивается удобство сведения случайного процесса к Марковскому и легкость составления и решения системы уравнений, описывающей поведение соответствующей модели. Параметры аппроксимирующего распределения могут быть вещественными или комплексно-сопряженными [2, 3], при этом вероятности состояний исследуемой системы являются вещественными.

Примеры прикладного использования распределений фазового типа приводятся в [3–4]. Такой подход получил широкое применение при исследовании немарковских многоканальных систем массового обслуживания [1, 5]. Расчет многоканальных немарковских СМО при общих предпосылках предполагает использование достаточно *трудоемких* численных алгоритмов, реализующих матричные вычисления [6–7].

Для снижения трудоемкости расчета характеристик многоканальных немарковских СМО, реализуемого многократно при расчете разомкнутых сетей массового обслуживания (СМО) с преобразованием потоков [8], в работе [9] предлагается метод линейной аппроксимации узловых СМО. В нашей статье мы рассмотрим использование нейросетевой аппроксимации также в целях снижения трудоемкости расчетов на примере многоканальных немарковских СМО с «разогревом» [10, 11].

Модели СМО с «разогревом» используются для оценивания оперативности функционирования информационных систем с учетом важнейших особенностей (наличие различного рода системных издержек, затрат на обеспечение информационной безопасности, кеширование, актуализацию контекста и др.). В таких моделях считается, что периоду «разогрева» (переключения, переналадки) соответствует выполнение некоторой дополнительной работы. В частности, в моделях информационных систем к этой работе и относят перечисленные нами системные издержки [11, 12].

Опишем кратко расчетную схему, используемую при вычислении вероятностно-временных характеристик многоканальных

СМО с «разогревом» на примере системы типа $H_2/M/M/n$ – с гиперэкспоненциальным входящим потоком, экспоненциальным распределением длительности «разогрева» и обслуживания, n каналами и неограниченной емкостью очереди [11, 12].

2. Расчет вероятностных характеристик $H_2/M/M/n$.

Состояния многоканальных немарковских СМО при моделировании удобно представлять в виде совокупности микросостояний, в которых находится система. Микросостояния – это всевозможные состояния системы в произвольный момент времени в процессе ее жизни.

Гиперэкспоненциальное распределение H_2 описывается параметрами: λ_1 и λ_2 – интенсивности потоков входящих заявок соответствующих фаз, a_1 – вероятность выбора первой фазы, $a_2 = 1 - a_1$ – вероятность выбора второй фазы; параметры μ_p и μ задают интенсивности перехода по «разогреву» системы и обслуживания заявки, соответственно.

Приведем формулы расчета параметров распределения H_2 по его первому моменту \tilde{f}_1 и коэффициенту вариации v_F . Запишем выражения для математического ожидания и дисперсии:

$$\frac{a_1}{\lambda_1} + \frac{a_2}{\lambda_2} = \tilde{f}_1,$$

$$2 \left(\frac{a_1}{\lambda_1^2} + \frac{a_2}{\lambda_2^2} \right) - \left(\frac{a_1}{\lambda_1} + \frac{a_2}{\lambda_2} \right)^2 = \tilde{f}_2.$$

Полагая a_1 и a_2 известными, пользуясь соотношением $a_2 = 1 - a_1$ и выражая одно неизвестное через другое, находят выражения для обратных величин коэффициентов λ_1 и λ_2 :

$$\frac{1}{\lambda_1} = \frac{1}{a_1} \left(\tilde{f}_1 - \frac{1 - a_1}{\lambda_2} \right).$$

$$\frac{1}{\lambda_2} = \frac{1}{2 - a_1} \left(\tilde{f}_1 \pm \sqrt{\frac{(2 - a_1)(\tilde{f}_1^2(4 - a_1) - \tilde{f}_2 a_1) - 2}{2(1 - a_1)}} \right).$$

Решение для λ_2 при работе с вещественными параметрами берется с плюсом, а при работе с комплексно-сопряженными параметрами – берется с минусом.

Для расчета СМО $H_2/M/M/n$ можно записать векторно-матричные уравнения баланса переходов между состояниями:

$$\begin{aligned} \gamma_0 D_0 &= \gamma_0 C_0 + \gamma_1 B_1, \\ \gamma_j D_j &= \gamma_{j-1} A_{j-1} + \gamma_j C_j + \gamma_{j+1} B_{j+1}, \quad j = 1, 2, \dots \end{aligned} \quad (1)$$

Система уравнений (1) характеризуется чрезвычайно высокой размерностью и стандартные методы решения систем линейных алгебраических уравнений оказываются неэффективными. При расчете многоканальных немарковских СМО широкое применение получил итерационный метод, предложенный Такахаси и Таками [13].

Для многоканальных СМО с неограниченной очередью существенным является существование предельного вектора условных вероятностей микросостояний $g_\infty = \lim g_j$ при $j \rightarrow \infty$.

Вычислительный алгоритм базируется на последовательном приближении к искомым величинам методом Гаусса-Зейделя:

$$\begin{aligned} g_j^{(m)} &= z_j^{(m)} g_{j-1}^{(m)} A_{j-1} (D_j - C_j)^{-1} + x_j^{(m)} g_{j+1}^{(m-1)} B_{j+1} (D_j - C_j)^{-1} = \\ &= z_j^{(m-1)} \beta_{1j} + x_j^{(m)} \beta_{2j}, \end{aligned}$$

где верхний индекс указывает номер итерации.

Используя названный метод, получаем формулу для вероятности свободного состояния системы:

$$p_0 = \frac{n - b/a}{n + \sum_{j=1}^{n-1} (n-j) \prod_{i=0}^{j-1} x_i}, \quad (2)$$

Последующие вероятности для $j = \overline{1, N}$ определяются рекуррентно с помощью (2). При необходимости та же формула может быть применена для больших значений j с использованием $x_j = x_\infty$.

Остальные характеристики СМО (средние времена ожидания начала обслуживания и пребывания заявки в системе, распределение времени пребывания в системе, распределение длин интервалов выходящего потока заявок и т. д.) можно получить при помощи найденного распределения вероятностей числа заявок, соответствующие подходы рассмотрены в [1, 14].

Для оценивания целесообразности использования предлагаемого подхода рассмотрим нейросетевую аппроксимацию характеристик многоканальной СМО $H_2/M/M/3$ и $M/H_2/M/3$ с «разогревом». Для этого, опираясь на результаты работы [12], предварительно нами проведен численный расчет вероятностных и временных характеристик указанной СМО.

3. Аппроксимация СМО $H_2/M/M/3$ и $M/H_2/M/3$ с помощью нейронной сети. В настоящее время можно наблюдать резкое

повышение интереса к нейронным сетям, которые успешно применяются в самых различных областях – бизнесе, медицине, технике, геологии, физике. Нейронные сети вошли в практику везде, где нужно решать задачи прогнозирования, распознавания образов, сжатия данных, аппроксимации, классификации, принятия решений и управления. Аппроксимация сложных функций с помощью нейронных сетей детально описана в работах [15-17].

В статье [18] представлены результаты извлечения знаний из обученных нейронных сетей. Использовались сети в виде нечетких графов, созданные с использованием прямоугольных базисных функций нейронных сетей. Нами использовалась двухслойная однонаправленная сеть (персептрон) [16, 17], отличающаяся хорошими характеристиками точности и трудоемкости обучения.

В таблице 1 указаны входные данные для расчета для СМО $H_2/M/M/3$: μ_r – интенсивность «разогрева»; μ – интенсивность обслуживания заявок; f_1 – первый начальный момент распределения длительности (средняя длительность) интервалов между заявками входного потока; cv – коэффициент вариации входного потока заявок.

Таблица 1. Входные данные для расчета СМО $H_2/M/M/3$

μ_r	μ	f_1	cv
2,5	2,3	1,270	1,5
2,5	2,3	1,270	1,75
2,5	2,3	1,270	1,9
2,5	2,3	1,270	2,9
2,5	2,3	1,270	3,9
2,5	2,3	1,270	4,9

На входы нейросети подавались коэффициент вариации входного потока заявок cv при фиксированных значениях остальных параметров (таблица 1). В качестве остальных входных данных нейросети использованы данные, рассчитанные с помощью описанного выше итерационного метода для СМО $H_2/M/M/3$. Обучающая выборка состояла из 144 векторов. В качестве функции активации скрытого слоя использовалась сигмоидная функция в виде гиперболического тангенса, выходного слоя – линейная.

В процессе определения числа скрытого слоя нейронов осуществлен выбор наилучшего алгоритма обучения нейронной сети по точности (минимальному значению среднеквадратичной ошибки). Для каждой конфигурации нейросети обучение проводилось по 5-7 раз, основные результаты приводятся в таблице 2.

Таблица 2. Сравнение методов обучения нейросети

число нейронов	trainlm		trainsg		trainbr	
	MSE	Epochs(s)	MSE	Epochs(s)	MSE	Epochs(s)
7	1.235e-4	12(0,2)	8.886e-3	22(0,1)	9.097e-9	275(4,2)
10	4.686e-6	357(6,0)	4.414e-3	36(0,2)	8.197e-9	848(16,2)
15	4.884e-5	14(0,2)	2.649e-3	38(0,2)	6.588e-10	957(16,0)
20	3.755e-5	127(2,2)	1.5333e-3	29(0,2)	3.057e-11	729(8,1)
25	6.030e-5	191(3,1)	2.023e-3	22(0,2)	4.561e-11	983(18,5)
30	6.625e-6	352(7,0)	3.855e-3	38(0,3)	4.967e-12	611(12,1)
40	3.834e-5	182(3,4)	1.840e-3	53(0,7)	1.768e-12	725(17,0)
50	6.111e-8	24(0,5)	1.869e-3	52(0,7)	6.664e-12	513(15,3)

Здесь trainlm – алгоритм обучения Левенберга-Маркарта, trainsg – метод шкалированных связанных градиентов, а trainbr – метод Байесовской регуляризации. MSE – средняя квадратическая ошибка, epochs(s) – число циклов обучения (время обучения в секундах). Наиболее точным является применение алгоритма обучения Байесовской регуляризации при 40 нейронах скрытого слоя.

Для СМО $H_2/M/M/3$ значение выходного параметра – стационарное распределение числа заявок для произвольного значения входного параметра определялось путем аппроксимации по вычисленному дискретному набору значений значений входных и выходных параметров в ближайших точках.

Результаты расчета стационарных распределений числа заявок в системе массового обслуживания $H_2/M/M/3$ с «разогревом» для различных значений коэффициента вариации входящего потока заявок показаны на рисунке 1.

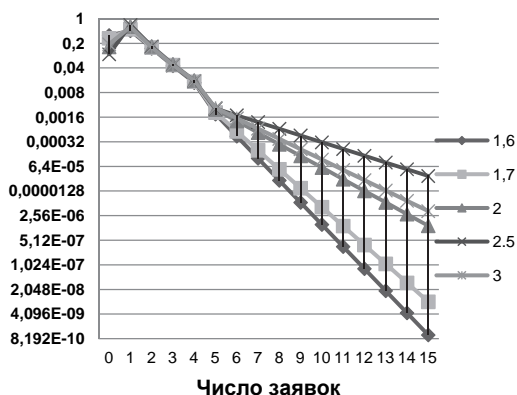


Рис. 1. Распределения числа заявок в СМО $H_2/M/M/n$

Семейство указанных распределений образует правильно изменяющийся набор распределений в пропорциональной зависимости от значений коэффициента вариации входящего потока заявок. Это свидетельствует о достоверности расчета характеристик СМО $M_2/M/M/n$ с помощью нейросетевой аппроксимации.

В таблице для сравнения 3 приведены значения процессорного времени счета на ПЭВМ (t_{CPU}) в секундах, вычисленные итерационным методом (ИМ) и рассмотренным нами методом нейросетевой аппроксимации (НА) характеристик.

Таблица 3. Сравнение процессорного времени счета

Параметры СМО		t_{CPU} , сек	
μ	cv	ИМ	НА
2.3	1.5	3	0.01
2.3	2.0	3.2	0.01

Как видно из таблицы 3, при использовании нейросетевой аппроксимации имеет место существенный выигрыш процессорного времени счета по сравнению с итерационным методом.

Исследование точности аппроксимации с помощью нейронной сети по сравнению с итерационным алгоритмом расчета проводилось на примере расчета среднего времени ожидания заявки в очереди и пребывания в системе $M/H_2/M/3$.

Для обучения нейросети использовались входные данные (таблица 1) и результирующие характеристики СМО, полученные с помощью численного метода [12] (таблица 4): W и W_q – среднее время пребывания заявки в системе и ожидания заявки в очереди соответственно (для различных значений интенсивности входящего потока заявок λ).

Таблица 4. Параметры модели, используемые для обучения нейросети

#	$\lambda=0.3$	$\lambda=0.6$	$\lambda=0.9$	$\lambda=1.2$	$\lambda=1.5$	$\lambda=1.8$	$\lambda=2.1$	$\lambda=2.4$	$\lambda=2.7$	$\lambda=3.0$	$\lambda=3.3$	$\lambda=3.6$
W	0,785	0,845	0,897	0,914	0,919	0,924	0,933	0,942	0,955	0,993	1,062	1,104
W_q	0,122	0,149	0,172	0,182	0,194	0,221	0,268	0,315	0,355	0,429	0,555	0,632

Полученные с помощью аппроксимации нейросетью результаты расчета характеристик СМО $M/H_2/M/3$ для промежуточных (по сравнению с приведенными в таблице 2) значений интенсивности входящего потока приведены на рисунке 2.

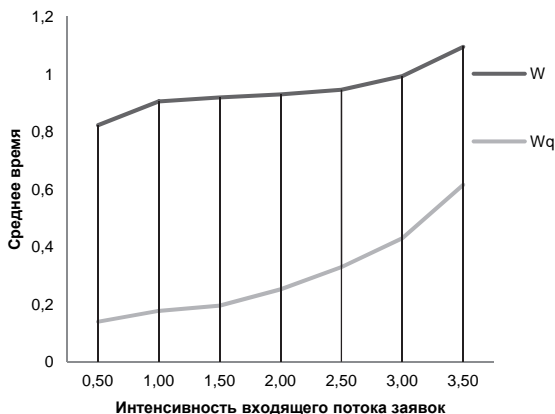


Рис. 2. Среднее время ожидания и пребывания заявки

Значения среднего времени ожидания заявки в очереди и пребывания в системе совпадают с соответствующими значениями, полученными с помощью итерационного метода, с точностью до двух знаков, что вполне приемлемо.

Отметим, что затраты времени на обучение нейронной сети нами рассмотрены при выборе алгоритмов обучения. Обучение для каждой СМО проводится однократно, обученная сеть очень быстро по входным параметрам вычисляет выходные параметры.

4. Заключение. Метод аппроксимации характеристик узлов СеМО с помощью нейронной сети обеспечивает заметно меньшие затраты процессорного времени счета при допустимой точности расчета искомых характеристик. Это свидетельствует о целесообразности применения этого подхода при расчете немарковских многоканальных СМО и разомкнутых СеМО с рекуррентными потоками заявок [8].

Как и в случае метода линейной аппроксимации [9], для каждого узла СеМО численный расчет выходных характеристик соответствующей СМО необходимо выполнить только для 2-3 разных значений коэффициента вариации потока заявок в узле и на его основе выполнить обучение аппроксимирующей нейросети.

При итерационном расчете распределения времени пребывания заявки в разомкнутой СеМО с уточнением коэффициента вариации потока заявок [8] требуется выполнять многократно расчет характеристик выходящего потока заявок для каждой из узловых СМО. Использование нейросетевой аппроксимации для этих целей

позволяет обеспечить существенную экономию общего времени вычислений выходных характеристик СЕМО в целом.

В качестве направлений дальнейших исследований целесообразно выделить: обоснование основных параметров, задаваемых при аппроксимации сложных систем с помощью нейросетей; проведение нейросетевой аппроксимации многоканальных СМО с различными дисциплинами приоритетного обслуживания.

Литература

1. *Рыжиков Ю.И.* Теория очередей и управление запасами // СПб.: Питер. 2001. 384 с.
2. *Cox D.R.* A Use of Complex Probabilities in the Theory of Stochastic Processes // Proc. Camb. Phil. Soc. 1955. vol. 51. no. 2. pp. 313–319.
3. *Смагин В.А.* Теория восстановления. Немарковские задачи теории надежности // МО СССР. 1982. 269 с.
4. *Bubnov V.P., Tyrva A.V., Khomonenko A.D.* Model of Reliability of the Software with Coxian Distribution of Length of Intervals Between the Moments of Detection of Errors // In Proceedings of 34th Annual IEEE Computer Software and Applications Conference (COMPSAC 2010). Seoul. Korea. 2010. pp. 238–243.
5. *Khomonenko A.D., Bubnov V.P.* A Use of Coxian Distribution for Iterative Solution of $M/G/n/R < \infty$ Queuing Systems // Probl. of Control and Inform. Theory. 1985. vol. 14. no. 2. С. 143–153.
6. *Neuts M.F.* Matrix Geometric Solutions in Stochastic Models: Algorithmic Approach // Baltimor and London: The Jons Hopkins Univ. Press. 1981. 332 p.
7. *Seelen L.P.* An Algorithm for Ph/Ph/c Queues // Eur. J. of Operational Research. 1986. vol. 23. pp. 118–127.
8. *Рыжиков Ю.И., Хомоненко А.Д.* Расчет разомкнутых немарковских цепей с преобразованием потоков // Автоматика и вычислительная техника. 1989. № 3. С. 15–24.
9. *Хомоненко А.Д.* Расчет разомкнутых немарковских сетей массового обслуживания методом линейной аппроксимации // Автоматика и вычислительная техника. 1990. № 5. С. 3–10.
10. *Sun B., Dudin A.N.* The MAP/PH/N Multi-Server Queuing System with Broadcasting Service Discipline and Server Heating // Automatic Control and Computer Sciences. 2013. vol. 47. Issue 4. pp. 173–182.
11. *Гиндин С.И., Хомоненко А.Д., Яковлев В.В., Матвеев С.В.* Модель оценивания оперативности распределенной обработки данных с учетом затрат на обеспечение информационной безопасности // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. 2013. № 4. С. 59–67.
12. *Khomonenko A. D., Gindin S. I.* Stochastic Models for Cloud Computing Performance Evaluation // Proceedings of the 10th Central and Eastern European Software Engineering Conference in Russia. Moscow. Russian Federation. 2014. URL: <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=2687233>. (дата обращения: 18.05.2015).
13. *Takanashi Y., Takami Y. A.* Numerical Method for the Steady-State Probabilities of a GI/G/c Queuing System in a General Class // J. of the Operat. Res. Soc. of Japan. 1976. vol. 19. no. 2. pp. 147–157.
14. *Хомоненко А.Д.* Распределение времени ожидания в системах массового обслуживания типа $GIq/Hk/n/R < \infty$ // Автоматика и телемеханика. 1990. № 8. С. 91–98.

15. *Cybenko G.* Approximation by Superpositions of a Sigmoidal Function // *Mathematical Control Signals Systems*. 1989. vol. 2. pp. 303–314.
16. *Funahashi K.* On the Approximate Realization of Continuous Mappings by Neural Networks // *Neural Networks*. 1989. vol. 2. no. 3. pp. 183–192.
17. *Уоссермен Ф.* Нейрокомпьютерная техника. Теория и практика // М.: Мир. 1992. 184 с.
18. *Lauks G., Jelinski J.* Metamodelling of Queuing Systems Using Fuzzy Graphs // *Electronics and Electrical Engineering*. Kaunas: Technologija. 2009. no. 4(92). pp. 61–64.

References

1. Ryzhikov Ju.I. *Teorija ocheredej i upravlenie zapasami* [The theory of queues and inventory management.]. SPb.: Piter. 2001. 384 p. (In Russ.).
2. Cox D.R. A Use of Complex Probabilities in the Theory of Stochastic Processes. *Proc. Camb. Phil. Soc.* 1955. vol. 51. no. 2. pp. 313–319.
3. Smagin V.A. *Teorija vosstanovlenija. Nemarkovskie zadachi teorii nadezhnosti* [The theory of recovery. Markov problem of reliability theory]. MO SSSR. 1982. 269 p. (In Russ.).
4. Bubnov V.P., Tyrva A.V., Khomonenko A.D. Model of Reliability of the Software with Coxian Distribution of Length of Intervals Between the Moments of Detection of Errors. In Proceedings of 34th Annual IEEE Computer Software and Applications Conference (COMPSAC 2010). Seoul. Korea. 2010. pp. 238–243.
5. Khomonenko A.D., Bubnov V.P. A Use of Coxian Distribution for Iterative Solution of $M/G/n/R \leq \infty$ Queuing Systems. *Probl. of Control and Inform. Theory*. 1985. vol. 14. no. 2. C. 143–153.
6. Neuts M.F. *Matrix Geometric Solutions in Stochastic Models: Algorithmic Approach*. Baltimor and London: The Jons Hopkins Univ. Press. 1981. 332 p.
7. Seelen L.P. An Algorithm for Ph/Ph/c Queues. *Eur. J. of Operational Research*. 1986. vol. 23. pp. 118–127.
8. Ryzhikov Ju.I., Khomonenko A.D. [Calculation of open Markov chains with the transformation flows]. *Avtomatika i vychislitel'naja tehnika – Automatic Control and Computer Sciences*. 1989. vol. 3. pp. 15–24. (In Russ.).
9. Khomonenko A.D. [Calculation of open Markov queuing networks using linear approximation]. *Avtomatika i vychislitel'naja tehnika – Automatic Control and Computer Sciences*. 1990. vol. 5. pp. 3–10. (In Russ.).
10. Sun B., Dudin A.N. The MAP/PH/N Multi-Server Queuing System with Broadcasting Service Discipline and Server Heating. *Automatic Control and Computer Sciences*. 2013. vol. 47. Issue 4. pp. 173–182.
11. Gindin S.I., Khomonenko A.D., Jakovlev V.V., Matveev S.V. [Model estimation of efficiency of distributed data processing, taking into account the costs of information security]. *Problemy informacionnoj bezopasnosti. Kompjuternye sistemy – Problems of information security. Computer Systems*. 2013. vol. 4. pp. 59–67.
12. Khomonenko A.D., Gindin S.I. Stochastic Models for Cloud Computing Performance Evaluation // Proceedings of the 10th Central and Eastern European Software Engineering Conference in Russia. Moscow, Russian Federation. 2014. Available at: <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=2687233>. (accessed 18.05.2015).
13. Takamashi Y., Takami Y. A Numerical Method for the Steady-State Probabilities of a GI/G/c Queuing System in a General Class. *J. of the Operat. Res. Soc. of Japan*. 1976. vol. 19. no. 2. pp. 147–157.
14. Khomonenko A. D. [The distribution of waiting times in queuing systems such as GIq / Hk / n / R ≤ ∞]. *Avtomatika i telemehanika – Automation and Remote Control*. 1990. vol. 8. pp. 91–98. (In Russ.).

15. Cybenko G. Approximation by Superpositions of a Sigmoidal Function. *Mathematical Control Signals Systems*. 1989. vol. 2. pp. 303–314.
16. Funahashi K. On the Approximate Realization of Continuous Mappings by Neural Networks. *Neural Networks*. 1989. vol. 2. no. 3. pp. 183–192.
17. Wasserman Ph.D. *Nejrokompjuternaja tehnika. Teorija i praktika* [Neurocomputing appliances. Theory and practice]. M.: Mir. 1992. 184 p. (In Russ.).
18. Lauks G., Jelinskis J. Metamodelling of Queuing Systems Using Fuzzy Graphs. *Electronics and Electrical Engineering. Kaunas: Technologija*. 2009. no. 4(92). pp. 61–64.

Хомоненко Анатолий Дмитриевич — д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой информационных и вычислительных систем, ФГБОУ ВПО Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I. Область научных интересов: численная теория массового обслуживания, программирование, операционные и информационные системы. Число научных публикаций — 150. khomon@mail.ru, <http://www.pgups.ru>; Московский пр., 9, Санкт-Петербург, 190031; р.т.: 457-80-23, Факс: 310-75-25.

Khomonenko Anatoly Dmitrievich — Ph.D., Dr. Sci., professor, head of information and computing systems department, Petersburg State Transport University. Research interests: queuing systems, artificial intelligence, databases. The number of publications — 150. khomon@mail.ru, <http://www.pgups.ru>; 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031; office phone: 457-80-23, Fax: 310-75-25.

Яковлев Евгений Леонидович — начальник учебной лаборатории кафедры математического и программного обеспечения, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского. Область научных интересов: численная теория массового обслуживания, нейросети. Число научных публикаций — 0. evgen-1932@yandex.ru; ул. Ждановская, 13, Санкт-Петербург, 197198; р.т.: +7(812) 237-95-25.

Leonidovich Yakovlev Evgeny — head of the training laboratory of the mathematical and software department, Mozhaisky Military Space Academy. Research interests: numerical queuing theory, neural networks. The number of publications — 0. evgen-1932@yandex.ru; 13, Zhdanovskaya street, St.-Petersburg, 197198, Russia; office phone: +7(812) 237-95-25.

РЕФЕРАТ

Хомоненко А.Д., Яковлев Е.Л. **Нейросетевая аппроксимация характеристик многоканальных немарковских систем массового обслуживания.**

Предлагается нейросетевой подход к аппроксимационному расчету характеристик многоканальных систем массового обслуживания (СМО) с «разогревом» и неограниченной емкостью очереди. Суть подхода: для дискретных наборов основных входных параметров моделей многоканальных СМО проводится расчет выходных параметров. При этом устанавливается дискретная зависимость отдельных выходных параметров, например, коэффициента вариации выходного потока заявок от коэффициента вариации входного потока заявок, при фиксированных значениях остальных параметров. Значение выходного параметра для произвольного значения входного параметра определяется путем аппроксимации по вычисленному дискретному набору значений входных и выходных параметров в ближайших точках. Подход позволяет существенно снизить трудоемкость численных расчетов вероятностно-временных характеристик систем и сетей массового обслуживания. Предлагаемый нейросетевой подход может быть применен к аппроксимационному расчету характеристик многоканальных СМО общего вида $GI/G/n/R \leq \infty$ – с рекуррентным входящим потоком, произвольным распределением длительности обслуживания заявок, n каналами и неограниченной емкостью очереди, а также при расчете немарковских разомкнутых сетей массового обслуживания. Приведены результаты численного эксперимента. Обоснованы целесообразность применения метода Байесовской регуляризации для обучения нейросети и наилучшее число нейронов.

SUMMARY

Komonenko A. D., Yakovlev, E. L. **Neural Network Approximation of Characteristics of Multi-Channel Non-Markovian Queuing Systems.**

In this paper, we propose a neural network approach to approximate the calculation of characteristics of multichannel queuing systems (QS) with a "warm-up" and the unlimited capacity of the queue. The essence of the approach: for discrete sets of main input parameters of multichannel QS models, calculation of the output parameters is performed. This sets the discrete dependence of some output parameters. For example, the coefficient of variation of the output stream of requests is dependent on the coefficient of variation of the input flow of requests, while other parameters are characterized by fixed values. The value of the output parameter for arbitrary values of the input parameter is determined by the approximation of the computed discrete set of values of input and output parameters at the nearest points. This approach can significantly reduce the complexity of numerical calculations of probabilistic-time characteristics of systems and queuing networks. The proposed neural network approach can be applied to approximation calculation of the characteristics of the multichannel QS of the general form $GI/G/n/R \leq \infty$ - with recurrent input stream, arbitrary distribution of service time of the request, n channels, and unlimited capacity queues, as well as in the calculation of non-Markovian open queuing networks. The results of numerical experiment are presented. The advisability of the use of Bayesian regularization method for training a neural network and the best number of neurons are shown.

А.Л. ЕРШОВ

ИДЕНТИФИКАЦИЯ АЛГОРИТМОВ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ДАННЫХ В ИСПОЛНЯЕМЫХ МОДУЛЯХ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Ершов А.Л. Идентификация алгоритмов преобразований данных в исполняемых модулях программного обеспечения.

Аннотация. Стремительное развитие информационных технологий в последние десятилетия стало причиной значительного увеличения объема исходных текстов программного обеспечения, а также его сложности. Данный факт обуславливает высокую сложность анализа программного обеспечения с целью понимания логики его функционирования, необходимость выполнения которого является важным моментом при проведении судебной компьютерно - технической экспертизы. В статье раскрывается один из подходов к автоматизации процесса идентификации стандартизированных алгоритмов преобразования данных в исполняемых модулях в условиях отсутствия исходных текстов за счет учета их внутренних информационных связей с целью упрощения понимания программ.

Ключевые слова: идентификация алгоритмов, исполняемый модуль, программное обеспечение, линейный блок, слайсинг, информационный граф.

Ershov A.L. Identification of Data Conversion Algorithms in Executable Software Modules.

Abstract. The rapid development of information technology in recent decades has led to a substantial increase in the source code of software, as well as its complexity. This fact points to the high complexity of the assessment of its compliance with the requirements of information security. An important point in this is to ensure reliability as the hardware component and software. Ensuring confidence in the software tools are often carried out in the absence, for whatever reasons of their source. The article deals with an approach to automate the identification of standardized algorithms for data conversion in accordance with their internal information links.

Keywords: identification algorithms, executable module, software, linear unit, slicing, information graph.

1. Введение. В настоящее время основу большинства современных российских информационно-телекоммуникационных систем составляют программно-аппаратные средства импортного производства, которые, как правило, не имеют в своем составе полного набора исходных текстов программного обеспечения. Кроме того, зачастую и отечественные программисты используют в составе своих продуктов модули так называемых "сторонних" разработчиков, которые по тем или иным причинам также не предоставляют исходные тексты своих программ.

Указанная ситуация зачастую существенным образом осложняет проведение судебной компьютерно-технической экспертизы, а точнее, одной из её составляющих – программно-компьютерной экспертизы (ПКЭ). ПКЭ предназначена для осуществления экспертного исследования программного обеспечения. Её основными целями являются изучение функционального предназначения, характеристики реализуемых требований, алгоритма и структурных особенностей, текущего

состояния представленного на исследование программного обеспечения компьютерной системы [1]. Одними из основных вопросов, на которые должна дать ответ ПКЭ, являются следующие [1]:

1. Какое общее функциональное предназначение имеет программное средство?
2. Имеются ли на носителях информации программные средства для реализации определенной функциональной задачи?
3. Используется ли данное программное средство для решения определенной функциональной задачи?
4. Имеет ли программное средство защитные возможности (программные, аппаратно-программные) от несанкционированного доступа и копирования?
5. Каким образом организованы защитные возможности программного средства?
6. Каков общий алгоритм данного программного средства?
7. Имеются ли в программном средстве враждебные функции, которые влекут уничтожение, блокирование, модификацию либо копирование информации, нарушение работы компьютерной системы?

Другими словами, ПКЭ подразумевает, в той или иной степени, проведение анализа программного обеспечения с целью понимания логики его функционирования. Одной из особенностей подобного анализа является необходимость анализа программного обеспечения, имея в наличии только машинный код. Важная роль для понимания логики функционирования программного обеспечения в указанных условиях отводится задаче идентификации в исполняемых модулях стандартизированных алгоритмов преобразования данных.

Сложность решения задачи идентификации алгоритмов в исполняемых модулях определена "однонаправленностью" процесса формирования машинного кода (рисунок 1) [2].

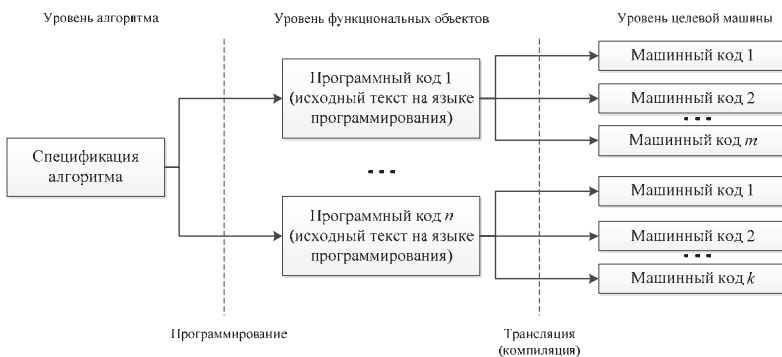


Рис. 1. Этапы формирования машинного кода исполняемого модуля

Программист, имея в качестве исходных данных алгоритм, представленный в виде блок-схемы или словесного описания, может написать программу на высокоуровневом языке программирования, его реализующую, в общем случае, множеством различных способов (уровень функциональных объектов на рисунке 1). В связи с этим машинный код, реализующий один и тот же алгоритм, будет отличаться в зависимости от исходного текста программы. Более того, даже в случае идентичности исходных текстов программы, машинные коды, реализующие их, могут отличаться друг от друга, т.к. они также зависят и от используемого компилятора и его настроек. В частности такими настройками могут быть необходимость оптимизации кода с целью минимизации его объема, скорости выполнения или вообще не использовать оптимизацию и т.д. (уровень целевой машины на рисунке 1). Таким образом, возможные варианты машинного кода, реализующего один и тот же алгоритм, могут значительно отличаться друг от друга (рисунок 2).

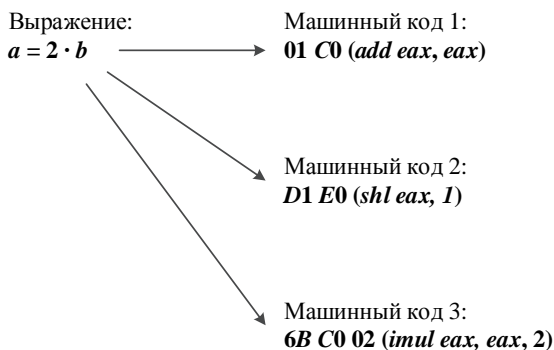


Рис. 2. Варианты машинного кода, реализующего одно и то же математическое выражение

2. Анализ известных способов решения задачи идентификации алгоритмов преобразования данных в исполняемых модулях программного обеспечения. В настоящее время для идентификации стандартизированных алгоритмов преобразования данных в исполняемых модулях используют набор характерных признаков программного или машинного кода, их реализующих. В основном, в качестве таких признаков принимают либо сигнатуры [3, 4], либо статистические характеристики машинного кода [5, 6]. Встречаются также подходы к идентификации алгоритмов с использованием их структурных особенностей [7–11], а также метода "черного ящика" [12].

В качестве сигнатур, например, для криптографических алгоритмов, могут выступать константы или таблицы подстановок, которые прописаны в стандарте на сам алгоритм. Сигнатурами также могут быть последовательности байт машинного кода [4], инструкций процессора или совокупностей инструкций и их операндов-констант [5] и т.д. Использование сигнатур позволяет быстро и достаточно точно идентифицировать известный алгоритм, но это применимо только в случае, если для него возможно их создание. Также недостатком данного подхода является невозможность в ряде случаев определить "границы" и конкретное местонахождение реализации алгоритма, так как обнаружение сигнатуры не всегда позволяет обнаружить саму реализацию алгоритма. Например, при использовании в качестве сигнатуры константы (таблицы констант) криптографического алгоритма, обнаружение её положения в исполняемом модуле не всегда позволяет обнаружить сам исполняемый код, реализующий алгоритм.

В качестве статистических характеристик, также используемых, например, для идентификации криптографических алгоритмов, можно использовать частотность появления тех или иных инструкций процессора (или их последовательностей) на участке кода определенной длины. Дополнительно могут рассматриваться изменение энтропии выходных значений по отношению к энтропии входных [13] и т.д. Оценка статистических характеристик машинного кода достаточно успешно используется для определения наличия в машинном коде элементов криптографических алгоритмов, т.к. в коде, их реализующем, гораздо чаще, чем в обычном, встречаются арифметические и битовые инструкции [14]. В то же время, данный подход зачастую приводит к появлению большого количества ложно - положительных результатов при идентификации криптографических алгоритмов, т.е. он позволяет предположить присутствие в машинном коде некоторого криптографического примитива, но определить, к какому конкретно алгоритму он принадлежит, не всегда возможно. В дополнение к этому, существуют определенные сложности в определении длины окна, в котором необходимо вычислять частоты появления инструкций.

Кроме описанных выше, в [7] описывается подход к идентификации стандартизированных алгоритмов преобразования данных с применением элементов морфологического анализа. Суть данного подхода состоит в сравнении фрагментов графов потока управления функциональных объектов дизассемблированного листинга исполняемого модуля с фрагментами графов потока управления известных алгоритмов (шаблонами). Основным недостатком подобного подхода является большое число ложно - положительных результатов в случае

«простых» графов потоков управления, т.е. когда в графе либо отсутствуют ветвления потока управления, либо их количество невелико (примером алгоритма с подобным графом потока управления является криптографический алгоритм *Rijndael*).

В статье [8] авторы описывают использование методов синтаксического анализа для распознавания файловых вирусов. В основе работы лежит предположение о том, что вероятности порождения цепочек машинных команд незараженного и вредоносного кода соответствующими (заранее полученными на этапе обучения) стохастическими грамматиками будут отличаться. Т.е., имея в наличии восстановленные (на этапе обучения) стохастические грамматики, порождающие незараженный и вредоносный машинный код, можно определить принадлежность машинного кода к соответствующему классу (вредоносному или незараженному). Подобный подход можно использовать и для идентификации алгоритмов преобразования данных, однако, основным его недостатком для рассматриваемой задачи является необходимость наличия большого (порядка нескольких тысяч) количества прецедентов на этапе обучения, что в реальных условиях обеспечить практически невозможно.

Анализ вышеописанных результатов исследований, проводимых в данном направлении, а также приведенных в [5] показал, что существующие решения задачи идентификации алгоритмов преобразования данных в исполняемых модулях имеют существенный недостаток, заключающийся в отсутствии анализа информационных связей между аргументами, внутренними переменными и результатами алгоритмов, что и приводит к достаточно высоким значениям вероятностей ошибок первого и второго рода при идентификации. В связи с этим, для построения системы идентификации алгоритмов преобразования данных, предварительно необходимо разработать модель, которая бы учитывала их внутренние информационные связи.

3. Аналитическая модель алгоритма преобразования данных. По результатам анализа этапов формирования исполняемых модулей (рисунок 1) можно сделать вывод, что единственным инвариантом в этой последовательности является спецификация алгоритма. Данный факт послужил основой для синтеза системы их идентификации на основе использования модели, построенной с учетом структурных свойств алгоритмов. В качестве таких свойств первоначально были выбраны:

1. Количество входных аргументов.
2. Распределение входных аргументов по операторам.
3. Количество используемых констант.

4. Минимально необходимый объем памяти (количество внутренних переменных).
5. Число операторов промежуточного представления алгоритма в виде трехадресного кода.
6. Число операторов промежуточного представления алгоритма в SSA – форме.
7. Количество циклов.
8. Количество значимых операторов (операторов, непосредственно влияющих на результат).

Исходя из невозможности предсказать, каким именно образом программист реализует исходный алгоритм на языке программирования, введем ограничение: будем предполагать, что программист не будет целенаправленно реализовывать несколько алгоритмов преобразования данных в одной программе (или в одном функциональном объекте) Учитывая данное допущение, можно выделить среди перечисленных выше характеристик те, которые будут устойчивы к изменению параметров процесса формирования исполняемых модулей. В связи с тем, что структура исходного текста программы, реализующей алгоритм, может, не смотря на введенное ограничение, меняться, имеет смысл рассмотреть исходный алгоритм, как совокупность составляющих его линейных частей (блоков). В этом случае перечисленные характеристики необходимо рассматривать применительно к линейным блокам исходного алгоритма. Таким образом, распределение входных аргументов по операторам линейного блока, также как и количество операторов в промежуточных представлениях линейных блоков в качестве устойчивых признаков алгоритма не подходят, т.к. данные характеристики кода исполняемого модуля зависят от используемого компилятора и его настроек. Количество циклов при рассмотрении алгоритма в виде совокупности линейных блоков не имеет смысла само по себе. С другой стороны, не смотря на то, что количество входных аргументов, используемых констант и количество значимых операторов линейных блоков в исполняемом модуле также зависят от используемого компилятора и его настроек, их минимальные значения все равно остаются неизменными и в связи с этим их можно использовать в качестве признаков для идентификации алгоритмов преобразования данных. По такому же принципу можно использовать и минимально необходимое количество внутренних переменных линейного блока.

Модель алгоритмов, построенная только на основе перечисленных признаков, не отражает особенности их внутренних информационных связей. Проведенный анализ показал, что наиболее эффектив-

ным способом представления внутренних информационных связей алгоритма является информационный граф [15], который, в случае линейности соответствующих ему операторных схем, является инвариантом относительно всех других схем, описывающих тот же алгоритм. Но это справедливо только тогда, когда ни одна из дуг исходного информационного графа не может быть удалена без нарушения корректности вычисления результата алгоритмом. Исходя из этого, в качестве дополнительного признака алгоритма целесообразно использовать информационный граф, построенный для его линейных блоков, оптимизированных с целью минимизации используемой памяти. Подводя итог вышесказанному, модель алгоритма предлагается представить в виде множества векторов признаков его линейных блоков:

$$M = \{ \langle a, v, s, c, I \rangle_n \}, n = \overline{1, N}, \quad (1)$$

где: a – количество входных аргументов;
 v – минимальное количество внутренних переменных, необходимое для выполнения линейного блока алгоритма;
 s – минимальное количество значимых операторов линейного блока алгоритма;
 c – количество используемых констант в линейном блоке алгоритма;
 I – информационный граф линейной части алгоритма;
 N – количество линейных блоков.

4. Модель системы идентификации стандартизированных алгоритмов преобразования данных. Совокупность вышеописанных особенностей формирования машинного кода и модели алгоритма позволила разработать систему идентификации стандартизированных алгоритмов преобразования данных (рисунок 3).

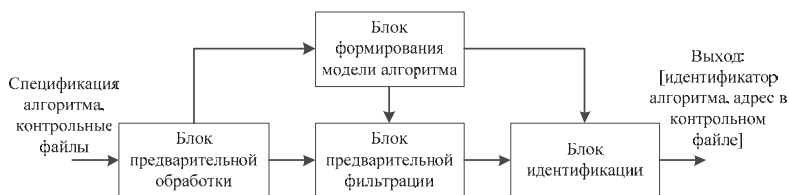


Рис. 3. Структурная схема системы идентификации стандартизированных алгоритмов преобразования данных

Функционирование системы происходит в 2 этапа. На первом этапе на вход блока предварительной обработки поступает спецификация известного алгоритма преобразования данных. В данном блоке эксперт приводит описание алгоритма в единую форму его промежуточного представления (трехадресный код, SSA – форма и т.д.), что и является

выходом блока на данном этапе. Затем полученное промежуточное представление алгоритма поступает на блок формирования его модели, где выполняются оптимизирующие преобразования и выделяются линейные блоки. По полученным результатам определяются параметры модели исходного алгоритма, представленной в выражении (1).

На втором этапе на вход блока предварительной обработки поступает исполняемый модуль (контрольный файл). В данном блоке записывается трасса его выполнения. Трасса записывается с помощью системы динамического анализа бинарного кода *Pin* (разработчик – компания *Intel*) и специально разработанного для этого модуля расширения системы *Pin*. Из полученной трассы выделяются линейные блоки ("*basic block*" в трактовке *Pin*). Далее, в каждом из линейных блоков определяется наличие "развернутых" циклов и, при их наличии, линейный блок заменяется телом выявленного цикла (первой его итерацией) или их совокупностью. После этого определяются входные аргументы для каждого из линейных блоков. За входные аргументы принимаются операнды, читаемые первый раз операторами линейного блока при его выполнении. Затем, над каждым из линейных блоков выполняется операция прямого "разреженного" слайсинга [16] (критерием слайсинга является каждый из входных аргументов линейного блока). Данная операция оставляет в составе линейных блоков только те операторы, которые непосредственно изменяют значения, связанные по информации с одним из входных аргументов, и удаляет остальные. Далее по полученным результатам определяются остальные значимые признаки линейных блоков, перечисленные ранее для модели алгоритма (v, s, c, l). Выходом блока предварительной обработки на втором этапе является множество моделей линейных блоков трассы выполнения контрольного файла. Полученное множество моделей линейных блоков поступает на вход блока предварительной фильтрации, который пропускает на свой выход только те линейные блоки, модели которых удовлетворяют выражению (2):

$$L_{out} = L_{in} | (a_{in} \geq a_m \wedge v_{in} \geq v_m \wedge s_{in} \geq s_m \wedge c_{in} \geq c_m), \quad (2)$$

где: L_{out} – линейные блоки, прошедшие на выход блока предварительной фильтрации;

L_{in} – линейные блоки, поступающие на вход блока предварительной фильтрации;

$a_{in}, v_{in}, s_{in}, c_{in}$ – соответствующие параметры модели линейного блока трассы выполнения контрольного файла;

a_m, v_m, s_m, c_m – соответствующие параметры модели известного алгоритма преобразования данных.

С выхода блока предварительной фильтрации прошедшие на его выход линейные блоки поступают на вход блока идентификации, в котором происходит проверка, является ли один из информационных графов линейных блоков модели известного алгоритма подграфом информационного графа модели линейного блока из трассы выполнения контрольного файла. В случае положительного решения считается, что данный линейный блок принадлежит программному субъекту, реализующему известный алгоритм преобразования данных. Идентификатор алгоритма вместе с адресом линейного блока являются выходом системы.

5. Заключение. Предложенная система является предварительным решением задачи идентификации алгоритмов преобразования данных. Для оценки её эффективности была разработана её программная реализация. Основой программной реализации системы является система динамического анализа бинарного кода *Pin* компании *Intel*. Автором был разработан модуль расширения комплекса *Pin*, который реализует описанный в статье механизм идентификации. Предварительные результаты проведенных экспериментов показали, что вероятность принятия системой правильного решения составляет значение не меньше 0,96 при точности оценки 0,04 и её надежности 0,95. В ходе эксперимента проводилась идентификация алгоритма расчета криптографической хэш - функции *SHA – 256* [17] в 20 файлах различного назначения как содержащих, так и не содержащих в себе реализацию искомого алгоритма (системные библиотеки, офисные и системные приложения, "хэш – калькуляторы" и т.д.). Вместе с этим, в ходе проведения экспериментов был выявлен и основной недостаток предлагаемой системы идентификации, а именно – зависимость качества идентификации от значений параметров моделей известных алгоритмов. В настоящее время ведется работа по уточнению граничных условий применимости данной системы на практике. В дальнейшем также необходимо проработать процедуру принятия решения в случае отнесения одного и того же линейного блока к нескольким алгоритмам, линейных блоков одного функционального объекта к разным алгоритмам, а также в других неопределенных ситуациях. Несмотря на это, полученные уже на данном этапе результаты позволяют снизить временные затраты на выполнение поиска интересующего алгоритма преобразования данных в исполняемых модулях программного обеспечения в условиях отсутствия исходных текстов.

Литература

1. *Российская Е.Р., Галашина Е.И.* Настольная книга судьи: судебная экспертиза // М.: Проспект. 2010.

2. Долгова К.Н., Чернов А.В. О некоторых задачах обратной инженерии // Труды Института системного программирования РАН. 2008. Т. 15. С. 119–134.
3. Zhao R. et al. Detection and analysis of cryptographic data inside software // *Information Security*. NY: Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2011. vol. 1. no. 1. pp. 182–196.
4. IDA F.L.I.R.T. Technology: In-Depth. URL: https://www.hex-rays.com/products/ida/tech/flirt/in_depth.shtml (дата обращения: 28.05.2015)
5. Gröbert F. Automatic Identification of Cryptographic Primitives in Software // Ruhr-University Bochum. 2010. 115 p.
6. Быков А.В. Поиск реализаций криптографических алгоритмов в дизассемблированном программном обеспечении // Инновации в информационно-аналитических системах: сб. научн. трудов. Вып. 2. 2011. С. 56–64.
7. Thierry A. Recognition of binary patterns by Morphological analysis // *Reverse Engineering Conference*. 2012.
8. Мацкевич А. Г., Козачок В. И. Математическая модель системы стохастического структурного распознавания файловых вирусов // *Безопасность информационных технологий*. 2007. № 3. С. 44–49.
9. Булычев П.Е. Алгоритмы вычисления отношений подобия в задачах верификации и реструктуризации программ // М.: МГУ им. М.В. Ломоносова. 2010. 169с.
10. Ахин М.Х., Ицъксон В.М. Слайсинг над деревьями: метод обнаружения разорванных и переплетенных клонов в исходном коде программного обеспечения // *Моделирование и анализ информационных систем*. 2012. Т. 19. № 6. С. 69–78.
11. Подымов В.В. Быстрые алгоритмы проверки эквивалентности программ в модели с полугрупповой семантикой // М.: МГУ им. М.В. Ломоносова. 2014. 164с.
12. Calvet J. Cryptographic function identification in obfuscated binary programs // *Reverse Engineering Conference*. 2012. URL: https://recon.cx/2012/schedule/attachments/46_Joan_CryptographicFunctionIdentification.pdf (дата обращения: 28/05/2015).
13. Lutz N. Towards Revealing Attackers' Intent by Automatically Decrypting Network Traffic // Fritz Kutter Fonds. 2008. URL: http://www.kutterfonds.ethz.ch/App_Themes/default/datalinks/NoeLutz-08.pdf (дата обращения: 28.05.2015).
14. Wang Z., Jiang X., Cui W., Wang X. ReFormat: Automatic Reverse Engineering of Encrypted Messages // *Proceedings of the 14th European conference on Research in computer security (ESORICS'09)*. 2009. pp. 200–215.
15. Еришов А.П. Введение в теоретическое программирование (беседы о методе) // М.: Издательство «Наука». 1977. 288 с.
16. Sridharan M., Fink S. J., Bodik R. Thin Slicing // *ACM SIGPLAN Notices*. 2007. vol. 42. no. 6. pp. 112–122.
17. FIPS PUB 180 – 4. Security Hash Standard (SHS) // NIST. Computer Security Resource Center. 2012. URL: <http://csrc.nist.gov/publications/fips/fips180-4/fips-180-4.pdf> (дата обращения: 28.05.2015).

References

1. Rossijskaja E.R., Galjashina E.I. *Nastol'naja kniga sud'i: sudebnaja jekspertiza*. [Handbook of the judge: forensic examination]. Moscow: Prospekt. 2010. 458 p. (In Russ.).
2. Dolgova K.N., Chernov A.V. [About some problems of reverse engineering]. *Trudy Instituta sistemnogo programirovanija RAN – Proceedings of Institute for system programming of RAS*. Moscow. 2008. vol. 15. pp. 119–134. (In Russ.).
3. Zhao R. et al. Detection and analysis of cryptographic data inside software. *Information Security*. NY: Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2011. vol. 1. no. 1. pp. 182–196.

4. IDA F.L.I.R.T. Technology: In-Depth. Available at: https://www.hex-rays.com/products/ida/tech/flirt/in_depth.shtml (accessed 28.05.2015).
5. Gröbert F. Automatic Identification of Cryptographic Primitives in Software. Ruhr-University Bochum. 2010. 115 p.
6. Bykov A.V. [Searching for implementations of cryptographic algorithms in disassembly software]. *Innovacii v informacionno-analiticheskikh sistemah: sb. nauchn. trudov* [Innovations in information-analytical systems: Collected papers]. Kursk: Naukom. 2011. vol. 2. pp. 56–64 (In Russ.).
7. Thierry A. Recognition of binary patterns by Morphological analysis. Reverse Engineering Conference. 2012.
8. Mackevich A. G., Kozachok V. I. [Mathematical model of stochastic structural recognition file viruses]. *Bezopasnost' informacionnyh tehnologij – Security of information technologies*. Voronez. 2007. vol. 3. pp. 44–49. (In Russ.).
9. Bulychev P.E. *Algoritmy vychislenija otoshenij podobija v zadachah verifikacii i restrukturizacii program* [Algorithms for computing similarity relationships in problems of verification and restructuring programs]. Moscow: MGU im. M.V. Lomonosova. 2010. 169 p. (In Russ.).
10. Ahin M.H., Icykson V.M. [Slicing over the trees: the method of detection of broken and twisted clones in source code software] *Modelirovanie i analiz informacionnyh sistem – Modeling and Analysis of Information Systems*. Jaroslavl'. 2012. vol. 19. no. 6. pp. 69–78. (In Russ.).
11. Podymov V.V. *Bystrye algoritmy proverki jekvivalentnosti programm v modeljah s polugruppovoj semantikoj* [Fast algorithms for checking the equivalence of programs in models with semantics semigroup]. Moscow: MGU im. M.V. Lomonosova. 2014. 164 p. (In Russ.).
12. Calvet J. Cryptographic function identification in obfuscated binary programs. Reverse Engineering Conference. 2012. Available at https://recon.cx/2012/schedule/attachments/46_Joan_CryptographicFunctionIdentification.pdf (accessed: 28/05/2015).
13. Lutz. N. Towards Revealing Attackers' Intent by Automatically Decrypting Network Traffic. Fritz Kutter Fonds. 2008. Available at http://www.kutterfonds.ethz.ch/App_Themes/default/datalinks/NoeLutz-08.pdf (accessed: 28.05.2015).
14. Wang Z., Jiang X., Cui W., Wang X. ReFormat: Automatic Reverse Engineering of Encrypted Messages. North Carolina State University. 2008. 16 p.
15. Ershov A.P. *Vvedenie v teoreticheskoe programmirovanie (besedy o metode)* [Introduction to theoretical programming (talk about the method)]. Moscow: Izdatel'stvo "Nauka". 1977. 288 p. (In Russ.).
16. Sridharan M., Fink S. J., Bodík R. Thin slicing. ACM SIGPLAN Notices. 2007. vol. 42. No. 6. pp. 112–122.
17. FIPS PUB 180-4. Secure Hash Standard (SHS). National Institute of Standards and Technology. Gaithersburg. 2012. 31 p.

Erшов Алексей Леонидович — научный сотрудник, Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации. Область научных интересов: тестирование программного обеспечения. Число научных публикаций — 12. al.er@rambler.ru; Наугорское шоссе, д. 70, к. 58, Орел, 302020; р.т.: +7(919)205-34-48.

Ershov Aleksey Leonidovich — researcher, The Academy of Federal Security Guard Service of the Russian Federation. Research interests: software testing. The number of publications — 12. al.er@rambler.ru; 70, Naugorskoe shosse, apt. 58, Ore1, 302020, Russia; office phone: +7(919)205-34-48.

РЕФЕРАТ

Ershov A.L. **Идентификация алгоритмов преобразования данных в исполняемых модулях программного обеспечения.**

На современном этапе развития информационных технологий, в силу отсутствия у конечного пользователя (в подавляющем большинстве случаев) исходных текстов программного обеспечения, существенно затруднено проведение программно-компьютерной экспертизы, для решения большинства задач которой необходимо понимание логики функционирования программ. В работе рассмотрены известные подходы к идентификации алгоритмов преобразования данных в исполняемых модулях программного обеспечения, которая является одним из основных этапов процесса исследования программного обеспечения с целью понимания его назначения и логики функционирования. Автором предложено решение для упрощения данного этапа за счёт его автоматизации.

В основе предложенного подхода лежит предположение, что исходный алгоритм преобразования данных можно представить в виде совокупности его линейных частей, чьи характеристики можно использовать в качестве признаков для автоматического распознавания неизвестных функциональных объектов в исполняемых модулях программного обеспечения. В дополнение к выделенным признакам для учета внутренних информационных связей предлагается использовать информационный граф, построенный для операторных схем линейных частей алгоритма, оптимизированных с целью экономии памяти. Предложенный подход в определенной степени позволяет абстрагироваться от вариативности реализаций в машинном коде алгоритмов преобразования данных, вносимой разработчиками программного обеспечения.

SUMMARY

Ershov A.L. **Identification of Data Conversion Algorithms in Executable Software Modules.**

At the present stage of the development of information technologies an end user (in most cases) lacks the source code of software, which greatly complicates software forensics, to solve the majority of problems of which we need to understand the logic of the functioning of programs. The paper discusses the known approaches to the identification of data conversion algorithms in the executable software modules, which is one of the main stages of the research of software to understand its purpose and logic of functioning. The author provides a solution to simplify this stage due to its automation.

At the heart of the approach is the assumption that the initial data conversion algorithm can be represented as a combination of its linear parts, whose characteristics can be used as signs for the automatic recognition of unknown functional objects in the executable software modules. In addition to the shown features to account for the internal data connections, author offers to use the information graph built for the operator schemes of linear algorithm parts, optimized to save memory. The proposed approach allows us, at a certain degree, to abstract from variability of implementations in machine code of data conversion algorithms, introduced by software developers.

Е.В. КОПКИН, В.А. ЧИКУРОВ, В.В. АЛЕЙНИК, О.Г. ЛАЗУТИН
**АЛГОРИТМ ПОСТРОЕНИЯ ГИБКОЙ ПРОГРАММЫ
ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА ПО
КРИТЕРИЮ ЦЕННОСТИ ПОЛУЧАЕМОЙ ИНФОРМАЦИИ**

Копкин Е.В., Чикуров В.А., Алейник В.В., Лазутин О.Г. Алгоритм построения гибкой программы диагностирования технического объекта по критерию ценности получаемой информации.

Аннотация. Предлагается алгоритм построения гибкой программы диагностирования технического объекта по критерию ценности получаемой информации. Рассматриваются диагностические признаки, которые имеют непрерывную форму представления. Приводится числовой пример реализации алгоритма.

Ключевые слова: гибкая программа диагностирования, ценность получаемой информации, анализ технического состояния, объект наблюдения.

Kopkin E.V., Chikurov V.A., Aleynik V.V., Lazutin O.G. Algorithm for Constructing a Flexible Program for Technical Object Diagnosing on the Criterion of Received Information Value.

Abstract. The algorithm for constructing a flexible program for technical object diagnosing on the criterion of received information value is presented. Diagnostic signs that have a continuous form of representation are considered. A numerical example of the algorithm implementation is given.

Keywords: flexible diagnosis program, received information value, technical state analysis, observation object.

1. Введение. В настоящее время широко применяются последовательные методы анализа технического состояния (ТС) объектов, которые реализуются посредством использования гибких программ диагностирования (ГПД).

При построении ГПД для автоматизированного анализа состояний объектов наблюдения (в частности, их технического состояния) существенное значение имеет не только количество получаемой информации, но даже в большей степени ее ценность (полезность).

Одним из первых, кто ввел понятие ценности (полезности) информации, был академик А.А. Харкевич [1]. Он определил ее как свойство информации изменять эффективность (результативность) инициированного ею процесса функционирования системы, в которой используется данная информация. Для таких систем определение ценной информации позволяет существенно сократить ее семантическую избыточность. В частности, А.А. Харкевичем предложено определять ценность получаемой информации через двоичный логарифм отношения вероятностей достижения цели управления до и после получения информации.

Обстоятельный анализ подходов к определению и вычислению ценности информации сделан в работе Г.П. Шанкина [2], который предложил аксиоматическое определение понятия «ценности информации» и разработал ряд математических моделей, позволяющих вычислять ценность информации, необходимой пользователю для достижения некоторой цели. Развиваемый в этой работе подход базируется на трудах Р.Л. Стратоновича и М.М. Бонгарда.

На основе меры Харкевича, для которой область определения ценности информации находится в диапазоне $(-\infty; +\infty)$, в работах [3, 4] предложен алгоритм построения оптимальной ГПД методом динамического программирования.

В работе [5] В.И. Корогодина предложена другая мера вычисления ценности информации, при использовании которой ее величина изменяется от 0 до 1. Для некоторых приложений теории анализа технического состояния такой подход может представлять практический интерес.

К настоящему времени публикации, связанные с построением программ диагностирования по указанному показателю, отсутствуют. Поэтому разработка алгоритмов построения ГПД по критерию ценности получаемой информации является актуальной и практически важной задачей.

2. Алгоритм построения гибкой программы диагностирования технического объекта по критерию ценности получаемой информации. Для решения задачи воспользуемся моделью, предложенной в работе [4]. Согласно этой модели полагаем заданными множество:

$$S = \{S_i \mid i = \overline{1, m}\}$$

возможных ТС объекта, множество:

$$\Pi = \{\pi_j \mid j = \overline{1, n}\}$$

диагностических признаков, на котором все ТС попарно различимы, и множество:

$$L = \{\ell_{ij} \mid i = \overline{1, m}; j = \overline{1, n}\}$$

интервалов вещественной числовой оси, каждый из которых характеризует возможный разброс j -го признака в i -м ТС. Измерительная информация с объекта поступает в виде зарегистрированных значений y_j соответствующих признаков π_j , $j = \overline{1, n}$. Значения y_j могут быть

произвольными вещественными числами, равномерно распределенными по заданным интервалам ℓ_{ij} .

Проверка признака π_j заключается в измерении его текущего значения y_j и выявлении принадлежности этого значения интервалу $\ell_{ij} \in L$ или нескольким интервалам, если они пересекаются.

В соответствии с используемой моделью основными элементами синтезируемой программы являются информационные состояния (ИС) $R \subseteq S$ процесса диагностирования и выполняемые в них проверки заданных признаков $\pi_j \in \Pi$. Каждое из ИС представляет собой подмножество «подозреваемых» ТС, в одном из которых может находиться объект. Конечными ИС являются одноэлементные множества:

$$R_i = \{S_i\}, i = \overline{1, m},$$

которые обозначим через R_i . Все остальные множества $R \subseteq S$, содержащие два и более, вплоть до m , элементов обозначим через R_k ($k = m+1, m+2, \dots$).

Подмножество допустимых для проверки признаков в ИС R_k обозначим через Π_k и будем определять его из условия:

$$\pi_j \in \Pi_k, \text{ если } (\exists S_i, S_f \in R_k) : (\ell_{ij} \cap \ell_{jf} = \emptyset). \quad (1)$$

Для каждого признака $\pi_j \in \Pi_k$ выделим на вещественной числовой оси ряд подынтервалов Δ_{kj} , которые отличаются друг от друга числом и составом пересекающихся на них интервалов ℓ_{ij} и могут иметь в общем случае разную длину.

Проверку признака π_j обозначим через $\hat{\pi}_j$ и в дальнейшем будем называть просто проверкой.

Исходом проверки $\hat{\pi}_j$ в ИС R_k назовем событие, заключающееся в попадании измеренного значения y_j признака в один из подынтервалов Δ_{kj} . Очевидно, что число возможных исходов проверки равно числу выделенных подынтервалов и что это число конечно. Обозначим его ω_{kj} . Каждому подынтервалу Δ_{kj} присвоим порядковый номер ν , т.е.

введем обозначение Δ_{kj}^v . Соответственно, v -й исход проверки $\hat{\pi}_j$ обозначим через $\hat{\pi}_j^v$, определив его как событие $y_j \in \Delta_{kj}^v$. Тогда проверку $\hat{\pi}_j$ можем формально представить, как отображение:

$$\hat{\pi}_j : R_k \rightarrow R_{kj}^v, \text{ если } y_j \in \Delta_{kj}^v, v = \overline{1, \omega_{kj}}, \quad (2)$$

где $R_{kj}^v \subset R_k$ — подмножество, содержащее только те из ТС $S_i \in R_k$, которым соответствуют пересекающиеся интервалы $\ell_{ij} \in L$.

При v -м исходе проверки $\hat{\pi}_j$ из ИС R_k получается новое ИС R_{kj}^v , содержащее меньшее число “подозреваемых” ТС.

Обозначим через $P_k(\hat{\pi}_j^v)$ вероятность v -го исхода проверки признака π_j в ИС $R_k \subseteq S$, т.е. вероятность попадания измеренного значения y_j в подынтервал Δ_{kj}^v . Эта вероятность вычисляется по формуле:

$$P_k(\hat{\pi}_j^v) = P(y_j \in \Delta_{kj}^v) = \frac{|\Delta_{kj}^v|}{|\nabla_{kj}|}, \quad (3)$$

где $|\Delta_{kj}^v| = \left| \bigcap_{\{i: S_i \in R_{kj}^v\}} \ell_{ij} \right|$ и $|\nabla_{kj}| = \left| \bigcup_{\{i: S_i \in R_k\}} \ell_{ij} \right|$ — длина пересечения и объединения интервалов соответственно.

Задача синтеза ГПД заключается в отыскании упорядоченных подмножеств $\Pi_{ir} \subseteq \Pi$, каждое из которых обеспечивает распознавание i -го ТС объекта (здесь r — номер ветви, ведущий в i -е ТС). Особенность искомых подмножеств в том, что они структурно взаимосвязаны в рамках составляемой программы, а потому не могут отыскиваться по отдельности. Другая особенность (только при использовании непрерывных признаков) — существование нескольких таких подмножеств для одного и того же ТС, причем все подмножества должны быть найдены в процессе составления программы. По этой причине отпадает необходимость использования индекса i в обозначении Π_{ir} , так как связь искомых подмножеств Π_r с i -м ТС объекта устанавливается в синтезируемой программе автоматически.

Составляемую программу будем представлять в виде ориентированного графа G , вершинами которого обозначаются ИС процесса диагностирования, а дугами — исходы проверок признаков в этих состояниях. Граф G состоит из ветвей $G_r, r \in U$ (r — порядковый номер ветви, U — множество всех ветвей), каждая из которых приводит к распознаванию конкретного ТС $S_i, i = \overline{1, m}$, имеет одну начальную и m конечных вершин — по числу возможных ТС объекта. Каждая из m конечных вершин соответствует опознанному ТС объекта.

Сущность алгоритма синтеза ГПД заключается в том, что в начальном ИС $R_k = S$ и в каждом из последующих состояний выбирается для проверки такой признак $\pi_j \in \Pi$, которому соответствует максимальное значение ценности получаемой информации.

Рассмотрим меру ценности информации, предложенную В.И. Корогодиным в работе [3] и модифицируем ее для использования в рассматриваемой предметной области.

Эта мера описывается формулой:

$$C = \frac{P - p}{1 - p}, \quad (4)$$

где P и p представляют собой вероятности достижения цели (для рассматриваемой предметной области — распознавание ТС объекта) при использовании получаемой информации и без ее использования соответственно.

Информационное состояние $R_{kj}^v \subset R_k$, полученное в результате проверки $\hat{\pi}_j \in \hat{\Pi}$, выполненной в ИС R_k , включает в свой состав в общем случае несколько предполагаемых ТС $S_i \in S$, в одном из которых может находиться объект анализа.

Для распознавания этих ТС необходима дополнительная информация, которая обладает некоторой ценностью. Эта информация может быть получена в результате выполнения последующих проверок.

Поскольку измеренные значения u_j диагностических признаков $\pi_j \in \Pi$ равномерно распределены по интервалам $\ell_{ij} \in L$, то можно предположить, что для ИС $R_{kj}^v \subset R_k$, состоящего из нескольких ТС S_i , вероятности этих ТС одинаковые.

Для различения ИС R_{kj}^v по числу входящих в них ТС S_i , введем обозначение $\left(R_{kj}^v\right)^{(\tau)}$, где τ — количество элементов, входящих в состав ИС R_{kj}^v .

Тогда в качестве вероятности P в формуле (4) можно использовать вероятность события, заключающегося в том, что техническим состоянием объекта является $S_i \in \left(R_{kj}^v\right)^{(\tau)}$. Обозначим эту вероятность через P_{kj}^i и будем вычислять ее по формуле:

$$P_{kj}^i = P\left(S_i \mid S_i \in \left(R_{kj}^v\right)^{(\tau)}\right) = \frac{1}{\tau}. \quad (5)$$

Если ИС R_{kj}^v состоит только из одного ТС $S_i \in S$, т.е. $R_{kj}^v = \left(R_{kj}^v\right)^{(1)} = R_i = \{S_i\}$, то цель процесса анализа (распознавание конкретного ТС объекта) считается достигнутой, и в соответствии с формулой (5) вероятность P_{kj}^i становится равной единице.

Целью функционирования ГПД является распознавание конкретного ТС $S_i \in S$, в котором находится анализируемый объект. Следовательно, в качестве вероятности p в формуле (4) можно использовать вероятность того, что техническим состоянием объекта является $S_i \in R_k$. Обозначим эту вероятность через $P_{kj}(S_i)$.

При использовании диагностических признаков в непрерывной форме представления эти вероятности неизвестны и их необходимо вычислять. Кроме того, эти вероятности будут различными в зависимости от того, какая из проверок $\hat{\pi}_j \in \hat{\Pi}$ будет выполнена в ИС R_k .

Как уже отмечалось, в конечное ИС $R_i = \{S_i\}$, $i = \overline{1, m}$, могут приходиться несколько ветвей $G_r \in U$ ГПД. Поэтому вероятность $P_{kj}(S_i)$ можно вычислить по формуле:

$$P_{kj}(S_i) = P\left(S_i \mid S_i \in R_{kj}\right) = \sum_{\substack{S_i \in \left(R_{kj}^v\right)^{(\tau)} \\ v=1, \omega_{kj}}} \frac{1}{\tau} P_k\left(\hat{\pi}_j^v\right). \quad (6)$$

Обозначим через $V_{kj}^v(S_i)$ ценность информации, которую необходимо получить для распознавания конкретного ТС $S_i \in R_{kj}^v$ и будем определять ее по формуле:

$$V_{kj}^v(S_i) = \frac{P_{kj}^i - P_{kj}(S_i)}{1 - P_{kj}(S_i)}. \quad (7)$$

Поскольку ИС $R_{kj}^v \subset R_k$ в общем случае состоит из нескольких ТС $S_i \in S$, то ценность информации, которая необходима для распознавания всех ТС $S_i \in R_{kj}^v$, определяется по формуле:

$$V_{kj}^v = \sum_{S_i \in R_{kj}^v} P_{kj}^i \cdot V_{kj}^v(S_i). \quad (8)$$

Если ИС R_{kj}^v является конечным, то вычисления по формулам (7) и (8) дают следующие результаты: $V_{kj}^v(S_i) = 1$; $V_{kj}^v = 1$.

Для вычисления ценности информации $V_k(\hat{\pi}_j)$, получаемой при выполнении проверки $\hat{\pi}_j \in \hat{\Pi}$ в ИС R_k , необходимо усреднить результаты, полученные при вычислениях по формуле (8), по вероятностям реализации исходов этой проверки, используя формулу:

$$V_k(\hat{\pi}_j) = \sum_{v=1}^{\omega_{kj}} P_k(\hat{\pi}_j^v) \cdot V_{kj}^v. \quad (9)$$

Следует также отметить, что для ИС R_k , состоящих только из двух ТС $S_i \in S$, любая проверка будет обладать максимальной ценностью, равной единице, поскольку в результате ее выполнения происходит гарантированное распознавание ТС, в котором находится объект, т.е. цель анализа достигается. Выбор наилучшей из допустимых проверок в таком случае осуществляется по другим критериям (максимальная информативность, минимальная стоимость и т.д.). Например, информативность проверки $\hat{\pi}_j \in \hat{\Pi}$, выполненной в ИС R_k , определяется по формуле:

$$I_k(\hat{\pi}_j) = \sum_{v=1}^{\omega_{kj}} P_k(\hat{\pi}_j^v) \left[-\log_2 P_k(\hat{\pi}_j^v) \right]. \quad (10)$$

На каждом шаге функционирования ГПД выбирается наилучший для проверки признак согласно условию:

$$\pi_j = \arg \max_{\pi_s \in \Pi_k} \{V_k(\hat{\pi}_s)\}, \quad (11)$$

где Π_k — подмножество допустимых для проверки признаков $\pi_j \in \Pi$, определяемое из условия (1).

Синтез ГПД заключается в выполнении ряда последовательных шагов.

Шаг 1.

1.1. В начальном ИС $R_k = S$ выполним проверку признака $\pi_j \in \Pi_k$ (в начальном ИС все проверки являются допустимыми). Согласно отображению (2) получим ряд новых ИС $R_{kj}^v, v = \overline{1, \omega_{kj}}$, а по формуле (3) определим вероятности $P_k(\hat{\pi}_j^v)$ исходов этой проверки.

1.2. По формуле (6) определим вероятности $P_{kj}(S_i)$ для каждого из ТС $S_i \in R_k$.

1.3. Для конечных исходов $R_{kj}^v = R_i = \{S_i\}$ положим:

$$P_{kj}^i = 1; V_{kj}^v(S_i) = 1; V_{kj}^v = 1. \quad (12)$$

1.4. Для неконечных ИС $R_{kj}^v \neq R_i$ по формуле (5) определим вероятности P_{kj}^i , по формуле (7) — значения $V_{kj}^v(S_i)$, а по формуле (8) — V_{kj}^v .

Шаг 2. По формуле (9) вычислим ценность $V_k(\hat{\pi}_j)$ проверки $\hat{\pi}_j$, выполненной в начальном состоянии $R_k = S$.

Шаг 3. Выполним операции, предусмотренные шагами 1 и 2 для оставшихся проверок, и получим для каждой из них значение показателя ценности $V_k(\hat{\pi}_j)$.

Шаг 4. По формуле (11) выберем для проверки в ИС $R_k = S$ признак, обладающий максимальной ценностью.

Шаг 5. Рассмотрим последовательно все неконечные ИС $R_{kj}^v, v = \overline{1, \omega_{kj}}$, полученные в результате выполнения проверки призна-

ка, выбранного на шаге 4. Согласно условию (1) определим для каждого из этих ИС подмножества Π_k допустимых для проверки признаков.

Шаг 6. Выполним для ИС, рассмотренных на шаге 5, операции, предусмотренные шагами 1, 2 и 3; для каждой из допустимых проверок получим значение показателя $V_k(\hat{\pi}_j)$ и выберем признак с максимальной ценностью.

Шаг 7. Описанную процедуру продолжим до получения всех конечных ИС $R_i = \{S_i\}, i = \overline{1, m}$.

В результате получим подмножества диагностических признаков $\Pi_i \in \Pi$, упорядоченные по очередности их проверки, для распознавания каждого из возможных ТС объекта, обладающих максимальной ценностью.

Пример. Пусть заданы множества $S = \{S_i \mid i = \overline{1, 5}\}$ технических состояний, в одном из которых может находиться объект, множество $\Pi = \{\pi_j \mid j = \overline{1, 5}\}$ диагностических признаков, а также множество $L = \{\ell_{ij} \mid i = \overline{1, 5}; j = \overline{1, 5}\}$ интервалов на вещественной числовой оси, характеризующих разброс измеренных значений признаков в различных ТС (табл. 1). Требуется построить гибкую программу диагностирования объекта, которая будет наилучшей в смысле выбранного критерия, т.е. на каждом шаге функционирования программы будет выбираться признак, обладающий наибольшей ценностью.

Таблица 1. Разброс значений признаков в различных технических состояниях объекта

ТС S_i	Признаки				
	π_1	π_2	π_3	π_4	π_5
S_1	(0,0; 0,4)	(0,2; 0,5)	(0,1; 0,3)	(0,0; 0,5)	(0,5; 1,0)
S_2	(0,2; 0,6)	(0,7; 1,0)	(0,3; 0,8)	(0,2; 0,6)	(0,0; 0,3)
S_3	(0,5; 0,8)	(0,0; 0,4)	(0,6; 1,0)	(0,4; 0,6)	(0,6; 0,8)
S_4	(0,6; 1,0)	(0,2; 0,7)	(0,4; 0,8)	(0,7; 1,0)	(0,3; 0,5)
S_5	(0,3; 0,5)	(0,6; 0,8)	(0,0; 0,3)	(0,5; 0,7)	(0,3; 0,7)

Рассмотрим начальное ИС $R_{1-5} = \{S_1, \dots, S_5\}$. В этом состоянии все проверки являются допустимыми. Проверка $\hat{\pi}_1$ согласно отображению (2) дает следующие исходы:

$$\hat{\pi}_1 : R_{1-5} \rightarrow \begin{cases} R_{1-5;1}^1 = \{S_1\} = R_1, \text{ если } y_1 \in (0, 0; 0, 2) = \Delta_{1-5;1}^1; \\ R_{1-5;1}^2 = \{S_1, S_2\} = R_{1,2}, \text{ если } y_1 \in (0, 2; 0, 3) = \Delta_{1-5;1}^2; \\ R_{1-5;1}^3 = \{S_1, S_2, S_5\} = R_{1,2,5}, \text{ если } y_1 \in (0, 3; 0, 4) = \Delta_{1-5;1}^3; \\ R_{1-5;1}^4 = \{S_2, S_5\} = R_{2,5}, \text{ если } y_1 \in (0, 4; 0, 5) = \Delta_{1-5;1}^4; \\ R_{1-5;1}^5 = \{S_2, S_3\} = R_{2,3}, \text{ если } y_1 \in (0, 5; 0, 6) = \Delta_{1-5;1}^5; \\ R_{1-5;1}^6 = \{S_3, S_4\} = R_{3,4}, \text{ если } y_1 \in (0, 6; 0, 8) = \Delta_{1-5;1}^6; \\ R_{1-5;1}^7 = \{S_4\} = R_4, \text{ если } y_1 \in (0, 8; 1, 0) = \Delta_{1-5;1}^7. \end{cases}$$

Для понимания введенных в примере обозначений поясним, например, что $R_{1-5;1}^4$ означает четвертый исход проверки $\hat{\pi}_1$, выполненной в начальном ИС, состоящем из ТС $\{S_1, \dots, S_5\}$.

Вероятности этих исходов определим по формуле (3):

$$|\nabla_{1-5;1}| = \left| \bigcup_{v=1}^7 \Delta_{1-5;1}^v \right| = 1, 0;$$

$$P_{1-5}(\hat{\pi}_1^v) = \frac{|\Delta_{1-5;1}^v|}{|\nabla_{1-5;1}|} = \begin{cases} \frac{0,2}{1,0} = 0,2, v = 1, 6, 7; \\ \frac{0,1}{1,0} = 0,1, v = \overline{2,5}. \end{cases};$$

Определим вероятности $P_{kj}(S_i)$, $i = \overline{1,5}$, ТС, в одном из которых может находиться анализируемый объект при выполнении проверки $\hat{\pi}_1$.

Например, ТС S_1 входит в состав ИС $R_{1-5;1}^1$, $R_{1-5;1}^2$ и $R_{1-5;1}^3$, причем ИС $R_{1-5;1}^1$ состоит только из одного элемента, т.е. $(R_{1-5;1}^1)^{(1)}$, ИС $R_{1-5;1}^2$ состоит из двух элементов, т.е. $(R_{1-5;1}^2)^{(2)}$, а ИС $R_{1-5;1}^3$ — из трех элементов, т.е. $(R_{1-5;1}^3)^{(3)}$.

Считая, что вероятности ТС, входящих в состав ИС $(R_{1-5;1}^2)^{(2)}$ и $(R_{1-5;1}^3)^{(3)}$, одинаковы, определим, используя формулу (6):

$$P_{1-5;1}(S_1) = P_{1-5}(\hat{\pi}_1^1) + \frac{1}{2}P_{1-5}(\hat{\pi}_1^2) + \frac{1}{3}P_{1-5}(\hat{\pi}_1^3) = 0,2 + \frac{1}{2} \cdot 0,1 + \frac{1}{3} \cdot 0,1 = \frac{17}{60}.$$

Для ТС S_2 имеем:

$$\begin{aligned} P_{1-5;1}(S_2) &= \frac{1}{2}P_{1-5}(\hat{\pi}_1^2) + \frac{1}{3}P_{1-5}(\hat{\pi}_1^3) + \frac{1}{2}P_{1-5}(\hat{\pi}_1^4) + \frac{1}{2}P_{1-5}(\hat{\pi}_1^5) = \\ &= \frac{1}{2} \cdot 0,1 + \frac{1}{3} \cdot 0,1 + \frac{1}{2} \cdot 0,1 + \frac{1}{2} \cdot 0,1 = \frac{11}{60}. \end{aligned}$$

Аналогичным образом вычислим:

$$P_{1-5;1}(S_3) = 0,15 ; P_{1-5;1}(S_4) = 0,3 ; P_{1-5;1}(S_5) = \frac{1}{12}.$$

Убедимся, что вычисленные вероятности составляют полную группу событий:

$$\sum_{i=1}^5 P_{1-5;1}(S_i) = \frac{17}{60} + \frac{11}{60} + 0,15 + 0,3 + \frac{1}{12} = 1.$$

Рассмотрим конечные исходы:

$$R_{1-5;1}^1 = R_1 = \{S_1\},$$

$$R_{1-5;1}^7 = R_4 = \{S_4\},$$

проверки $\hat{\pi}_1$, выполненной в начальном ИС:

$$R_{1-5} = \{S_1, \dots, S_5\}.$$

Для них, в соответствии с формулами (5), (7) и (8):

$$P_{1-5;1}^4 = 1 ; P_{1-5;1}^1 = 1 ; V_{1-5;1}^1(S_1) = \frac{P_{1-5;1}^1 - P_{1-5;1}(S_1)}{1 - P_{1-5;1}(S_1)} = \frac{1 - \frac{17}{60}}{1 - \frac{17}{60}} = 1 ;$$

$$V_{1-5;1}^7(S_4) = \frac{P_{1-5;1}^4 - P_{1-5;1}(S_4)}{1 - P_{1-5;1}(S_4)} = \frac{1 - 0,3}{1 - 0,3} = 1;$$

$$V_{1-5;1}^1 = P_{1-5;1}^1 \cdot V_{1-5;1}^1(S_1) = 1 \cdot 1 = 1;$$

$$V_{1-5;1}^7 = P_{1-5;1}^4 \cdot V_{1-5;1}^7(S_4) = 1 \cdot 1 = 1.$$

ИС $R_{1-5;1}^v$ ($v = 2, 4, 5, 6$) состоят из двух элементов.

Рассмотрим сначала ИС:

$$P_{1-5;1}^1 = 0,5; P_{1-5;1}^2 = 0,5.$$

Считая вероятности ТС S_1 и S_2 , входящих в ИС $R_{1,2}$, одинаковыми, определим:

$$P_{1-5;1}^1 = 0,5; P_{1-5;1}^2 = 0,5.$$

С учетом того, что $P_{1-5;1}(S_1) = \frac{17}{60}$, а $P_{1-5;1}(S_2) = \frac{11}{60}$, вычислим, используя формулу (7):

$$V_{1-5;1}^2(S_1) = \frac{P_{1-5;1}^1 - P_{1-5;1}(S_1)}{1 - P_{1-5;1}(S_1)} = \frac{0,5 - \frac{17}{60}}{1 - \frac{17}{60}} = \frac{13}{43};$$

$$V_{1-5;1}^2(S_2) = \frac{P_{1-5;1}^2 - P_{1-5;1}(S_2)}{1 - P_{1-5;1}(S_2)} = \frac{0,5 - \frac{11}{60}}{1 - \frac{11}{60}} = \frac{19}{49}.$$

По формуле (8) определим:

$$V_{1-5;1}^2 = P_{1-5;1}^1 \cdot V_{1-5;1}^2(S_1) + P_{1-5;1}^2 \cdot V_{1-5;1}^2(S_2) = 0,5 \cdot \frac{13}{43} + 0,5 \cdot \frac{19}{49} = 0,3451.$$

Выполним аналогичные вычисления для ИС $R_{1-5;1}^v$ ($v = 4, 5, 6$) и получим:

для ИС $R_{1-5;1}^4 = R_{2,5} = \{S_2, S_5\} — V_{1-5;1}^4 = 0,4211 ;$

для ИС $R_{1-5;1}^5 = R_{2,3} = \{S_2, S_3\} — V_{1-5;1}^5 = 0,5958 ;$

для ИС $R_{1-5;1}^6 = R_{3,4} = \{S_3, S_4\} — V_{1-5;1}^6 = 0,3487 .$

Рассмотрим теперь ИС $R_{1-5;1}^3 = R_{1,2,5} = \{S_1, S_2, S_5\}$, состоящее из трех элементов. Для него, в соответствии с формулой (5):

$$P_{1-5;1}^1 = \frac{1}{3}; P_{1-5;1}^2 = \frac{1}{3}; P_{1-5;1}^5 = \frac{1}{3}.$$

По формуле (7) вычислим:

$$V_{1-5;1}^3(S_1) = \frac{P_{1-5;1}^1 - P_{1-5;1}(S_1)}{1 - P_{1-5;1}(S_1)} = \frac{\frac{1}{3} - \frac{17}{60}}{1 - \frac{17}{60}} = \frac{3}{43};$$

$$V_{1-5;1}^3(S_2) = \frac{P_{1-5;1}^2 - P_{1-5;1}(S_2)}{1 - P_{1-5;1}(S_2)} = \frac{\frac{1}{3} - \frac{11}{60}}{1 - \frac{11}{60}} = \frac{9}{49};$$

$$V_{1-5;1}^3(S_5) = \frac{P_{1-5;1}^5 - P_{1-5;1}(S_5)}{1 - P_{1-5;1}(S_5)} = \frac{\frac{1}{3} - \frac{1}{12}}{1 - \frac{1}{12}} = \frac{3}{11}.$$

Используя формулу (8), определим:

$$\begin{aligned} V_{1-5;1}^3 &= P_{1-5;1}^1 \cdot V_{1-5;1}^3(S_1) + P_{1-5;1}^2 \cdot V_{1-5;1}^3(S_2) + P_{1-5;1}^5 \cdot V_{1-5;1}^3(S_5) = \\ &= \frac{1}{3} \cdot \frac{3}{43} + \frac{1}{3} \cdot \frac{9}{49} + \frac{1}{3} \cdot \frac{3}{11} = 0,1754 . \end{aligned}$$

Теперь определим ценность проверки $\hat{\pi}_1$, выполненной в начальном ИС $R_{1-5} = \{S_1, \dots, S_5\}$, используя формулу (9):

$$V_{1-5}(\hat{\pi}_1) = \sum_{v=1}^7 P_{1-5}(\hat{\pi}_1^v) \cdot V_{1-5;1}^v = 0,2 \cdot 1 + 0,1 \cdot 0,3451 + \\ + 0,1 \cdot 0,1754 + 0,1 \cdot 0,4211 + 0,1 \cdot 0,5958 + 0,2 \cdot 0,3487 + 0,2 \cdot 1 = 0,6235.$$

Для наглядности сведем полученные результаты в таблицу 2.

Таблица 2. Расчет ценности проверки $\hat{\pi}_1$

R_k	$\hat{\pi}_j$	R_{kj}^v	$P_k(\hat{\pi}_j^v)$	P_{kj}^i	$V_{kj}^v(S_i)$	V_{kj}^v	$V_k(\hat{\pi}_j)$
R_{1-5}	$\hat{\pi}_1$	$R_{1-5;1}^1 = \{S_1\} = R_1$	0,2	1	1	1	0,6235
		$R_{1-5;1}^2 = \{S_1, S_2\} = R_{1,2}$	0,1	1/2	13/43	0,3451	
				1/2	19/49		
		$R_{1-5;1}^3 = \{S_1, S_2, S_5\} = R_{1,2,5}$	0,1	1/3	3/43	0,1754	
				1/3	9/49		
				1/3	3/11		
		$R_{1-5;1}^4 = \{S_2, S_5\} = R_{2,5}$	0,1	1/2	19/49	0,4211	
$R_{1-5;1}^5 = \{S_2, S_3\} = R_{2,3}$	0,1	1/2	5/11	0,5958			
		1/2	21/51				
$R_{1-5;1}^6 = \{S_3, S_4\} = R_{3,4}$	0,2	1/2	7/17	0,3487			
		1/2	2/7				
$R_{1-5;1}^7 = \{S_4\} = R_4$	0,2	1	1	1			

$$P_{1-5;1}(S_1) = \frac{17}{60}; P_{1-5;1}(S_2) = \frac{11}{60}; P_{1-5;1}(S_3) = 0,15; P_{1-5;1}(S_4) = 0,3;$$

$$P_{1-5;1}(S_5) = \frac{1}{12}.$$

Выполним аналогичные вычисления для проверок $\hat{\pi}_j$ ($j = \overline{2,5}$) и определим их ценность. Результаты расчетов приведены в таблицах 3-6.

Таблица 3. Расчет ценности проверки $\hat{\pi}_2$

R_k	$\hat{\pi}_j$	R_{kj}^v	$P_k(\hat{\pi}_j^v)$	P_{kj}^i	$V_{kj}^v(S_i)$	V_{kj}^v	$V_k(\hat{\pi}_j)$
R_{1-5}	$\hat{\pi}_2$	$R_{1-5;2}^1 = \{S_3\} = R_3$	0,2	1	1	1	0,6313
		$R_{1-5;2}^2 = \{S_1, S_3, S_4\} = R_{1,3,4}$	0,2	1/3	13/53	0,1202	
				1/3	1/41		
				1/3	1/11		
		$R_{1-5;2}^3 = \{S_1, S_4\} = R_{1,4}$	0,1	1/2	23/53	0,3761	
1/2	7/22						

		$R_{1-5;2}^4 = \{S_4\} = R_4$	0,1	1	1	1	
		$R_{1-5;2}^5 = \{S_3, S_4\} = R_{3,4}$	0,1	1/2	11/41	0,2932	
				1/2	7/22		
		$R_{1-5;2}^6 = \{S_2, S_5\} = R_{2,5}$	0,1	1/2	1/3	0,4035	
				1/2	27/57		
		$R_{1-5;2}^7 = \{S_2\} = R_2$	0,2	1	1	1	

$$P_{1-5;2}(S_1) = \frac{7}{60}; P_{1-5;2}(S_2) = \frac{1}{4}; P_{1-5;2}(S_3) = \frac{19}{60}; P_{1-5;2}(S_4) = \frac{4}{15};$$

$$P_{1-5;2}(S_5) = 0,05.$$

Таблица 4. Расчет ценности проверки $\hat{\pi}_3$

R_k	$\hat{\pi}_j$	R_{kj}^v	$P_k(\hat{\pi}_j^v)$	P_{kj}^i	$V_{kj}^{n_i}(S_i)$	V_{kj}^v	$V_k(\hat{\pi}_j)$
R_{1-5}	$\hat{\pi}_3$	$R_{1-5;3}^1 = \{S_5\} = R_5$	0,1	1	1	1	0,6353
		$R_{1-5;3}^2 = \{S_1, S_5\} = R_{1,5}$	0,2	1/2	4/9	0,4097	
				1/2	3/8		
		$R_{1-5;3}^3 = \{S_2\} = R_2$	0,1	1	1	1	
		$R_{1-5;3}^4 = \{S_2, S_4\} = R_{2,4}$	0,2	1/2	7/11	0,5182	
				1/2	0,4		
$R_{1-5;3}^5 = \{S_2, S_3, S_4\} = R_{2,3,4}$	0,2	1/3	1/11	0,2485			
		1/3	1/11				
		$R_{1-5;3}^6 = \{S_3\} = R_3$	0,2	1/3	1/5		
			0,2	1	1	1	

$$P_{1-5;3}(S_1) = 0,1; P_{1-5;3}(S_2) = \frac{4}{15}; P_{1-5;3}(S_3) = \frac{4}{15}; P_{1-5;3}(S_4) = \frac{1}{6};$$

$$P_{1-5;3}(S_5) = 0,2.$$

Таблица 5. Расчет ценности проверки $\hat{\pi}_4$

R_k	$\hat{\pi}_j$	R_{kj}^v	$P_k(\hat{\pi}_j^v)$	P_{kj}^i	$V_{kj}^{n_i}(S_i)$	V_{kj}^v	$V_k(\hat{\pi}_j)$
R_{1-5}	$\hat{\pi}_4$	$R_{1-5;4}^1 = \{S_1\} = R_1$	0,2	1	1	1	0,7051
		$R_{1-5;4}^2 = \{S_1, S_2\} = R_{1,2}$	0,2	1/2	0,25	0,325	
				1/2	0,4		
		$R_{1-5;4}^3 = \{S_1, S_2, S_3\} = R_{1,2,3}$	0,1	1/3	0	0,1619	
		1/3	0,2				
			0,1	1/3	2/7		

	$R_{1-5;4}^4 = \{S_2, S_3, S_5\} = R_{2,3,5}$	0,1	1/3	0,2	0,2388
			1/3	2/7	
			1/3	3/13	
	$R_{1-5;4}^5 = \{S_5\} = R_5$	0,1	1	1	1
	$R_{1-5;4}^6 = \{S_4\} = R_4$	0,3	1	1	1

$$P_{1-5;4}(S_1) = \frac{1}{3}; P_{1-5;4}(S_2) = \frac{1}{6}; P_{1-5;4}(S_3) = \frac{1}{15};$$

$$P_{1-5;4}(S_4) = 0,3; P_{1-5;4}(S_5) = \frac{2}{15}.$$

Таблица 6. Расчет ценности проверки $\hat{\pi}_5$

R_k	$\hat{\pi}_j$	R_{kj}^v	$P_k(\hat{\pi}_j^v)$	P_{kj}^i	$V_{kj}^v(S_i)$	V_{kj}^v	$V_k(\hat{\pi}_j)$
R_{1-5}	$\hat{\pi}_5$	$R_{1-5;5}^1 = \{S_2\} = R_2$	0,3	1	1	1	0,6906
		$R_{1-5;5}^2 = \{S_4, S_5\} = R_{4,5}$	0,2	1/2	4/9	0,4161	
			1/2	19/49			
		$R_{1-5;5}^3 = \{S_1, S_5\} = R_{1,5}$	0,1	1/2	0,5	0,4439	
			1/2	19/49			
		$R_{1-5;5}^4 = \{S_1, S_3, S_5\} = R_{1,3,5}$	0,1	1/3	0	0,1521	
1/3	3/11						
		1/3	9/49				
$R_{1-5;5}^5 = \{S_1, S_3\} = R_{1,3}$	0,1	1/2	0,5	5/11	0,4773		
$R_{1-5;5}^6 = \{S_1\} = R_1$	0,2	1	1	1	1		

$$P_{1-5;5}(S_1) = \frac{1}{3}; P_{1-5;5}(S_2) = 0,3; P_{1-5;5}(S_3) = \frac{1}{12}; P_{1-5;5}(S_4) = 0,1;$$

$$P_{1-5;5}(S_5) = \frac{11}{60}.$$

По условию (11) для проверки в начальном ИС $R_{1-5} = \{S_1, \dots, S_5\}$ выберем признак π_4 , обладающий наибольшей ценностью.

Рассмотрим неконечные исходы проверки $\hat{\pi}_4$, выполненной в ИС R_{1-5} ($R_{1-5;4}^2 = \{S_1, S_2\} = R_{1,2}$; $R_{1-5;4}^3 = \{S_1, S_2, S_3\} = R_{1,2,3}$ и $R_{1-5;4}^4 = \{S_2, S_3, S_5\} = R_{2,3,5}$) и определим для каждого из них наиболее ценную проверку.

Поскольку ИС $R_{1-5;4}^2 = R_{1,2}$ состоит из двух элементов, то, как уже отмечалось, для него любая проверка из числа допустимых будет обладать максимальной ценностью, равной 1. В этом случае для выбора наилучшей проверки можно вычислить их информативность, используя формулу (10).

В соответствии с условием (1) для ИС $R_{1-5;4}^2 = R_{1,2}$ допустимыми проверками являются $\hat{\pi}_2$, $\hat{\pi}_3$ и $\hat{\pi}_5$.

Проверка $\hat{\pi}_2$ имеет следующие исходы:

$$\hat{\pi}_2 : R_{1,2} \rightarrow \begin{cases} R_{1,2;2}^1 = R_1 = \{S_1\}, \text{ если } y_2 \in (0,2; 0,5) = \Delta_{1,2;2}^1; \\ R_{1,2;2}^2 = R_2 = \{S_2\}, \text{ если } y_2 \in (0,7; 1,0) = \Delta_{1,2;2}^2. \end{cases}$$

Вероятности этих исходов:

$$|\nabla_{1,2;2}| = |(0,2; 0,5) \cup (0,7; 1,0)| = 0,6;$$

$$P_{1,2}(\hat{\pi}_2^1) = \frac{|\Delta_{1,2;2}^1|}{|\nabla_{1,2;2}|} = \frac{0,3}{0,6} = 0,5; P_{1,2}(\hat{\pi}_2^2) = \frac{|\Delta_{1,2;2}^2|}{|\nabla_{1,2;2}|} = \frac{0,3}{0,6} = 0,5.$$

По формуле (10) вычислим:

$$I_{1,2}(\hat{\pi}_2) = \sum_{v=1}^2 P_{1,2}(\hat{\pi}_2^v) [-\log_2 P_{1,2}(\hat{\pi}_2^v)] = 0,5 \cdot (-\log_2 0,5) + 0,5 \cdot (-\log_2 0,5) = 1.$$

Для проверок $\hat{\pi}_3$ и $\hat{\pi}_5$, проведя аналогичные вычисления, получим: $I_{1,2}(\hat{\pi}_3) = 0,869$; $I_{1,2}(\hat{\pi}_5) = 0,958$.

Очевидно, что для проверки в ИС $R_{1,2}$ следует выбрать признак π_2 .

Рассмотрим теперь ИС $R_{1-5;4}^3 = \{S_1, S_2, S_3\} = R_{1,2,3}$, для которого, в соответствии с условием (1), $\Pi_{1,2,3} = \{\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_5\}$. Результаты вычислений сведем в таблице 7.

По условию (11) в ИС $R_{1-5;4}^3 = \{S_1, S_2, S_3\} = R_{1,2,3}$ можно выбрать проверку $\hat{\pi}_2$ или $\hat{\pi}_3$. Из них проверка $\hat{\pi}_3$ обладает наибольшей информативностью. Эта проверка, выполненная в ИС $R_{1,2,3}$, имеет только

один неконечный исход, а именно ИС $R_{2,3} = \{S_2, S_3\}$, для которого $\Pi_{2,3} = \{\pi_2, \pi_5\}$. Признак π_2 , как обладающий наибольшей информативностью, выберем для проверки в ИС $R_{2,3}$.

Таблица 7. Результаты вычислений для ИС R_{1-3}

R_k	$\hat{\pi}_j$	R_{kj}^v	$P_k(\hat{\pi}_j^v)$	P_{kj}^i	$V_{kj}^v(S_i)$	V_{kj}^v	$V_k(\hat{\pi}_j)$	$P_{kj}(S_i)$	
R_{1-3}	$\hat{\pi}_1$	$R_{1-3;1}^1 = R_1$	0,25	1	1	1	0,7182	$P_{1-3;1}(S_1) = \frac{3}{8}$	
		$R_{1-3;1}^2 = R_{1,2}$	0,25	1/2	0,2	3/11			0,2364
		$R_{1-3;1}^3 = R_2$	0,125	1	1	1		$P_{1-3;1}(S_2) = \frac{5}{16}$	
		$R_{1-3;1}^4 = R_{2,3}$	0,125	1/2	3/11	3/11			0,2727
		$R_{1-3;1}^5 = R_3$	0,25	1	1	1			$P_{1-3;1}(S_3) = \frac{5}{16}$
	$\hat{\pi}_2$	$R_{1-3;2}^1 = R_3$	0,25	1	1	1	0,8167	$P_{1-3;2}(S_1) = 0,25$	
		$R_{1-3;2}^2 = R_{1,3}$	0,25	1/2	0,333	0,2		0,2667	$P_{1-3;2}(S_2) = 0,375$
		$R_{1-3;2}^3 = R_1$	0,125	1	1	1		$P_{1-3;2}(S_3) = 0,375$	
		$R_{1-3;2}^4 = R_2$	0,375	1	1	1			
	$\hat{\pi}_3$	$R_{1-3;3}^1 = R_1$	2/9	1	1	1	0,8167	$P_{1-3;3}(S_1) = \frac{2}{9}$	
		$R_{1-3;3}^2 = R_2$	1/3	1	1	1			
		$R_{1-3;3}^3 = R_{2,3}$	2/9	1/2	0,1	0,25		0,175	$P_{1-3;3}(S_2) = \frac{4}{9}$
		$R_{1-3;3}^4 = R_3$	2/9	1	1	1		$P_{1-3;3}(S_3) = \frac{1}{3}$	
	$\hat{\pi}_5$	$R_{1-3;5}^1 = R_2$	0,375	1	1	1	0,8036	$P_{1-3;5}(S_1) = 0,5$	
		$R_{1-3;5}^2 = R_1$	0,125	1	1	1			
		$R_{1-3;5}^3 = R_{1,3}$	0,25	1/2	0	3/7		0,2143	$P_{1-3;5}(S_2) = 0,375$

		$R_{1-3;5}^4 = R_1$	0,25	1	1	1		$P_{1-35}(S_3)=0,125$
--	--	---------------------	------	---	---	---	--	-----------------------

Выполним аналогичные вычисления для ИС $R_{1-5;4}^4 = R_{2,3,5} = \{S_2, S_3, S_5\}$, имеющего множество допустимых признаков $\Pi_{2,3,5} = \{\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_5\}$. Результаты вычислений сведем в таблице 8.

Таблица 8. Результаты вычислений для ИС $R_{2,3,5}$

R_k	$\hat{\pi}_j$	R_{kj}^v	$P_k(\hat{\pi}_j^v)$	P_{kj}^i	$V_{kj}^v(S_i)$	V_{kj}^v	$V_k(\hat{\pi}_j)$	$P_{kj}(S_i)$
$R_{2,3,5}$	$\hat{\pi}_1$	$R_{2,3,5;1}^1 = R_2$	1/6	1	1	1	0,6143	$P_{2,3,5,1}(S_2) = \frac{5}{12}$
		$R_{2,3,5;1}^2 = R_{2,5}$	1/3	1/2	1/7	0,2714		
			1/2	0,4				
		$R_{2,3,5;1}^3 = R_{2,3}$	1/6	1/2	1/7	0,1429		
	1/2			1/7				
	$R_{2,3,5;1}^4 = R_3$	1/3	1	1	1	$P_{2,3,5,1}(S_5) = \frac{1}{6}$		
	$\hat{\pi}_2$	$R_{2,3,5;2}^1 = R_3$	0,5	1	1	1	0,9161	$P_{2,3,5,2}(S_2) = \frac{5}{16}$
		$R_{2,3,5;2}^2 = R_5$	0,125	1	1	1		$P_{2,3,5,2}(S_3) = \frac{1}{2}$
		$R_{2,3,5;2}^3 = R_{2,5}$	0,125	1/2	3/11	0,3287		
				1/2	5/13			
	$R_{2,3,5;2}^4 = R_2$	0,25	1	1	1	$P_{2,3,5,2}(S_5) = \frac{3}{16}$		
	$\hat{\pi}_3$	$R_{2,3,5;3}^1 = R_5$	0,3	1	1	1	0,8452	$P_{2,3,5,3}(S_2) = \frac{2}{5}$
		$R_{2,3,5;3}^2 = R_2$	0,3	1	1	1		
		$R_{2,3,5;3}^3 = R_{2,3}$	0,2	1/2	1/6	0,2262		
				1/2	2/7			
	$R_{2,3,5;3}^4 = R_3$	0,2	1	1	1	$P_{2,3,5,3}(S_5) = 0,3$		
$\hat{\pi}_5$	$R_{2,3,5;5}^1 = R_2$	0,375	1	1	1	0,906	$P_{2,3,5,5}(S_2) = 0,375$	
	$R_{2,3,5;5}^2 = R_5$	0,375	1	1	1			

	$R_{2,3,5}^3 = R_{3,5}$	0,125	1/2	5/13	0,2479	$P_{2,3,5}(S_3) = \frac{3}{16}$
			1/2	1/9		
	$R_{2,3,5}^4 = R_3$	0,125	1	1	1	$P_{2,3,5}(S_5) = \frac{7}{16}$

По условию (11) для проверки в ИС $R_{2,3,5}$ выберем признак π_2 .

Единственным неконечным исходом проверки $\hat{\pi}_2$, выполненной в этом ИС, является $R_{2,5}$, для которого $\Pi_{2,5} = \{\pi_3, \pi_5\}$. Поскольку ценность этих признаков одинакова, то для проверки выберем π_3 , обладающий большей информативностью.

3. Заключение. Таким образом, наиболее ценные для проверки признаки определены. По полученным результатам построим ГПД, представленную на рисунке 1.

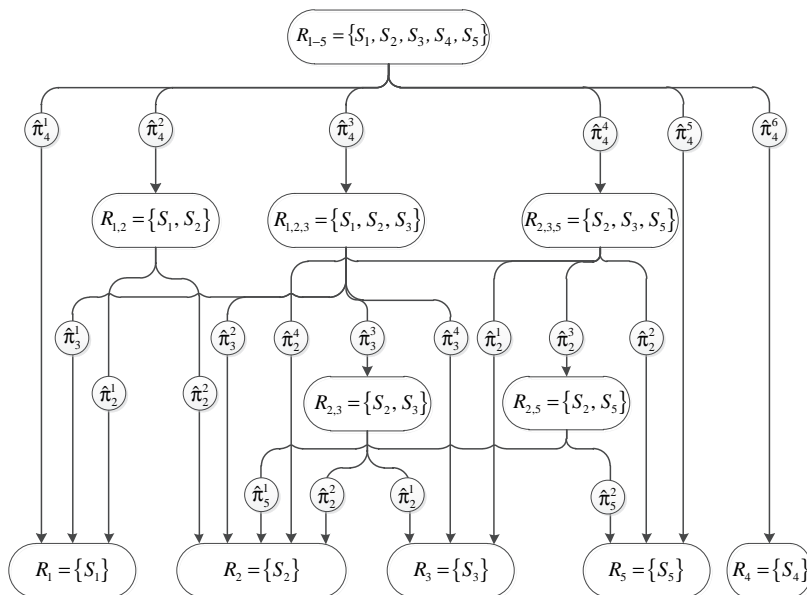


Рис. 1. Гибкая программа диагностирования объекта по показателю ценности информации

Упорядоченные подмножества Π_r ($r = \overline{1, 15}$), каждое из которых обеспечивает распознавание i -го ТС объекта, приведены в таблице 9.

Построенная ГПД получилась такой же, как и программа, построенная по аналогичным исходным данным (см. работы [3, 4]) методом динамического программирования по критерию максимума полезности получаемой информации. При этом вычислительные затраты на синтез ГПД, приведенной на рисунке 1, существенно ниже, поскольку отсутствует необходимость создания и обработки массива всех возможных ИС процесса анализа ТС объекта. Следовательно, предложенный показатель ценности информации может быть применен для синтеза гибких программ диагностирования сложных технических объектов.

Таблица 9. Упорядоченные подмножества признаков для распознавания технического состояния

		ТС S_1				
		S_1	S_2	S_3	S_4	S_5
П _r	$\Pi_1 = \{\pi_4\}$	$\Pi_4 = \{\pi_4, \pi_2\}$	$\Pi_9 = \{\pi_4, \pi_3, \pi_2\}$	$\Pi_{15} = \{\pi_4\}$	$\Pi_{12} = \{\pi_4, \pi_2, \pi_5\}$	
	$\Pi_2 = \{\pi_4, \pi_3\}$	$\Pi_5 = \{\pi_4, \pi_3\}$	$\Pi_{10} = \{\pi_4, \pi_3\}$		$\Pi_{13} = \{\pi_4, \pi_2\}$	
	$\Pi_3 = \{\pi_4, \pi_2\}$	$\Pi_6 = \{\pi_4, \pi_2, \pi_5\}$	$\Pi_{11} = \{\pi_4, \pi_2\}$		$\Pi_{14} = \{\pi_4\}$	
		$\Pi_7 = \{\pi_4, \pi_2\}$				
		$\Pi_8 = \{\pi_4, \pi_3, \pi_2\}$				

В заключение отметим, что с помощью разработанного алгоритма может быть синтезирована процедура определения как работоспособных ТС сложных военно-технических систем в различные моменты времени, так и неработоспособных состояний, обусловленных различными дефектами ее элементов. При этом выбор минимально необходимого числа диагностических признаков (минимального необходимого числа проверок), обладающих наибольшей ценностью, позволяет значительно сократить объем обрабатываемой информации об объекте, уменьшить число измерительных систем, упростить и удешевить процедуру распознавания ТС, в том числе и отказов.

В целом, синтезированная программа дает близкое к оптимальному решение о ТС сложных военно-технических систем и обеспечивает заданное качество диагностирования при сравнительно небольших затратах. Снижение затрат достигается использованием более простых и более экономичных в вычислительном отношении процедур, не требующих предварительного определения и хранения в памяти ЭВМ значительного числа информационных состояний объекта, что представляет несомненный практический интерес.

Кроме того, предложенный подход позволяет провести сравнительный анализ значимости телеметрируемых параметров и оценить объективно вклад каждого из них в решение задачи контроля систем и установления фактического режима функционирования аппаратуры. Это, несомненно, повысит эффективность своевременного принятия мер по устранению отказов и восстановлению работоспособности сложных военно-технических систем с использованием имеющегося резерва.

Литература

1. Харкевич А. А. О ценности информации // Проблемы кибернетики. М.: Физматгиз. 1960. Вып. 4. С. 53–72.
2. Шанкин Г.П. Ценность информации. Вопросы теории и приложений // М.: Филоматис. 2004. 128 с.
3. Дмитриев А.К., Копкин Е.В. Построение информационно-поисковой системы по критерию максимума полезности получаемой информации // Авиакосмическое приборостроение. 2003. № 6. С. 46–51.
4. Мышко В.В., Кравцов А.Н., Копкин Е.В., Чукуров В.А. Теоретические основы и методы оптимизации анализа технического состояния сложных систем: монография // СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского. 2013. 303 с.
5. Корогодин В.И., Корогодина В.Л. Информация как основа жизни // Дубна: Издательский центр «Феникс». 2000. 208 с.

References

1. Harkevich A.A. [About the value of information]. *Problemy kibernetiki – Problems of Cybernetics*. M. Fizmatgiz.1960. vol. 4. pp. 53–72. (In Russ.).
2. Shankin G.P. *Cennost' informacii. Voprosy teorii i prilozhenij* [The value of information. Theory and applications]. M. Filomatis. 2004. 128 p. (In Russ.).
3. Dmitriev A.K., Kopkin E.V. [Building an information retrieval system according to the criterion of maximum usefulness of the received information]. *Aviakosmicheskoe priborostroenie – Aerospace instrument making*. 2003. vol. 6. pp. 46-51. (In Russ.).
4. Myshko V.V., Kravcov A.N., Kopkin E.V., Chikurov V.A. *Teoreticheskie osnovy i metody optimizacii analiza tehniceskogo sostojaniya slozhnyh sistem* [Theoretical bases and methods of analysis of the technical state of complex systems]. Monografiya.SPb.:GCA name AF Mozhaysky. 2013. 303 p. (In Russ.).
5. Korogodin V.I., Korogodina V.L. *Informacija kak osnova zhizni* [Information as the basis of life]. Dubna -Izdatel'skij centr «Feniks».2000. 208 p. (In Russ.).

Копкин Евгений Вениаминович — д-р техн. наук, старший преподаватель кафедры технологий и средств комплексной обработки и передачи информации в АСУ, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского. Область научных интересов: автоматизированная обработка и анализ информации космических средств. Число научных публикаций — 42. kopkins@mail.ru; ул. Ждановская 13, Санкт-Петербург, 197198; р.т.: +79219611338.

Kopkin Evgeniy Veniaminovich — Ph.D., Dr. Sci., senior lecturer of technologies and tools of complex information processing and transmission in automated control systems department, Mozhaisky Military Space Academy. Research interests: automated processing and analysis of space vehicles. The number of publications — 42. kopkins@mail.ru; 13, Zdanovskaya str., St.Peterburg, 197082, Russia; office phone: +79219611338.

Чикуров Виталий Александрович — к-т техн. наук, доцент, начальник кафедры технологий и средств комплексной обработки и передачи информации в АСУ, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского. Область научных интересов: автоматизированная обработка и анализ информации КС. Число научных публикаций — 27. chikurov69@bk.ru; ул. Ждановская 13, Санкт-Петербург, 197198; р.т.: +79119822630.

Chikurov Vitaliy Aleksandrovich — Ph.D., assistant professor, head of technologies and tools of complex information processing and transmission in automated control systems department, Mozhaisky Military Space Academy. Research interests: automated processing and analysis of space vehicles. The number of publications — 27. chikurov69@bk.ru; 13, Zhdanovskaya street, St.-Petersburg, 197198, Russia; office phone: +79119822630.

Алейник Виталий Валерьевич — к-т воен. наук, доцент, начальник факультета автоматизированных систем управления, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского. Область научных интересов: автоматизированная обработка и анализ информации космических средств. Число научных публикаций — 19. vital-krym@mail.ru; ул. Ждановская 13, Санкт-Петербург, 197198; р.т.: +79112962167.

Aleynik Vitaliy Valerevich — Ph.D., head of automated control systems faculty, Mozhaisky Military Space Academy. Research interests: automated processing and analysis of space vehicles. The number of publications — 19. vital-krym@mail.ru; 13, Zhdanovskaya street, St.-Petersburg, 197198, Russia; office phone: +79112962167.

Лазутин Олег Григорьевич — соискатель кафедры технологий и средств комплексной обработки и передачи информации в АСУ, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского. Область научных интересов: автоматизированная обработка и анализ информации космических средств. Число научных публикаций — 15. vutal-krym@mail.ru; ул. Ждановская 13, Санкт-Петербург, 197198; р.т.: +79104046181.

Lazutin Oleg Grigorevich — Ph.D. student of technologies and tools of complex information processing and transmission in automated control systems department, Mozhaisky Military Space Academy. Research interests: automated processing and analysis of space vehicles. The number of publications — 15. vutal-krym@mail.ru; 13, Zhdanovskaya street, St.-Petersburg, 197198, Russia; office phone: +79104046181.

РЕФЕРАТ

Копкин Е.В., Чикуров В.А., Алейник В.В., Лазутин О.Г. **Алгоритм построения гибкой программы диагностирования технического объекта по критерию ценности получаемой информации.**

В статье предложено решение задачи построения гибкой программы диагностирования объекта по критерию ценности информации, получаемой в процессе определения технического состояния.

Под гибкой программой диагностирования понимается процедура, при которой выбор каждой последующей проверки зависит от результата предыдущей. В результате происходит сокращение общего числа проверяемых диагностических признаков.

При построении гибкой программой диагностирования для автоматизированного анализа состояний объектов наблюдения (в частности, их технического состояния) существенное значение имеет не только количество получаемой информации, но даже в большей степени ее ценность (полезность).

Для выбора наиболее ценных проверок (в смысле определения технического состояния) используется мера ценности информации, предложенная В.И. Корогодиным, которая, в отличие от меры А.А.Харкевича, изменяется от 0 до 1. Для некоторых приложений теории анализа технического состояния такой подход может представлять практический интерес.

К настоящему времени публикации, связанные с построением программ диагностирования по указанному показателю, отсутствуют. Поэтому разработка алгоритмов построения гибкой программы диагностирования по критерию ценности получаемой информации является актуальной и практически важной задачей.

SUMMARY

Kopkin E.V., Chikurov V.A., Aleynik V.V., Lazutin O.G. **Algorithm for Constructing a Flexible Program for Technical Object Diagnosing on the Criterion of Received Information Value.**

The article offers a solution to the problem of creating a flexible program for object diagnosing on the criterion of information value, received in the process of determination of technical condition.

A flexible program of diagnosis is understood as a procedure, in which the choice of each following check depends on the result of the preceding one. This results in a reduction in the overall number of checked diagnostic signs.

When constructing a flexible program of diagnosing for automated analysis of conditions of the objects observed (in particular, their technical condition), not only is the amount of the received information important, but also, even in a greater degree, the value of the received information.

For the choice of the most valuable checks (in the sense of determination of technical condition), we use a measure of the value of received information, offered by V.I. Korogodin, which, unlike the measure of A.A. Harkevich, ranges from 0 to 1. For some applications of the theory of the analysis of technical condition, this approach may be of practical interest.

Currently, publications, connected with the creation of a program of diagnosing on the specified factor, are absent. Therefore, development of algorithms of creating flexible program of diagnosing on the criterion of the received information value is a relevant and practically important task.

Д.Н. БИРЮКОВ
**АССОЦИАТИВНО-РЕФЛЕКТОРНАЯ ПАМЯТЬ
КИБЕРСИСТЕМЫ ДЛЯ СИНТЕЗА УПРЕЖДАЮЩИХ
РЕАКЦИЙ, НЕЙТРАЛИЗУЮЩИХ ВРЕДНОСНЫЕ
ВОЗДЕЙСТВИЯ**

Бирюков Д.Н. Ассоциативно-рефлекторная память киберсистемы для синтеза упреждающих реакций, нейтрализующих вредоносные воздействия.

Аннотация. В статье предлагается подход к построению и применению ассоциативно-рефлекторной памяти киберсистемы, способной формировать сценарии упреждающего поведения на уровне условных рефлексов.

Ключевые слова: киберсистема, иерархическая временная память, упреждение, условный рефлекс.

Biryukov D.N. **Associative-Reflex Memory of Cybersystem for Synthesis of the Anticipatory Reactions Neutralizing Harmful Influences.**

Abstract. The article shows the approach to construction and use of associative-reflex memory of the cybersystem capable to form scenarios of anticipatory behavior at the level of conditioned reflexes.

Keywords: cybersystem, Hierarchical Temporal Memory, anticipation, conditioned reflex.

1. Введение. В настоящее время пока не разработано единой модели памяти человека, но попытки смоделировать частные аспекты ее функционирования осуществляются все чаще. Так, например, заслуживает внимания частная модель мозга, разработанная Джеффом Хокинсом и Дилипом Джоржом (Numenta, Inc.), которая моделирует некоторые структурные и алгоритмические свойства неокортекса и называется «Иерархическая Временная Память» (Hierarchical Temporal Memory – НТМ) [1]. Неокортекс составляет у человека основную часть коры головного мозга и отвечает за сенсорное восприятие, выполнение моторных команд, осознанное мышление и речь.

НТМ – это система памяти, которая, по заявлению создателей [1], не программируется и не учится алгоритмическому выполнению задач, а «учится» решать проблему в зависимости от данных, подаваемых на сенсоры. Как видится, данная способность системы может быть весьма полезной при организации механизмов формирования условных рефлексов у киберсистемы предотвращения атакующих воздействий на защищаемые информационно-технические ресурсы.

2. Основные положения модели НТМ. Все области коры мозга выглядят похожими друг на друга по своему внутреннему строению, но весьма сильно варьируются по своему размеру и по своему месту в иерархии. Если взять их срез высотой в два миллиметра, то можно обнаружить шесть слоев - пять слоев клеток и один без них (из этого правила есть несколько исключений, но в общем оно соблюдается).

Каждый из нейронных уровней областей коры мозга имеет множество взаимосвязанных клеток, организованных в колонки. Также и регионы НТМ представляют собой слои сильно взаимосвязанных клеток, также организованных в колонки.

Хотя нейроны в коре мозга очень плотно связаны между собой, многочисленные подавляющие нейроны гарантируют, что одновременно будет активен только небольшой процент всех нейронов. То есть, получается, что информация представляется в мозге всегда только небольшим количеством активных нейронов из всех имеющихся. Такой тип кодирования информации называется «разреженное распределенное представление» [1].

Далее предлагается более подробно остановиться на принципах функционирования НТМ.

Первое и наиболее важное – это обучение. Регион НТМ изучает «Внешний Мир» (ВМ) путем нахождения паттернов и их последовательностей во входном потоке данных. Регион, сам по себе, «не знает», что собой представляют эти данные, он работает на статистических принципах, определяя комбинации входных битов, которые часто появляются вместе, и которые называются пространственными паттернами. Потом регион ищет, как эти паттерны образуют последовательности во времени, что называют временными паттернами или просто последовательностями [1]. НТМ способна к непрерывному обучению во время работы. Поэтому нет необходимости в отделении фазы распознавания от фазы обучения, хотя распознавание заметно улучшается при дополнительном обучении.

После того как НТМ выучила паттерны из изучаемой предметной области, она может проводить распознавание новых входных данных. При получении очередного входа НТМ будет сопоставлять его выученным ранее пространственным и временным паттернам.

Важным в распознавании, осуществляемым НТМ, является то, что НТМ позволяет распознавать входные данные, несколько отличающиеся друг от друга, это становится возможным как раз из-за использования разреженных пространственных представлений входных данных в НТМ, что приводит к достаточности сопоставления только некоторой части паттерна, чтобы быть уверенным в существовании всего совпадения.

Каждый регион НТМ хранит в себе последовательности паттернов. Путем их сопоставления с текущими входными данными, регион формирует предсказание насчет своего вероятного следующего входа. Регионы НТМ хранят в себе переходы между распределенными пространственными представлениями. При этом регион НТМ делает раз-

личные предсказания, основываясь на контексте, который в свою очередь может охватывать множество событий и явлений.

Еще одним положительным эффектом работы НТМ на этапе предсказания является то, что когда НТМ предсказывает, что будет дальше, это предсказание может повлиять на распознавание всей системой того, что было предсказано. Т.е., система в состоянии заполнить пропущенные или искаженные данные, поступающие от сенсоров, так как система находится в состоянии ожидания определенных данных и по контексту зачастую может восполнить пропущенные или искаженные данные.

Всю работу НТМ можно разделить на следующие три основных шага: (1) формирование в регионе НТМ пространственного распределенного представления входных данных; (2) формирование представления входных данных в контексте предыдущих входов; (3) формирование предсказания региона НТМ на основе текущего входа в контексте предыдущих входов.

Далее предлагается рассмотреть каждый из этих шагов более подробно.

1) Формирование пространственно распределенного представления входа. Первым делом регион НТМ конвертирует свой вход в пространственное разреженное представление. Регион НТМ логически состоит из множества *колонок*. Каждая колонка состоит из одной или более клеток (аналогов биологических нейронов). Совокупность колонок региона можно представлять в виде некоторого двухмерного массива. Каждая колонка в регионе воспринимает свою уникальную область входных битов (обычно они перекрываются между собой, но никогда полностью не совпадают для двух разных колонок). В результате, различные паттерны на входе региона приводят к активации различных колонок региона. При этом колонки с более высоким уровнем активации подавляют (ингибируют) близлежащие колонки с меньшим уровнем активации в определенном (изменяемом) радиусе.

Процесс подавления можно пояснить на простом примере. Например, человек ожидает наступления определенного события, но ожидаемое событие может принадлежать одному из альтернативных классов. В этом случае целый ряд клеток находится в состоянии предсказания. С наступлением конкретного события, активными становятся только часть клеток, совпавших с предсказываемым событием, а остальная часть клеток деактивируется.

Распределенное представление текущих входных сигналов кодируется тем, какие колонки являются активными, а какие нет, после

описанной деактивации. На рисунке 1 показана часть региона с примером представления пространственно распределенного входа.

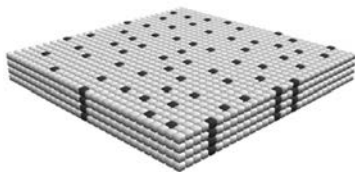


Рис. 1. Часть региона НТМ после активации колонок пространственно распределенным входом

2) *Формирование представления входа в контексте предыдущих входов.* Следующая функция, которую выполняет регион НТМ, конвертирует описанное колончатое представление текущего состояния входа региона в новое представление, которое включает в себя состояния региона из прошлого (или контекст). Это новое представление формируется путем активации только некоторого подмножества клеток из каждой колонки, при этом, обычно, это будет только одна клетка из всей колонки.

Каждая колонка в регионе НТМ состоит из нескольких клеток. И каждая из клеток может быть активной или пассивной. Выбирая различные активные клетки в каждой активной колонке, возможно по-разному представить один и тот же вход региона в различных контекстах.

Когда колонка становится активной, она активирует в себе все клетки, если данный вход был для нее неожиданным (не предсказанным в ней самой заранее). Но если некоторые из клеток колонки уже находились в состоянии предсказания (см. рисунок 2), то активными будут только они, а остальные – нет.

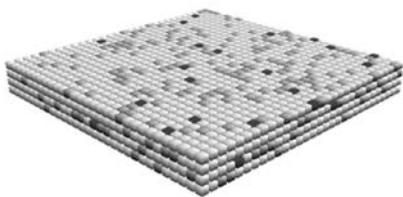


Рис. 2. Регион НТМ, отражающий память с контекстом, и находящийся в режиме ожидания (предсказания)

Путем активации некоторого подмножества клеток в каждой активной колонке, регион НТМ может отобразить (представить) один и

тот же вход в различных контекстах. Все колонки активируют в себе только предсказывающие клетки. Колонки без таких клеток активируют все свои клетки. На рисунке 3 показано несколько колонок с одной активной клеткой и колонка со всеми активными клетками.

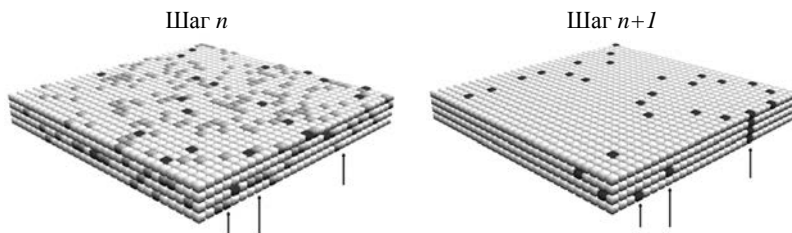


Рис.3. Пример активации нейронов

Если клетка активна благодаря прямому воздействию на нее входных сигналов, то ее называют «активной». Если же клетка стала активна благодаря своим латеральным связям с соседними клетками, то она находится в состоянии «предсказания».

3) *Формирование предсказания на основе входа и контекста предыдущих входов.* Финальным шагом алгоритма для региона является выработка предсказания того, что должно произойти далее. Это предсказание вырабатывается на основе представления, сформированного на шаге 2, которое включает в себя и контекст от предыдущих входов. Когда регион создает такое предсказание, он активирует все клетки, которые вероятно станут активными благодаря последующему прямому воздействию (в одно и то же время может быть сделано несколько предсказаний).

Когда входной паттерн изменяется с течением времени, различные наборы колонок и клеток становятся последовательно активными. А когда любая клетка становится активной, то она формирует соединения с подмножеством клеток, которые были активны непосредственно до этого. После этого, все, что нужно сделать клетке, это отследить по этим сформированным связям совпадающую во времени активность. Если эти соединения вдруг стали активны, то клетка может предположить, что она тоже вскоре может стать активной (как это уже было ранее), и она переходит в состояние предчувствия своей активации. В любой момент времени некоторые клетки региона НТМ будут активны благодаря прямому воздействию входных сигналов (показаны темно-серым цветом на рисунке 2). При этом другие клетки, получающие латеральные воздействия от активных клеток, будут переходить в состоянии предсказания (показаны светло-серым цветом). Ито-

говым выходом всего региона является активность всех его клеток (как из-за прямых воздействий, так и из-за латеральных).

3. Модель представления данных в ассоциативно-рефлекторной памяти проектируемой киберсистемы с учетом наблюдаемых контекстов. Для хранения данных в рамках ассоциативно-рефлекторной памяти [2] и работы с ними, предлагается использовать некоторые положения, представленные в модели НТМ [1].

В основе работы НТМ заложена идея использования совокупности определенным образом организованных нейронов. Именно система нейронов участвует в процессе восприятия данных, поступающих из «Внешнего Мира» (ВМ), накоплении этих данных, их обработки и порождения ответных реакций.

Окружающий познающую систему «Внешний Мир» состоит из процессов. Каждый процесс состоит из совокупности событий (событие – то, что происходит в некоторый момент времени и рассматривается как изменение состояния мира). Отдельное событие может быть распознано по одному, а чаще по ряду обнаруженных и измеренных свойств события. Для измерения свойств наблюдаемых событий применяются сенсоры. Чем более разнообразны и точны сенсоры, тем более точно можно регистрировать наблюдаемые события, а следовательно, в дальнейшем, и более точно их распознавать.

Для дальнейшего изложения следует определить, что совокупность сенсоров функционирует дискретно и позволяет строить последовательность «кадров» наблюдаемого «Внешнего Мира» (далее – Сенсорные Кадры (СК)). Для хранения СК и работы с ними, предлагается использовать модифицированную модель НТМ.

Последовательность СК, формируемых на выходе сенсоров, необходимо хранить, чтобы сформировать и развивать сенсорную память. Следует заметить, что СК может формироваться сенсорами различных типов, т.е. в одном СК могут быть отражены сразу несколько свойств наблюдаемого события. Это приводит к тому, что формируемый СК представляет собой совокупность взаимосвязанных (ассоциируемых) концептов.

Важным элементом для работы сенсоров в связке с памятью является время, так как время играет критически важную роль в обучении, распознавании и предсказании. Чтобы проектируемая система могла обучаться (накапливать опыт о наблюдаемых событиях), ей нужно подавать переменный во времени поток данных – меняющиеся СК. Запоминание и распознавание последовательностей СК является основой для выработки предсказаний на уровне функционирования ассоциативно-рефлекторной памяти. После того как система (память)

выучит какие паттерны скорее всего следуют за какими, она сможет предсказывать появление следующих паттернов на основе предыдущих и текущих входных данных.

Основным, на что хотелось бы обратить внимание при моделировании ассоциативно-рефлекторной памяти (АРП) является то, что именно АРП должна позволять формировать условные рефлексы (УР). В основе формирования УР должно лежать обучение. Система с реализованной в ней АРП должна быть способной изучать «Внешний Мир» (ВМ) путем нахождения паттернов и их последовательностей во входном потоке данных. Очевидно, что система не всегда способна интерпретировать (семантически осмыслить) поступающие данные, что, однако, не должно мешать ей запоминать последовательности СК во времени. Подобно биологическим системам, проектируемая интеллектуальная система должна быть способной к обучению «на лету», то есть к непрерывному обучению в ходе регистрации каждого СК.

Таким образом, память системы должна хранить в себе последовательности паттернов. И путем их сопоставления с текущими входными данными, АРП должна формировать предсказание насчет вероятного следующего входа. На самом деле система должна хранить в себе переходы между распределенными пространственными представлениями входных данных, поскольку СК, как было указано выше, представляет собой совокупность взаимосвязанных концептов (каждый из которых также может быть представлен пространственно распределенным паттерном). В некоторых случаях эти переходы могут выглядеть как линейные последовательности, но в общем случае, в один момент времени, может быть предсказано много вероятных последующих входов. При этом система должна делать различные предсказания, основываясь на текущем контексте событий, который может простираться далеко в прошлое. Основная часть АРП должна отводиться именно хранению переходов между пространственными паттернами, которые (переходы) можно интерпретировать как «далее следует».

Пусть $SK(\tau_i)$ – данные, поступающие на вход системы через систему сенсоров в момент времени τ_i . При этом τ_i – относительное время регистрации Сенсорного Кадра (время задает порядок следования СК через параметр i).

$X(\tau_i) = \langle x_1(\tau_i), x_2(\tau_i), \dots, x_n(\tau_i) \rangle$ – паттерн СК, зарегистрированного от системы сенсоров в момент времени τ_i .

Элемент паттерна $x_i(\tau_i)$, зарегистрированного в момент времени τ_i , может быть связан с элементом паттерна $x_m(\tau_{i+1})$, зарегистрированного в момент времени τ_{i+1} , ролью с семантическим обозначением «далее следует».

$H(\tau_{i+1}) = H(H(\tau_i), X(\tau_i)) = \bar{X}(\tau_{i+1})$ – функция прогноза СК (через прогнозируемый паттерн) с учетом контекста (с учетом ранее зарегистрированных СК). В основу данной функции может быть положена, например, Хеш-функция.

$\bar{X}(\tau_{i+1}) = \langle \langle x_1(\tau_{i+1}), h_1 \rangle, \langle x_2(\tau_{i+1}), h_2 \rangle, \dots, \langle x_n(\tau_{i+1}), h_n \rangle \rangle$ – паттерн, который прогнозируется получить в момент времени τ_{i+1} с учетом контекста.

$h_i \in \{1, N\}$, где N – максимальное количество возможных различных интерпретаций x_i с учетом различных контекстов, а само значение h_i задает номер интерпретации.

$ars = ARS(X(\tau_i), X(\tau_{i+1}))$ – сила ассоциации двух явлений, наблюдаемых последовательно.

ars_{min} – минимальное значение ars , при котором осуществляется распространение ассоциативного сигнала по ассоциативной сети, функционирующей в рамках ассоциативно-рефлекторной памяти.

Тогда обобщенную схему прогнозирования паттернов в рамках ассоциативно-рефлекторной памяти можно представить следующим образом: см. рисунок 4.

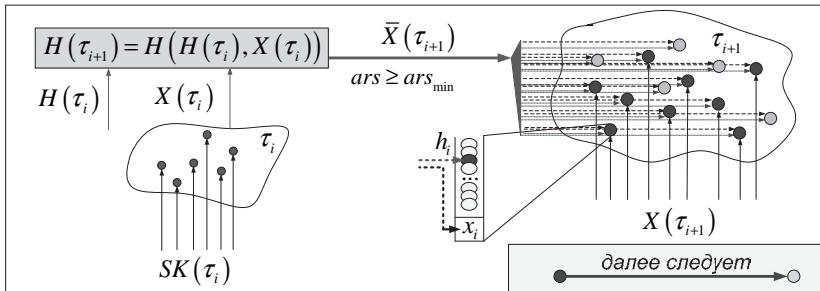


Рис. 4. Обобщенная схема прогнозирования паттернов в АРП

4. Модель функционирования ассоциативно-рефлекторной памяти в ходе порождения спецификаций упреждающих реакций.

Все указанное в работе [1] относительно НТМ может быть полезно для организации работы с контекстами, для работы в условиях шума и пропусков, а также, возможно, для реализации в той или иной мере способности системы к обучению и предсказанию. Стоит однако отметить, что настроить подобную систему до этапа ее непосредственной эксплуатации по назначению, как видится, достаточно сложно, а если система сложная, как система обеспечения информационной безопасности (ИБ), то скорее и вовсе невозможно, так как описание всех связей между многочисленными нейронами практически нереализуемо.

НТМ не предполагает самообучение при отсутствии входных данных от сенсоров, а данная способность просто необходима для интеллектуальных систем. Так, человек способен самостоятельно строить нейронные связи, но естественно при этом процессе он оперирует не нейронами и связями, а воображаемыми событиями, образами, процессами и т.п. Манипуляции с воображаемыми отдельными событиями и целыми процессами человек осуществляет при ретроспективной и перспективной рефлексии. Поэтому предлагается надстроить более высокий уровень в иерархии регионов, содержащий данные о событиях и их последовательностях, т.е. о процессах (см. рисунок 5). Далее его предлагается называть «Уровень Процессов» (УП).

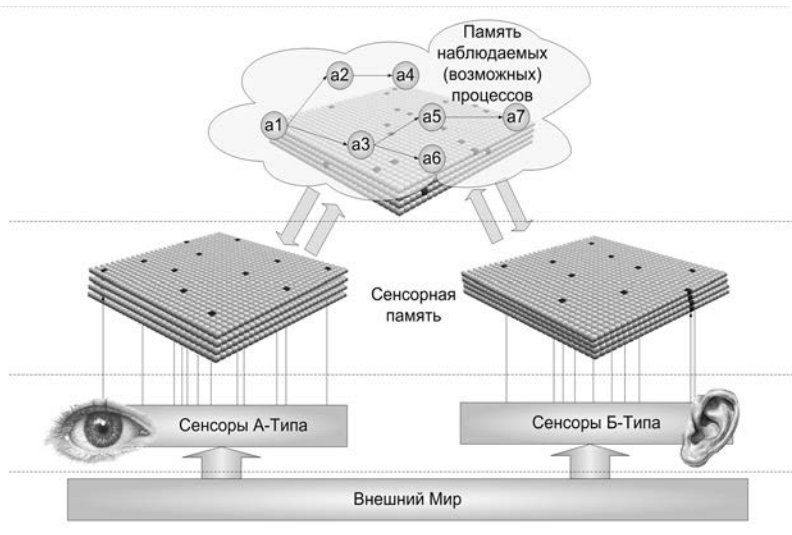


Рис. 5. Связь УП с уровнем, реализующим сенсорную память

На УП система должна быть в состоянии строить деревья возможных процессов, опираясь на предыдущий опыт и правила построения процессов. Также на УП на все множество процессов должны накладываться ограничения, порождаемые спецификой предметной области, знанием о сенсорах и эффекторах (т.е. об их возможностях и недостатках), решаемыми системой задачами и т.п. После того, как на УП построится определенный фрагмент наблюдаемого процесса, система должна выбрать на него ответную реакцию. Ответная реакция может выбираться как на основе предыдущего опыта, так и на основе анализа возможных реакций, описание которых построено в ходе рефлексии системы. Процесс – ответная реакция далее должен активировать выполнение последовательности действий эффекторами.

Таким образом, предлагается представить взаимодействие УП, содержащего последовательность предполагаемых действий, с эффекторами так, как это представлено на рисунке 6.

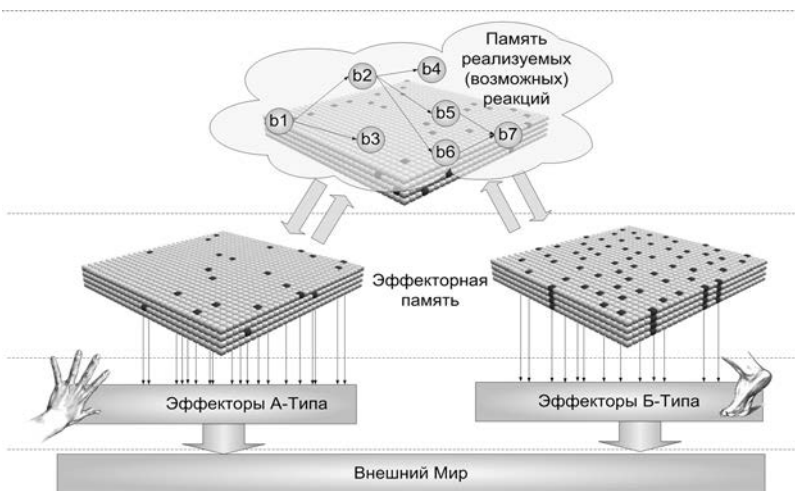


Рис. 6. Настройка уровня, содержащего данные о реализуемых (возможных) реакциях системы

Далее предлагается замкнуть работу сенсоров с работой эффекторов через соответствующие регионы на УП и через “Синтезатор” [3].

На долю “Синтезатора” предлагается отнести задачи, связанные с интеллектуальной обработкой наблюдаемых процессов из ВМ и формированием обоснованных реакций, оформленных в виде совокупности действий, реализуемых имеющимися эффекторами, и направленных либо на изменение ВМ, либо на изменение самой систе-

мы, осуществляемое через эффекторы. Однако решение указанных задач относится уже к работе ассоциативно-семантической памяти (АСП), которая должна быть рассмотрена отдельно и более детально.

Исходя из уже описанного, уровни функционирования памяти информационно-технической системы, обладающей свойством антиципации, могут быть представлены следующим образом – см. рисунок 7: область (I) обозначена область принятия решений на уровне АРП, а область (II) – на уровне АСП.

Для пояснения схемы, представленной на рисунке 7, предлагается рассмотреть обобщенную методику функционирования абстрактной киберсистемы, обладающей свойствами антиципации.



Рис. 7. Уровни функционирования памяти киберсистемы, обладающей свойством антиципации

Ниже приводятся основные этапы функционирования системы, основанные на применении механизмов, реализованных на уровне ассоциативно-рефлекторной памяти. Поскольку функционирование АРП также связано и с функционированием ассоциативно-семантической памяти (на уровне “Синтезатора”), то предлагается отразить и эту взаимосвязь. Тогда функционирование ассоциативно-рефлекторной памяти в ходе порождения спецификаций упреждающего поведения можно представить в виде нижеприведенной последовательности мероприятий.

1. Система воспринимает окружающий “Внешний Мир” и себя через конечную совокупность сенсоров различного, но определенного типа.

– Сенсоры регистрируют свойства событий, происходящих во ВМ и в самой системе (очевидно, что не все события и их свойства известны системе априорно).

– Регистрируемые свойства событий представляются в виде Сенсорных Кадров, помещаемых в аналог Иерархической Временной Памяти.

– СК представляют собой разреженную совокупность активных нейронов, располагающихся в различных Регионах АРП.

– Меняющиеся во времени СК, поступающие от сенсоров, позволяют построить связи между последовательно активизируемыми нейронами, что в свою очередь обуславливает организацию сенсорной памяти.

– Регионы АРП, с которыми связаны сенсоры, имеют связь с Регионами АРП, с которыми связаны эффекторы. Эта связь необходима для организации взаимодействия между нейронами, активируемыми раздражителями из ВМ, и нейронами, которые связаны с эффекторами, через которые система в состоянии оперативно реагировать на эти раздражители (данная связь между регионами АРП сенсоров и регионами АРП эффекторов позволяет реализовать механизм безусловных рефлексов системы).

2. Совокупность СК, построенных в регионах АРП сенсоров, сопоставляется с конкретными событиями, информация о которых хранится на более высоком уровне АРП – на уровне наблюдаемых и теоретически возможных процессов (УП), либо оформляется в виде нового события на УП.

– Совокупность сенсорных кадров через систему нейронных связей активирует распределенные нейроны на УП, содержащие данные об обнаружении конкретного события. Если регулярно появляющаяся совокупность СК не может быть соотнесена с конкретным событием из ВМ, то на УП формируется новое событие.

– Меняющиеся во времени события, отражаемые в нейронах УП, позволяют построить связи между последовательно активизируемыми нейронами, что в свою очередь обуславливает организацию памяти на уровне последовательностей событий.

3. Система определяет то, каким образом необходимо реагировать на события, регистрируемые ею через систему сенсоров.

– Регионы АРП, с которыми связаны СК, имеют связь с Регионами АРП, в которых реализована память о том, каким образом (на уровне процессов) нужно реагировать на происходящие события. Эта связь необходима для организации взаимодействия между нейронами, содержащими данные о наблюдаемых системой процессах, и нейрона-

ми, хранящими данные о том, какие действия необходимо предпринять для достижения системой желаемого ею будущего состояния (правильная конфигурация данного взаимодействия нейронов позволит как предугадывать следующее за текущим событием из ВМ, так и активировать соответствующие нейроны, отвечающие за управление эффекторами, деятельность которых направлена на предотвращение ожидаемого события).

– Возможные последовательности возможных событий, наблюдаемых системой, также как и возможные последовательности возможных реакций, могут строиться как на основе опыта системы, так и на основе результатов, полученных «Синтезатором». И в том и в другом случае результатом будет построение определенных связей между нейронами и регионами нейронов в системе Памяти киберсистемы.

4. Система воздействует на ВМ или изменяет свою конфигурацию, осуществляя определенные действия эффекторами.

– Регионы памяти, в которых хранится информация о возможном поведении системы, имеют связь с Регионами памяти, в которых реализована эффекторная память. Эта связь необходима для того, чтобы система была в состоянии активизировать последовательность Эффекторных Кадров (ЭК), инициирующих определенным образом имеющиеся эффекторы, для выполнения того действия, которое было выбрано системой в ответ на события, регистрируемые сенсорами и представленные в виде событий в Регионе с сенсорной памятью, либо на события, прогнозируемые сенсорной памятью.

– Эффекторы воздействуют/не воздействуют на «Внешний Мир» и/или саму систему для достижения желаемого будущего системой.

5. Важным элементом интеллектуальной информационно-технической системы, обладающей свойствами антиципации, является «Синтезатор», который:

– осуществляет анализ цепочек регистрируемых событий,
– строит цепочки событий потенциально реализуемые во «Внешнем Мире» и относящиеся к рассматриваемой предметной области,

– накладывает ограничения на возможные цепочки событий, исходя из решаемых системой задач и априорных знаний о правилах протекания процессов во ВМ,

– осуществляет анализ действий системы и их последовательностей, осуществляемых системой ранее, либо заложенных на этапе ее проектирования,

– строит цепочки действий, потенциально реализуемые системой,

– накладывает ограничения на возможные цепочки действий системы, исходя из решаемых ею задач и априорных знаний о правилах протекания процессов во ВМ,

– сопоставляет наблюдаемые и возможные процессы во «Внешнем Мире» с последовательностью возможных действий системы,

– организует нейронные связи между регионами памяти, содержащими данные о наблюдаемых событиях из ВМ, и регионами, содержащими последовательности потенциально реализуемых действий системы, направленных на достижение желаемого системой будущего.

Таким образом, как можно увидеть из выше приведенного описания, киберсистема, способная осуществлять синтез сценариев упреждающего поведения в ходе предотвращения атакующих воздействий на защищаемые ресурсы, должна быть способной моделировать упреждающее поведение на двух основных уровнях: на уровне АРП и АСП (как указывалось ранее [2]).

5. Метод синтеза сценариев упреждения на основе ассоциативно-рефлекторного поведения. Одним из основных этапов процесса синтеза сценариев упреждения является этап прогнозирования [3,4]. Процесс формирования прогноза на уровне ассоциативно-рефлекторного поведения состоит из этапов, в ходе выполнения которых осуществляется:

– получение информации о входных паттернах, которые были зарегистрированы ранее – на предыдущих этапах функционирования системы (при этом глубина ретроспективы может быть различной, и зависит от необходимой точности учета контекста);

– получение данных о сформированном входном паттерне: $X(\tau_i)$;

– формирование прогноза относительно паттерна (паттернов), который ожидается получить в следующий момент времени с учетом имеющегося контекста и полученных данных ($\bar{X}(\tau_{i+1})$), а также учитывая силу ранее выработанных ассоциативных связей (*ars*);

– получение Сенсорного Кадра от Системы Сенсоров и преобразование его во входной паттерн: $X(\tau_{i+1})$;

– сравнение результатов прогноза с полученными данными; если элемент паттерна совпал с прогнозируемым элементом ($\langle x_i(\tau_{i+1}), h_i \rangle$), то активируется только прогнозируемый элемент (у массива x_i активируется элемент, относящийся к интерпретации h_i), если элемент вход-

ного паттерна не совпал с прогнозируемым элементом, то активируется весь массив, совпадающий с входным элементом паттерна;

- деактивация прогнозированных, но не активированных входным паттерном элементов;
- укрепление ассоциативных связей между элементами, которые активировались в следующие друг за другом промежутки времени.

На рисунке 8 приведена одна итерация применения метода построения прогноза Сенсорных Кадров (входных паттернов), которые могут поступить на вход через Систему Сенсоров. Осуществление прогноза – это только один аспект ассоциативно-рефлекторного поведения, лежащего в основе упреждения. Вторым важным аспектом, лежащим в основе упреждения, построенного на уровне ассоциативно-рефлекторного поведения, является возможность осуществлять само-модификацию и изменение объектов во «Внешнем Мире».



Рис. 8. Итерация метода построения прогноза наблюдаемых Сенсоров Кадров (входных паттернов)

Для того чтобы воспринимаемые данные смогли инициировать определенные выходные реакции, паттерны, которые формируются по результатам восприятия СК, должны быть связаны с паттернами, формирующими конкретные Эффекторные Кадры, которые осуществляют

управление Системой Эффекторов, способной оказывать преобразующие воздействия на «Внешний Мир» и саму систему. Эта связь необходима для организации взаимодействия между областью памяти, содержащей данные о наблюдаемых системой процессах, и областью памяти, хранящей данные о том, какие действия необходимо предпринять для достижения системой желаемого будущего состояния (правильная конфигурация данного взаимодействия позволит как предугадывать следующее за текущим событие из ВМ, так и активировать соответствующие паттерны, отвечающие за управление эффекторами, деятельность которых направлена на предотвращение ожидаемого события).

Следует заметить, что не все системы могут самостоятельно «обучиться» во время своего непосредственного функционирования. Это может быть связано с тем, что не всякая система сможет «дожить» до состояния обученности, либо процедура самообучения может быть непомерно дорогой или долгой. Ввиду этого, подход, предложенный в [1], не всегда применим для его практической реализации и требует доработки, связанной, например, с учетом возможности реализации процедур обучения системы без накопления ею опыта через систему сенсоров. Для того чтобы выполнение таких процедур стало возможным, предлагается уже на уровне АРП при описании процессов использовать семантически окрашенные именованные концепты предметной области [5], с которой имеет дело система в процессе своего функционирования. Это позволит оператору не только заранее вносить необходимые связи между паттернами, представляющими Сенсорные и Эффекторные Кадры, но и проверять, а при необходимости и править, выработанные системой в процессе ее функционирования условные рефлексы.

6. Заключение. Предложенный метод синтеза сценариев упреждения, построенный на основе ассоциативно-рефлекторного поведения, может быть положен в основу систем обнаружения и предотвращения вторжений, способных формировать различные ответные реакции на одни и те же атакующие воздействия, зависящие от того, в каких условиях и каким образом атакующие воздействия осуществляют-ся, т.е. – в зависимости от контекста.

Литература

1. Иерархическая темпоральная память (НТМ) и ее кортикальные алгоритмы обучения. Numenta, Inc. URL: <http://numenta.com/assets/pdf/whitepapers/hierarchical-temporal-memory-cortical-learning-algorithm-0.2.1-ru.pdf> (дата обращения: 18.12.2014).
2. *Бирюков Д.Н., Ломако А.Г., Сабиров Т.Р.* Многоуровневое моделирование сценариев упреждающего поведения // Проблемы информационной безопасности.

Компьютерные системы. С-Пб.: Издательство Политехнического университета. 2014. №4. С. 41–50.

3. *Бирюков Д.Н., Ломако А.Г.* Подход к построению системы предотвращения киберугроз // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. С-Пб.: Издательство Политехнического университета. 2013. №2. С. 13–19.
4. *Бирюков Д.Н., Ломако А.Г.* Построение систем информационной безопасности: от живых организмов к киберсистемам // Защита информации. INSIDE. 2013. №2. С. 2–6.
5. *Бирюков Д.Н., Ломако А.Г.* Формализация семантики для представления знаний о поведении конфликтующих сторон // Материалы 22-й научно-практической конференции “Методы и технические средства обеспечения безопасности информации”. С-Пб.: Издательство Политехнического университета. 2013. С. 8–11.

References

1. Ierarhicheskaja temporal'naja pamjat' (HTM) i ee kortikal'nye algoritmy obuchenija. [Hierarchical temporal memory (HTM) and its cortical algorithms of training. Numenta, Inc.]. Available at: <http://numenta.com/assets/pdf/whitepapers/hierarchical-temporal-memory-cortical-learning-algorithm-0.2.1-ru.pdf> (accessed 18.12.2014).
2. Biryukov D.N., Lomako A.G., Sabirov T.R. [Multilevel modeling of scenarios of anticipatory behavior]. *Problemy informatsionnoy bezopasnosti. Kompyuternie sistemy – Problems of information security. Computer systems.* SPB: St. Petersburg Polytechnical University 2014. vol. 4. pp. 41–50. (In Russ).
3. Biryukov D.N., Lomako A.G. [Approach to creation of system of cyber-threats preventing]. *Problemy informatsionnoy bezopasnosti. Kompyuternie sistemy – Problems of information security. Computer systems.* SPB: St. Petersburg Polytechnical University 2013. vol. 2. pp. 13–19. (In Russ).
4. Biryukov D.N., Lomako A.G. [Design and construction of information security from living organisms to cybersystems]. *Zashita informatiyi – Data protection. INSIDE.* 2013. vol. 2. pp. 2–6. (In Russ).
5. Biryukov D.N., Lomako A.G. [Formalization of semantics for representation of knowledge of behavior of conflicting parties]. *Materialy 22 nauchno-prakticheskoy konferenciyi “Metody i tehnicheskiye sredstva obespecheniya bezopasnosti informacii”* [Materials of the 22nd scientific and practical conference “Methods and Technologies for Information Security Provision”]. SPB: St. Petersburg Polytechnical University 2013. pp. 8–11. (In Russ).

Бирюков Денис Николаевич — к-т техн. наук, профессор кафедры систем сбора и обработки информации, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского. Область научных интересов: системный анализ, защита информации, интеллектуальная поддержка принятия решений. Число научных публикаций — 70. Biryukov.D.N@yandex.ru; ул. Ждановская, д. 13, г. Санкт-Петербург, 197198; p.t.: +7(812) 237-19-60.

Biryukov Denis Nikolaevich — Ph.D., professor of systems for collecting and processing information department, Mozhaisky Military Space Academy. Research interests: system analyses, IT-Security, intelligent decision support. The number of publications — 70. Biryukov.D.N@yandex.ru; 13, Zhdanovskaya street, St.-Petersburg, 197198, Russia; office phone: +7(812) 237-19-60.

РЕФЕРАТ

Бирюков Д.Н. **Ассоциативно-рефлекторная память киберсистемы для синтеза упреждающих реакций, нейтрализующих вредоносные воздействия.**

Проведенные исследования показали, что в настоящее время не разработано единой модели памяти человека, но есть отдельные, заслуживающие внимания и доведенные до практических реализаций, наработки. Так, например, для реализации в проектируемой системе возможностей формирования условных рефлексов, предлагается использовать усовершенствованную модель «Иерархической Временной Памяти» (НТМ; Numenta, Inc.).

Представленная в статье модель функционирования ассоциативно-рефлекторной памяти, а также метод синтеза сценариев упреждения на основе ассоциативно-рефлекторного поведения, позволяют реализовать в проектируемой системе способность формировать различные ответные реакции на одни и те же атакующие воздействия, в зависимости от контекста, в котором эти атакующие воздействия осуществляются.

Также предложено уже на уровне ассоциативно-рефлекторной памяти использовать семантически окрашенные именованные концепты предметной области, с которой имеет дело система в процессе своего функционирования. Это должно позволить оператору проверять, а при необходимости и править, выработанные системой условные рефлексы.

SUMMARY

Biryukov D.N. **Associative-Reflex Memory of Cybersystem for Synthesis of the Anticipatory Reactions Neutralizing Harmful Influences.**

The conducted researches showed that now isn't developed uniform model of memory of the person, but is separate, deserving attention and brought to practical realization, an operating time. So, for example, for realization in the designed system of opportunities of formation of conditioned reflexes, it is offered to use advanced model "Hierarchical Temporal Memory" (HTM; Numenta, Inc.).

The model of functioning of associative-reflex memory presented in article, and also method of synthesis of scenarios of anticipation on the basis of associative-reflex behavior, allow to realize ability to form various responses to the same attacking influences, depending on a context in which these attacking influences are carried out in the designed system.

It is already also offered to use at the level of associative and reflex memory semantic painted names of concepts of subject domain with which the system in the course of the functioning deals. It has to allow the operator to check, and if necessary and to govern, the conditioned reflexes developed by system.

С.А. АГЕЕВ

ПРИМЕНЕНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ МЕТОДОВ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ РИСКАМИ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ В ЗАЩИЩЁННЫХ МУЛЬТИСЕРВИСНЫХ СЕТЯХ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Агеев С.А. Применение интеллектуальных методов представления информации для управления рисками информационной безопасности в защищённых мультисервисных сетях специального назначения.

Аннотация. Рассматриваются основные способы применения интеллектуальных методов и алгоритмов, синтезированных на их основе, представления данных сетевого мониторинга для управления рисками информационной безопасности защищённых мультисервисных сетей (ЗМС). Разработана и исследована математическая модель интеллектуального представления данных для анализа и оценки риска информационной безопасности ЗМС.

Ключевые слова: защищённая мультисервисная сеть, кластеризация, классификация, автоматизация управления, математическая модель, интеллектуальное управление, нечеткий логический вывод, база знаний, функция принадлежности, нечеткие данные, лингвистическая переменная.

Ageev S. A. Application of Intelligent Methods of Information Representation to Manage Information Security Risks in Secure Multiservice Special-Purpose Networks.

Abstract. The article considers main methods to use intelligent techniques and algorithms, synthesized on their basis, as well as examines data presentation of network monitoring for IT security risk management of secure multiservice networks. The mathematical model of intelligent data presentation is developed and examined for IT security risk investigation and assessment.

Keywords: secure multiservice networks, clusterization, classification, control automation, mathematical model, intelligent control, fuzzy inference, knowledgebase, membership function, fuzzy data, linguistic variable.

1. Введение. Важнейшей проблемой при создании и эксплуатации защищённых мультисервисных сетей специального назначения (ЗМС СН) является проблема обеспечения их безопасного функционирования и безопасности циркулирующей в ней информации [1, 2]. Для решения данной проблемы необходимо применение методов, которые позволяют оперативно оценивать риски информационных угроз с заданной степенью достоверности, а также на основании анализа этих оценок вырабатывать и реализовывать оперативное управление, направленное на их снижение [3]. Под оперативностью управления понимают [4, 5]:

$$P_{oy} = P \left\{ t_y \leq T_{zy} \right\}, \quad (1)$$

где P_{oy} - вероятность события заключающегося в том, что время цикла управления не превысит заданное время T_{zy} . В свою очередь, время цикла управления t_y складывается из времени сбора информации о состоянии сетевых элементов $t_{cб}$, поступающей от подсистемы сетевого мониторинга, времени анализа информации t_a , времени выработки решений t_p , времени доведения управляющей информации до соответствующих сетевых элементов $t_{д}$, времени реализации сетевыми элементами управленческих решений t_u и времени подтверждения сетевыми элементами выполнения управленческих решений t_n . Таким образом, можно записать соотношение:

$$t_y = t_{cб} + t_a + t_p + t_{д} + t_u + t_n. \quad (2)$$

Откуда следует, что повышение оперативности цикла управления заключается в снижении значений слагаемых в выражении (2).

Учитывая разноплановость, многокритериальность, большую размерность решаемых задач по управлению ЗМС СН, часть процедур управления предлагается реализовывать на основе технологии интеллектуальных мультиагентов (ИМА), основой которых является технология «агент-менеджер» [3, 6].

Данная работа посвящена решению проблемы оперативной обработки и представления исходных данных для подсистемы поддержки принятия решений при управлении информационной безопасностью (ИБ) в ЗМС СН.

2. Постановка задачи исследования. Основными способами повышения оперативности управления в данной работе предлагаются способы уменьшения времени анализа исходных данных и способы уменьшения времени выработки и принятия управленческих решений. При этом качество управления, а именно значения целевых функций, которые подлежат оптимизации, должны оставаться в области Парето-оптимальных значений. Для решения данной проблемы в работе предлагается применение методов нечётких кластеризации, классификации и ранжирования [3].

Пусть с выходов сенсоров систем обнаружения и предупреждения вторжений (СОВ, СПВ), расположенных в составе встроенных в сетевые элементы (СЭ) интеллектуальных

мультиагентов [3, 6], за время ΔT_i ; поступают данные в виде совокупности обнаруженных признаков текущего состояния ИБ $X_i = \{x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ij}, x_{in}\}$, где $i = \overline{1, M}$. Элементы множества $\{X_i\}$ могут иметь различную физическую природу, различную размерность, а также могут иметь различные системы измерений и шкалирования. Подготовка данных для функционирования подсистемы принятия решений об уровне риска угроз ИБ заключается в выполнении следующих процедур:

- производится сортировка на классы предполагаемых угроз одним из известных методов [3, 7, 8], например, определяется атакуется ли СУБД конкретного СЭ, операционная система СЭ, сетевой интерфейс СЭ и т. д.;

- производится кластеризация входных данных для каждого класса угроз ИБ СЭ ЗМС СН;

- производится классификация полученных кластеров на соответствие известным классам и видам деструктивных воздействий на сетевые элементы ЗМС СН;

- производится ранжирование по степени риска ИБ полученных данных.

Выполнение вышеперечисленных процедур должно быть реализовано за время меньшее, чем интервал ΔT_i . Данный подход иллюстрирует рисунок 1. На этом рисунке X - признаки состояния ИБ СЭ, Y -кластеры известных угроз ИБ СЭ, Z - классы неизвестных угроз ИБ СЭ. Очевидно, что выполняется следующее отношение:

$$Y \subseteq X, Z \subseteq X, \quad (3)$$

$W = Y \cup Z$ – множество угроз ИБ СЭ ЗМС СН.

Таким образом, необходимо построить ранжированный ряд угроз ИБ $r_1 < r_2 < \dots < r_n$, где r_k - ранжированное значение угрозы, k -класс угрозы, N_k - количество угроз данного класса, w_k - весовой коэффициент угрозы, ΔT_i - период времени, за который появились угрозы данного класса, то есть:

$$r_k = \frac{N_k \times w_k}{\Delta T_i}. \quad (4)$$

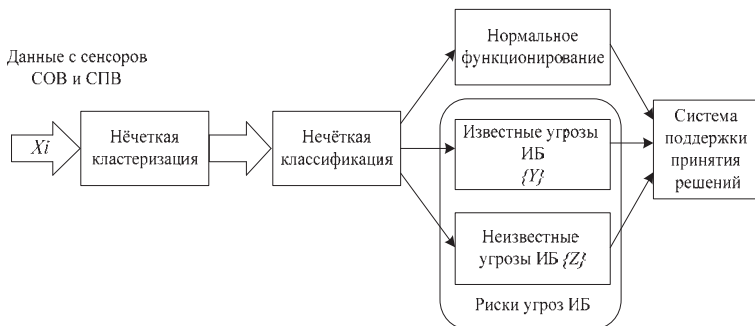


Рис. 1. Обобщённая структура взаимосвязи процедур кластеризации, классификации и ранжирования

Полученные данные поступают на вход системы поддержки принятия решения, которая автоматически генерирует управляющее воздействие для данного СЭ, направленное на уменьшение риска ИБ, а также информирует об этом вышестоящий интеллектуальный менеджер управления [3, 6].

3. Применение методов нечётких кластеризации и классификации для обработки первичной информации СОВ и СПВ. Для решения сформулированной выше задачи предлагается использовать методы нечёткой кластеризации и нечёткой классификации [3, 6, 7], которые позволяют улучшить показатели оперативности цикла управления рисками ИБ ЗМС СН.

Процедура кластеризации заключается в разбиении всего множества признаков состояния ИБ на группы по некоторым признакам. Полученные группы называют кластерами. Таким образом, формальная постановка задачи кластеризации имеет следующий вид.

Дано конечное множество объектов $X_i = \{x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ij}, \dots, x_{in}\}$, где $i = \overline{1, M}$. Каждый из объектов характеризуется m -компонентным признаковым описанием $(p_1, p_2, \dots, p_k, \dots, p_m)$, $p_k \in P_k$, где P_k – допустимое множество значений признака. Требуется построить множество кластеров (построить разбиение множества X_i) $\{C_i\}$, где $i = \overline{1, c}$ и отображение $f: X \rightarrow C$, со следующими свойствами:

$$\bigcup_{i=1, c} C_i = X, C_i \cap C_j = \emptyset, i, j = \overline{1, c}, i \neq j, \quad (5)$$

$$\emptyset \subset C_i \subset X, i = \overline{1, c}.$$

При этом для процедур субтрактивной кластеризации количество кластеров c подлежит определению. Для оценки качества разбиения

применяется критерий разброса, показывающий сумму расстояний в выбранной метрике от координат признаков до координат центра своего кластера. Например, для евклидовой метрики получаем следующий критерий разбиения:

$$\sum_{i=1,c} \sum_{X_k \in C_i} \|V_i - X_k\|^2 \rightarrow \min, \quad (6)$$

где: $C_i = \{x_p, \varphi_{k_i} = 1, k = \overline{1, M}\}$ - i -ый кластер; $V_i = \frac{1}{|C_i|} \sum_{x_k \in C_i} x_k$ - центр i -го кластера; $|C_i|$ - мощность множества признаков кластера C_i .

Формальная постановка задачи нечёткой кластеризации имеет следующие особенности.

Нечёткие кластеры определяются матрицей нечёткого разбиения:

$$F(X) = [\mu_{ki}], \mu_{ki} \in [0, 1]: k = \overline{1, M}, i = \overline{1, c}, \quad (7)$$

в которой k -ая строка содержит степень принадлежности объекта X_k кластерам $\{C_i\}$. При этом должны выполняться условия:

$$\sum_{i=1,c} \mu_{ki} = 1, k = \overline{1, M}, \quad 0 < \sum_{k=1,M} \mu_{ki} < M, i = \overline{1, c}. \quad (8)$$

Критерий качества нечёткой кластеризации в простейшем случае имеет вид:

$$\sum_{i=1,c} \sum_{k=1,M} (\mu_{ki})^m \|V_i - X_k\|^2 \rightarrow \min, \quad (9)$$

где: $V_i = \frac{\sum_{k=1,M} (\mu_{ki})^m X_k}{\sum_{k=1,M} (\mu_{ki})^m}$ - центр нечёткого кластера; $m \in (1, \infty)$ -

экспоненциальный вес. Схема алгоритма субтрактивной (горной) кластеризации представлена на рисунке 2. Данный алгоритм является чётким алгоритмом, но, при соответствующем выборе шкал признаков кластеров, он может применяться и для обработки нечётких исходных данных.

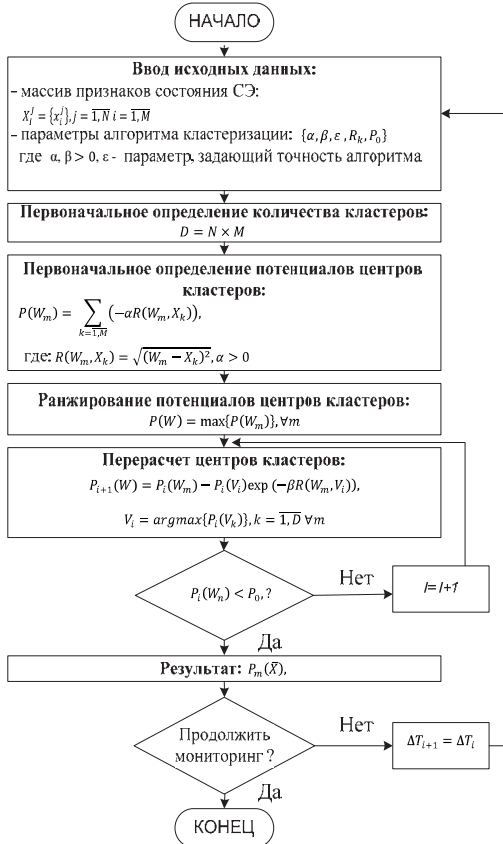


Рис. 2. Схема алгоритма горной кластеризации

Алгоритм нечёткой классификации предлагается реализовывать на основе метода нечёткого логического вывода Мамдани [7, 8], имеющего вид:

$$\bigcup_{i=1}^c \left(\bigcap_{j=1}^m x_i = a_{i,j} \times p_j \right) \rightarrow y_j = d_j, \quad j = \overline{1, m}, \quad (10)$$

где x_i - набор входных признаков;

y_j - выходная переменная j -го правила;

$a_{i,j}$ - нечёткий терм, которым оценивается переменная x_i в правиле j базы знаний;

p_j - весовой коэффициент правила j ;

d_j - набор значений выходной переменной y_j .

Степени принадлежности $\mu_{dj}(X^*)$ признака классифицируемой угрозе ИБ вычисляется по методам, изложенным в [3, 7, 8]. Признаки ИБ тоже являются нечёткими величинами. Каждый признак характеризуется степенью наблюдаемости [7, 8], которым присваиваются лингвистические термы. Ранжирование классифицируемых рисков угроз ИБ СЭ ЗМС СН осуществляется в соответствие с (2). При реализации процедур нечёткой классификации возможно предварительное обучение нечёткого классификатора [7, 8].

В процессе функционирования корректировка баз знаний возможна в соответствие с методами, изложенными в [8].

Исходные данные, поступающие на вход алгоритма кластеризации должны удовлетворять следующим свойствам [7]:

- функция распределения вероятностей разброса признаков относительно центра кластера должна аппроксимироваться гауссовой функцией распределения;

- признаки состояния системы должны быть некоррелированными;

- значения признаков должны быть либо безразмерными, либо иметь одни и те же единицы измерения;

- распределение значений признаков должны быть устойчивы к влиянию случайных факторов;

- совокупности распределений значений признаков должны быть однородны и не содержать неких выбросов.

4. Анализ результатов математического моделирования. На рисунке 3 приведены некоторые результаты программной реализации предложенных методов кластеризации и классификации для двумерного случая.

Признаки каждого кластера генерировались с помощью двумерного гауссова распределения, имеющего вид:

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi \sigma_x \sigma_y} \exp\left\{-\left(\frac{(x - x_i)^2}{2\sigma_x^2} + \frac{(y - y_i)^2}{2\sigma_y^2}\right)\right\}, \quad (11)$$

где σ_x - среднее квадратическое отклонение признака относительно центра по оси x ; σ_y - среднее квадратическое отклонение признака

относительно центра по оси y ; (x_u, y_u) – координаты центра кластера; (x_i, y_i) – координаты центра i -го признака данного кластера.

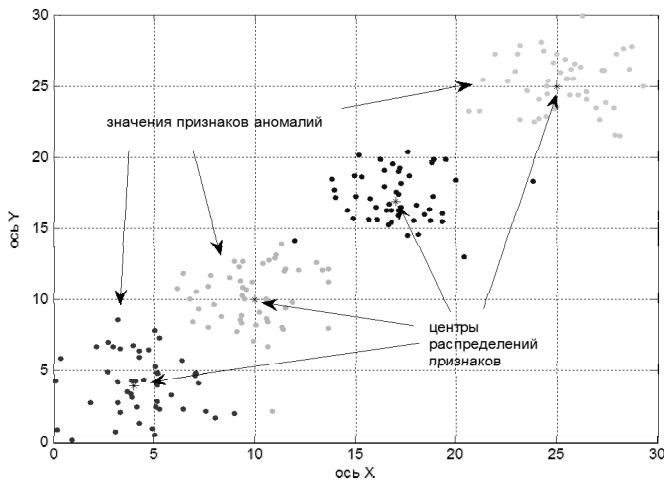


Рис. 3. Распределение признаков, центры кластеров

В таблице 1 приведены характеристики исследуемой модели признаков. Результаты кластеризации приведены на рисунках 4 и 5. На этих рисунках приведён результат выполнения алгоритма субтрактивной кластеризации для двумерного случая.

Таблица 1. Характеристики модели признаков угроз ИБ

Параметры	Первый кластер	Второй кластер	Третий кластер	Четвёртый кластер
Координаты центров распределения признаков в кластерах	(4, 4)	(10, 10)	(17, 17)	(25, 25)
Среднеквадратические отклонения по осям x и y	(2, 2)	(2, 2)	(2, 2)	(2, 2)
Координаты центров кластеров	(1.8; 2.8)	(8.4; 8.9)	(17.2; 18.3)	(25.8; 25.6)
Значение потенциала кластера	0.4	1	0.82	0.64
Количество признаков в кластере	50	50	50	50
Расстояние от центра распределения до центра кластера	2.51	1.94	1.32	1.0

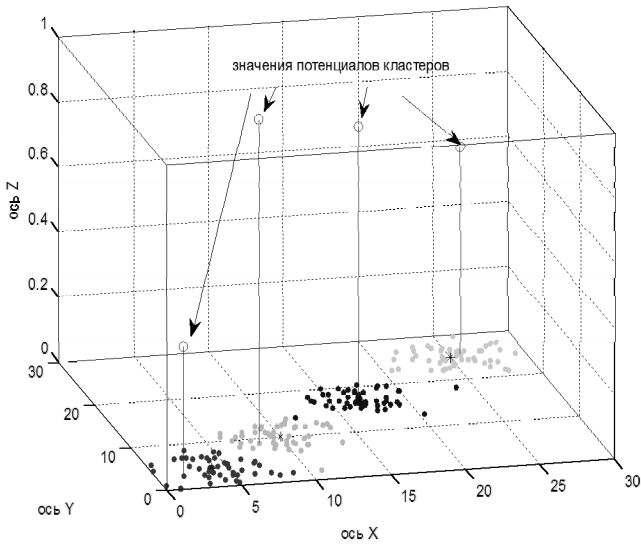


Рис. 4. Признаки кластеров, их центры, значение потенциалов кластеров

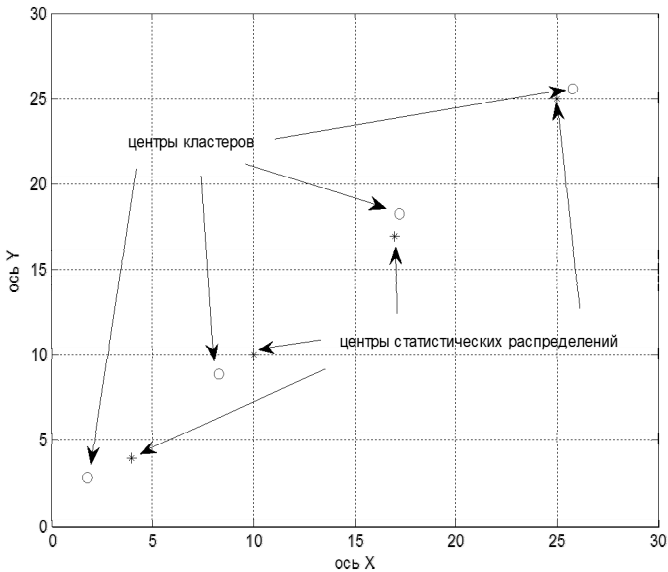


Рис. 5. Результаты кластеризации

Проведённые исследования алгоритма субтрактивной кластеризации показали его высокую устойчивость к различным

изменениям параметров распределения признаков. Из рисунка 3 видно, что области проекций значений признаков на координатные оси перекрываются для различных кластеров. Тем не менее, производится верное определение числа кластеров. Дальнейшим направлением исследования применения алгоритмов кластеризации данного класса (класс алгоритмов классификации без учителя) могут быть исследования, направленные на автоматическую адаптацию его параметров в зависимости от характеристик совокупности анализируемых признаков.

Правила базы данных процедуры классификации (10) предлагается реализовывать в следующем виде:

$$\text{ЕСЛИ } \langle (C_j \in R_j) \text{ И } (R_j \in (L)) \rangle \text{ ТО } \langle \text{УГРОЗА } J - \text{ИЗВЕСТНА} \rangle, \quad (12)$$

где L – номер области пространства признаков. То есть, если центр кластера находится в достаточной близости от центра кластера известной угрозы, то считается, что риск идентифицирован с определённым значением коэффициента ранжирования. Если центр кластера находится на большом расстоянии от центров известных угроз, то независимо от того в какой области он находится, риск считается максимальным, так как характеристики угрозы не определены. На рисунке 6 приведён пример разбиения области пространства признаков по степени значимости угроз. Область 1 – риск допустим, область 2 – средняя степень риска, область 3 – высокая степень риска.

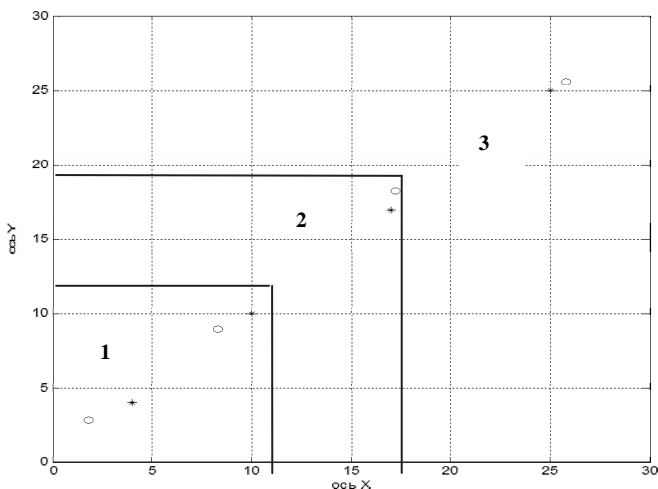


Рис. 6. Возможное разбиение пространства признаков и кластеров для оценки степени риска ИБ ЗМС СН

Далее, полученные данные поступают на вход системы поддержки принятия решений [3].

Признаки состояния для каждого класса угроз в данном численном эксперименте представлялись лингвистическими терминами с соответствующими функциями принадлежности.

Анализ алгоритмов классификации и ранжирования показал их высокую устойчивость и эффективность для различных групп кластеров, для различного количества кластеров и различных их пространственных положений.

5. Заключение. Проведённые в работе исследования предложенных методов показали их высокую эффективность, их высокие точностные характеристики, простоту программной реализации, принципиальную возможность их функционирования в режиме, близком к режиму реального времени. Оперативность выработки управленческих решений при применении данных методов может быть улучшена по сравнению со статистическими методами приблизительно на 8%-13%, так как уменьшается время получения оценок значений признаков.

Литература

1. *Агеев С.А., Бушуев А.С., Егоров Ю.П., Саенко И.Б.* Концепция автоматизации управления информационной безопасностью в защищенных мультисервисных сетях специального назначения // Автоматизация процессов управления. 2011. №1. С.50–57.
2. *Саенко И.Б., Агеев С.А., Шерстюк Ю.М., Полубелова О.В.* Концептуальные основы автоматизации управления защищенными мультисервисными сетями // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. 2011. №3. С. 30–39.
3. *Агеев С.А., Саенко И.Б., Егоров Ю.П., Гладких А.А., Богданов А. В.* Интеллектуальное иерархическое управление рисками информационной безопасности в защищенных мультисервисных сетях специального назначения // Автоматизация процессов управления. 2014. № 3 (37). С.78–88.
4. Автоматизация управления и связь в ВМФ. Изд. 2-е / под общей редакцией Ю.М. Кононова. СПб.: «Элмор». 2001. 512 с.
5. *Азаров Г.И.* Теоретические основы анализа оперативности передачи информации в системах управления и связи // М.: Академия ГПС МЧС России. 2012. 62 с.
6. *Котенко И.В.* Интеллектуальные механизмы управления кибербезопасностью // Труды ИСА РАН. 2009. Т.41. С. 74–103.
7. *Белов В.В., Смирнов А.Е., Чистякова В.И.* Распознавание нечетко определяемых состояний технических систем // М.: Горячая линия–Телеком. 2012. 138 с.
8. *Штовба С.Д.* Проектирование нечётких систем средствами MATLAB // М.: Горячая линия – Телеком. 2007. 288 с.
9. *Платонов В.В.* Программно-аппаратные средства защиты информации // М.: Издательский центр «Академия». 2013. 336 с.

References

1. Ageev S.A., Bushuev A.S., Egorov Ju.P., Saenko I.B. [Concept of Automation of Information-Security Control in Protected Special-Purpose Multi-Service Networks] *Avtomatizacija processov upravlenija – Control Systems Automation*. 2011. vol. 1. pp. 50–57. (In Russ.).
2. Saenko I.B., Ageev S.A., Sherstjuk Ju.M., Polubelova O.V. [Conceptual basics of automation control of protected multi-service networks]. *Problemy informacionnoj bezopasnosti. Kompjuternye sistemy – Information security. Computer systems*. 2011. vol. 3. pp. 30–39. (In Russ.).
3. Ageev S.A., Saenko I.B., Egorov Ju.P., Gladkih A.A., Bogdanov A. V. [Intelligent hierarchical management of the information security risks in protected special purpose multi-service networks.] *Avtomatizacija processov upravlenija – Control Systems Automation*. 2014. vol. 3(37). pp. 78–88. (In Russ.).
4. *Avtomatizacija upravlenija i svjaz' v VMF. Izd. 2-e. Pod obshhej redakciej Ju.M. Kononova* [Control automation and connection at Navy. 2nd ed. Edited by Ju.M. Kononov]. SPb.: Jelmor Publ. 2001. 512 p. (In Russ.).
5. Azarov G.I. *Teoreticheskie osnovy analiza operativnosti peredachi informacii v sistemah upravlenija i svjazi* [Theoretical bases analysis of efficiency transferring information in systems of control and communications]. Moscow: Academy GPS EMERCOM of Russia Publ. 2012. 62 p. (In Russ.).
6. Kotenko I.V. [Intelligent control mechanisms of cyber security]. *Trudy ISA RAN – ISA RAS Proceedings*. 2009. vol. 41. pp. 74–103. (In Russ.).
7. Belov V.V., Smirnov A.E., Chistjakova V.I. *Raspoznvanie nechetko opredeljaemyh sostojanij tehnicheskijh sistem*. [Identification in outline specify the state of technological ensembles]. Moscow: Hotline Telecom Publ. 2012. 138 p. (In Russ.).
8. Shtovba S. D. *Proektirovanie nechjotkih sistem sredstvami MATLAB*. [Design fuzzy systems by MATLAB]. Moscow: Hotline Telecom. 2007. 288 p. (In Russ.).
9. Platonov V.V. *Programmno-apparatnye sredstva zashchity informacii*. [Hardware and software of information security]. Moscow: Academy Publ. 2013. 336 p. (In Russ.).

Агеев Сергей Александрович — к-т техн. наук, доцент, начальник научно-технического центра, ОАО "НИИ "Нептун". Область научных интересов: искусственный интеллект, управление телекоммуникационными системами, адаптивные и интеллектуальные методы управления большими системами, применение математических методов в задачах управления системами связи. Число научных публикаций — 94. serg123_61@mail.ru; 7-я линия В.О., д. 80, к.1А, Санкт-Петербург, 199178; p.t.: +7(812) 327-09-72.

Ageev Sergey Aleksandrovich — Ph.D., associate professor, head of technical researcher centre, Scientific Research Institute NII Neptun. Research interests: adaptive and intelligent technique of control large systems, use mathematical methods in control problem of processing systems. The number of publications — 94. serg123_61@mail.ru; 80, 7th line of Vasilievsky Island, St.Petersburg, 199178 Russia; office phone: +7(812) 327-09-72.

РЕФЕРАТ

***Агеев С.А.* Применение интеллектуальных методов представления информации для управления рисками информационной безопасности в защищённых мультисервисных сетях специального назначения.**

В статье предложены методы интеллектуального анализа данных, используемые для управления рисками информационных угроз элементам мультисервисных сетей специального назначения (ЗМС СН). Обосновывается, что скоротечность процессов в ЗМС СН, их многообразие, неточность и неполнота, а также большая размерность априорных данных о состояниях сетевых элементах и происходящих в них процессах приводят к необходимости применения интеллектуальных методов обработки данных и управления. Проведён анализ факторов, влияющих на время цикла управления информационной безопасностью (ИБ) ЗМС СН, предложена единая метрика оценки угроз информационной безопасности элементам ЗМС СН.

В представленных результатах исследований разработана единая математическая модель процедур кластеризации, классификации и ранжирования угроз ИБ, которые могут иметь ранее неизвестную структуру. Определены критерии качества функционирования предложенных процедур. Представлены результаты исследования разработанной математической модели. Сформулированы правила оценки степени угроз ЗМС СН. Приведён анализ полученных результатов математического моделирования и приведены рекомендации их практического применения.

В предложенной работе показывается, что применение методов и алгоритмов, основанных на интеллектуальных способах обработки данных совместно с технологией интеллектуальных агентов, позволяет существенно повысить оперативность управления ИБ ЗМС СН. Определены направления дальнейших исследований в данной предметной области.

SUMMARY

Ageev S.A. Application of Intelligent Methods of Information Representation to Manage Information Security Risks in Secure Multiservice Special-Purpose Networks.

The paper offers intellectual data analysis methods used for risk management of IT threats to the elements of secure multiservice special-purpose networks (SMSPN). It is proved that process speed in multiservice special-purpose networks, their manifold, inaccuracy and insufficiency, as well as high dimension of a priori data about network elements states and occurring in them processes – all create the need to use intelligent methods of data processing and control. The analysis of the factors influencing the cycle time of information security management of secure multiservice special-purpose networks is conducted. The unified metric for evaluating threats to information security of elements of SMSPN is offered.

The presented results of research show a developed unified mathematical model of procedures for clustering, classification and ranking of threats to information security, which may possess a previously unknown structure. Quality criteria of functioning of the proposed procedures are determined. The results of the study of the developed mathematical model are shown. Rules for assessing the degree of threats to secure multiservice special-purpose networks are formulated. The analysis of the obtained results of mathematical modeling and recommendations for their practical application are given.

In the proposed paper we show that the use of methods and algorithms based on intelligent data processing methods, together with the technology of intelligent agents, can significantly increase the efficiency of IT security management of secure multiservice special-purpose networks. Directions for further research in this subject area are determined.

М.Ю. ДОЛОМАТОВ, В.В. МАРТЫНОВ, Н.А. ЖУРАВЛЕВА, Е.И. ФИЛОСОВА,
Е.Ш. ЗАКИЕВА

ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА РАСЧЕТА СОЦИАЛЬНОЙ НАПРЯЖЕННОСТИ ОБЩЕСТВА НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ ЗАКОНОВ РАВНОВЕСНОЙ ТЕРМОДИНАМИКИ

Доломатов М.Ю., Мартынов В.В., Журавлева Н.А., Филосова Е.И., Закиева Е.Ш. **Информационная система расчета социальной напряженности общества на основе применения законов равновесной термодинамики.**

Аннотация. В работе описан метод применения законов равновесной термодинамики в сложных социально-экономических системах, в частности, для разработки методики расчёта индикатора социальной напряженности, и информационная система расчета предлагаемого индекса.

Ключевые слова: индекс социальной напряженности, дифференциация доходов населения, информационная система.

Dolomatov M.Yu., Martynov V.V., Zhuravliova N.A., Filosova E.I., Zakieva E.Sh. **Information System for Social Dissatisfaction Calculating Based on Application of the Law of Equilibrium Thermodynamics.**

Abstract. The paper describes a method of applying the laws of equilibrium thermodynamics to complex socio-economic systems, in particular, for the development of a methodology of calculation of social dissatisfaction indicators, and also two information systems proposed for calculating this indicator

Keywords: social dissatisfaction indicator, income differentiation, information system.

1. Введение. Под социальной напряженностью понимают характеристику состояния социальной системы, выражающуюся в повышении ее нестабильности, вызванной нарушением прав индивидов на удовлетворение их потребностей. В качестве индикаторов, оказывающих основное влияние на уровень социальной напряженности, служат демографические показатели (рождаемость, смертность, миграция), индикаторы социальной дифференциации (соотношение среднедушевых доходов и прожиточного минимума, коэффициенты: Джинни, децильный и др. [1]), показатели уровня и качества жизни (статистика здравоохранения, образования, культуры, социального обеспечения), социального неблагополучия (уровень инвалидности, преступлений). В данной статье описывается метод применения законов равновесной термодинамики в сложных социально-экономических системах, в частности, для разработки методики расчёта индикатора социальной напряженности с целью оценки вероятности возникновения гражданских волнений и войн. Объектом исследований являлись методика расчёта индикатора социальной напряженности на основе данных из открытых источников и создание на ее базе программного

инструментария, направленного на оперативную диагностику уровня конфликтности в обществе (на примере Российской Федерации).

2. Использование законов физики в экономике. Идеи применения подходов физики, точных наук в экономике не новы. Еще в 19 веке Лагранж считал, что уравнения классической механики могут объяснить процессы, происходящие в обществе. На протяжении 20 века появился ряд работ, в которых идеи физики начали активно использоваться в экономике. В числе этих работ были исследования в области применения теории механического равновесия к проблеме устойчивости сложных социально-экономических систем, к проблеме исследований балансовых соотношений.

В начале 20 века выдающийся русский экономист и врач А.А.Богданов [2] разработал научное направление — тектологию. Тектология явилась предтечей системного анализа, общей теории систем и синэргетики. По Богданову, тектология должна объяснять не только природные, но и социально-экономические процессы.

В 30-е годы выдающийся ученый естествоиспытатель А.Л.Чижевский [3] доказал влияние космических физических факторов (вспышек на солнце) на социальные процессы в обществе. Идеи А.Л.Чижевского открывают возможность исследования экономических процессов физическими методами. В 1975 году Б.С.Разумихин показал как физические методы механики и теории равновесия могут использоваться в экономике для решения целого ряда задач, связанных с проблемами экономического равновесия, экономического баланса и планирования [4]. В начале 80-х годов Д.Бартоломью [5] показал, что методы физики элементарных частиц могут быть использованы для предсказания динамики социальных процессов.

В России методы эконофизики (наука, которая применяет методологию физики к анализу экономических данных) развиваются международным институтом А.А.Богданова в Екатеринбурге под руководством В.В.Попкова. Этой организацией издаются научные труды и периодически проводятся Интернет-конференции по проблемам эконофизики, эволюционной экономики и устойчивого развития [6].

Несмотря на то, что методы физики позволяют эффективно описывать экономические явления, не следует думать о замене экономики физикой. Это связано с тем, что экономические системы сверхсложные и неразрывно связаны с деятельностью человека и политическими процессами, происходящими в обществе. Очевидно также, что такие понятия, как работа, энергия, теплота требуют

корректировки при переходе от термодинамических систем к экономическим системам. В работе [7] была предпринята попытка интерпретации таких понятий как прибыль, объем инвестиций и т.д. с позиции термодинамики, которая в дальнейшем уточнялась [8] (таблица 1).

Таблица 1. Аналогия термодинамических и экономических понятий

Показатель	Термодинамика	Экономика
<i>Внутренняя энергия</i>	Внутренняя энергия взаимодействия и движения частиц вещества в Дж	Объем прибыли как мера взаимодействия с экономической средой
<i>Работа</i>	Физическая величина, которая является количественной характеристикой движения тела	Объем инвестиций в развитие производства
<i>Теплота</i>	Доля энергии (рассеянной в окружающей среде), которая получается вычитанием из общей работы полезной части	Доля прибыли, использованная не по назначению, на нецелесообразные с точки зрения общественного производства действия.
<i>Единицы измерения энергии</i>	Джоули	Денежные единицы
<i>Температура</i>	Мера тепловой энергии среды (термостата), с которой взаимодействует система	Мера энергии экономической среды, с которой взаимодействует система

Большинство предлагаемых применительно к социально-экономическим системам термодинамических моделей имеет формально-математический характер, так как законы термодинамики идеальных газов и понятие энергии и температуры не могут быть автоматически перенесены из физики и химии в область экономики и социологии без соответствующей корректировки с учетом формы существования материи. При этом необходимо уточнить ряд базовых понятий термодинамики применительно к экономическим и общественным системам.

Как известно, энергия является универсальной мерой различных форм движения материи. Используя разработанную Ф.Энгельсом систему классификации форм движения материи (структурно-функциональных систем), их можно представить в виде следующей генетической связи: механическая — физическая — химическая — биологическая — психическая — социальная — экономическая. Поэтому логично согласиться с утверждением, что кроме

механических и физических форм существуют социально-экономические и т.д. энергии.

Энергия обладает свойством сохранения. Закон сохранения энергии заключается в том, что полная энергия замкнутой (изолированной) системы не изменяется во времени. В данной работе социально-экономическая система рассматривается как замкнутая равновесная стохастическая макроэкономическая система, элементами которой являются субъекты, осуществляющие экономическую деятельность. Замкнутость экономической системы означает не ее полную изоляцию от других систем, а ситуацию, когда внешняя экономическая среда не приводит к нарушению устойчивости внутренних социально-экономических процессов. Стохастический характер экономической системы означает случайный характер ее поведения, что совершенно очевидно, учитывая непредсказуемость таких экономических величин как курс валют, цены, спроса и т.д. В этом прослеживается аналогия экономических систем и таких физических систем как газы, которые можно описать только статистически, вводя средние показатели величин [8]. Таким образом, применение методов термодинамики в экономике позволяет представить социально-экономическую энергию, которая определяется работой по взаимодействию отдельных субъектов и предприятий в социально-экономической системе.

Одной из проблем, затрудняющей применение термодинамики в экономике, является понятие температуры. Целесообразно проводить корректировку еще одного параметра термодинамической системы — температуры — применительно к экономическим системам. Температурой называют физическую величину, которая указывает направление обмена энергией между частями замкнутой системы (от тела с большей температурой к телу с меньшей температурой) в случае, когда механические внешние условия, в которых находятся эти тела (например, их объемы), остаются неизменными. В данном определении подразумевается, что при равенстве температур и неизменных внешних условиях обмен энергией между телами прекращается, то есть устанавливается равновесие. Таким образом, температура характеризует равновесное состояние системы в целом или ее части. Неравновесные системы можно описывать с помощью температуры, если ее относить к отдельным компонентам системы. Следуя статистике Гиббса [9], температуру следует понимать как меру энергии внешней системы или среды, в которой она находится по отношению к изучаемой системе. Согласно первому закону термодинамики количество теплоты (Q), сообщаемое системе,

расходуется на изменение внутренней энергии системы (ΔU) и на совершение системой работы против внешних сил (A): $Q = \Delta U + A$.

Под аналогом теплоты в экономике следует понимать ту долю экономической энергии (работы), которая подвергается диссипации (рассеянию) в экономической среде и не способствует повышению качественных показателей системы — росту производства. Например, использование прибыли для излишнего личного потребления больше, чем это необходимо.

3. Оценка уровня социальной напряженности с использованием принципа Больцмана. Согласно принципу Больцмана, наиболее вероятное (равновесное) состояние системы — устойчиво. Следовательно, степень отклонения от наиболее вероятной функции F , описывающей какое-либо макроскопическое свойство системы, является мерой ее неравновесности (напряженности). Анализируя какую-либо функцию распределения от наиболее вероятного значения, можно констатировать степень неравновесности (напряженности) системы. Основная идея предлагаемого подхода заключается в разложении стохастического функционала $F(a, b, x)$ на наиболее вероятный функционал и его часть, характеризующую отклонение (флуктуацию) от этого значения.

$$F(a, b, x) = f(a, b, x) + d(a, b, x), \quad (1)$$

где $f(a, b, x)$ — наиболее вероятный стохастический функционал, определенный из теории вероятности или методом статистической физики, соответствующий наиболее устойчивому состоянию системы; d — отклонение от наиболее вероятного (равновесного) значения; x — независимая переменная; a, b — параметры распределения.

Равновесному состоянию замкнутой системы согласно второму закону термодинамики отвечает максимум энтропии, которую в естествознании обычно рассматривают как меру хаоса. Как известно, энтропия связана с вероятностью осуществления данного макроскопического состояния микросистемы. По Больцману, в изолированной системе возрастание энтропии ΔS связано с переходом системы из менее вероятного состояния W_1 в более вероятное W_2 . Для энтропии справедливо уравнение Больцмана:

$$\Delta S = k \ln\left(\frac{W_2}{W_1}\right), \quad (2)$$

где ΔS — изменение энтропии, в изолированной системе, $\Delta S \geq 0$; k — постоянная Больцмана.

Термодинамическая вероятность W или число микросостояний, в которых может находиться система:

$$W = \frac{N}{N_0}, \quad (3)$$

где N_0 — число микросостояний для данного макросостояния; N — общее число микросостояний, возможных в замкнутой системе при данных условиях. Тогда, после соответствующих преобразований, получим:

$$\Delta S = k \ln\left(\frac{N_2}{N_1}\right). \quad (4)$$

По аналогии со стохастическим функционалом (1) в экономических системах $F(\bar{X}, \sigma, X)$ является фактическим распределением доходов населения данной страны по данным государственной статистики, $f(\bar{X}, \sigma, X) = \frac{\Delta N}{N}$ — функция логнормального распределения доходов, $\delta(\bar{X}, \sigma, X)$ отклонение от логнормального распределения (мера социальной напряженности); X — уровень дохода; \bar{X}, σ — параметры распределения — среднее значение и дисперсия соответственно.

Наиболее вероятным распределением доходов населения, характеризующим равновесное состояние, является логнормальное распределение доходов, относительно которого рассчитывается показатель уровня социальной напряженности по дифференциации доходов населения, и который имеет четкое термодинамическое обоснование.

Рассмотрим замкнутую макроэкономическую систему с объемом прибыли V , отделенную от среды, в которой находится субъект экономической деятельности. Предположим, что эта система взаимодействует со средой путем обмена деньгами. Пусть число субъектов N . Выделим из этого количества группы близких по способности к обмену N_1, N_2, \dots, N_i , доля дохода которых C_1, C_2, \dots, C_i соответственно. Тогда:

$$N = \sum_{i=1}^n N_i, \quad (5)$$

где n — количество групп субъектов.

Введем еще одну характеристику сложных систем — функцию состояния субъекта, которую обозначим как финансовый потенциал $\Psi_i(V, C_i, N)$. При постоянном объеме дохода государства и числе субъектов экономики она является функцией одной переменной — дохода. Очевидно, изменение объема дохода одного субъекта dC_i вызовет соответствующее изменение функции состояния очень незначительно и составит $d\Psi_i$. Эта малая величина пропорциональна доле дохода субъекта:

$$dC_i = \gamma \cdot C_i \cdot d\Psi_i, \quad (6)$$

где γ — некоторая константа, зависящая от способа измерения финансового потенциала (например, курс валют). В дальнейших расчетах для удобства примем $\gamma=1$.

Разделим переменные и проинтегрируем:

$$\int_{C_0}^C \frac{dC}{C} = \gamma \int_{\Psi_0}^{\Psi} d\Psi. \quad (9)$$

Имеем:

$$\ln \frac{C}{C_0} = \gamma \cdot \Psi. \quad (10)$$

Интегрируя и разделяя переменные, получаем закон нормального распределения для финансовых потенциалов:

$$\frac{\Delta N}{N} = \frac{1}{\sigma \Psi_i \sqrt{2\pi}} \exp \left\{ - \left[\frac{\Psi_i - \bar{\Psi}}{\sigma \sqrt{2}} \right]^2 \right\}, \quad (11)$$

где Ψ_i и $\bar{\Psi}$ — финансовый потенциал субъектов, и средний финансовый потенциал для всех субъектов системы; σ — дисперсия доходов в пределах макросистемы.

Учитывая соотношение (2) получаем из (3) закон нормального, логарифмического распределения доходов (закон Парето):

$$\frac{\Delta N}{N} = \frac{1}{\sigma C_i \sqrt{2\pi}} \exp \left\{ - \left[\frac{\ln C_i - \ln \bar{C}}{\sigma \sqrt{2}} \right]^2 \right\}. \quad (12)$$

Полученное уравнение является законом логнормального распределения доходов в условиях равновесия и отклонение от него есть мера неравновесности экономической системы.

Наиболее вероятным распределением доходов населения, характеризующим равновесное состояние, является логнормальное распределение доходов, относительно которого рассчитывается показатель уровня социальной напряженности по дифференциации доходов населения, и который имеет четкое термодинамическое обоснование.

Расчет уровня социальной напряженности по дифференциации доходов δ_{ST} проводится в соответствии со следующей математической моделью:

$$\delta_{ST} = \sum_{j=1}^k |\hat{f}_j - f_j|, \quad (13)$$

где f_j — частота по фактическим данным по каждому году населения в j группе доходов (Табл. 3); \hat{f}_j — теоретическая частота по каждому году населения в j группе доходов. Рассчитывается по формуле:

$$\hat{f}_j = \frac{1}{\sigma X_j \sqrt{2\pi}} \exp \left\{ - \left[\frac{\ln X_j - \ln \bar{X}}{\sigma \sqrt{2}} \right]^2 \right\}, \quad (14)$$

где σ — математическое ожидание, рассчитываемое по формуле:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^k (\ln X_j - \ln \bar{X})^2 \cdot f_j}{\sum_{j=1}^k f_j}}, \quad (15)$$

где X_j — уровень дохода в j -ой группе дохода; \bar{X} — средний уровень дохода.

4. Программная реализация алгоритма. Описанный метод применения законов равновесной термодинамики в сложных социально-экономических системах лег в основу программной реализации оценки социальной напряженности Российской Федерации [10]. Разработанная информационная система предназначена для оценки и прогнозирования уровня социальной напряженности на различных уровнях управления — государство, регион, предприятие — с целью предотвращения возникновения конфликтных ситуаций.

Данное программное средство позволяет анализировать тенденции социальных конфликтов и вовремя вырабатывать меры, направленные на их предотвращение. Формирование необходимых управленческих воздействий для снижения социальной напряженности на основе повышения обоснованности и адекватности управленческих решений на региональном и государственном уровнях, способствует повышению стабильности общества, формированию справедливой социальной политики.

Информация, полученная из открытых источников, заносится в хранилище данных. В качестве входных данных используются данные из открытых источников (например, представленные в открытой базе данных Госкомстата) в формате: *.xls. На рисунке 1 показана взаимосвязь таблиц, входящих в физическую структуру данных информационной базы.

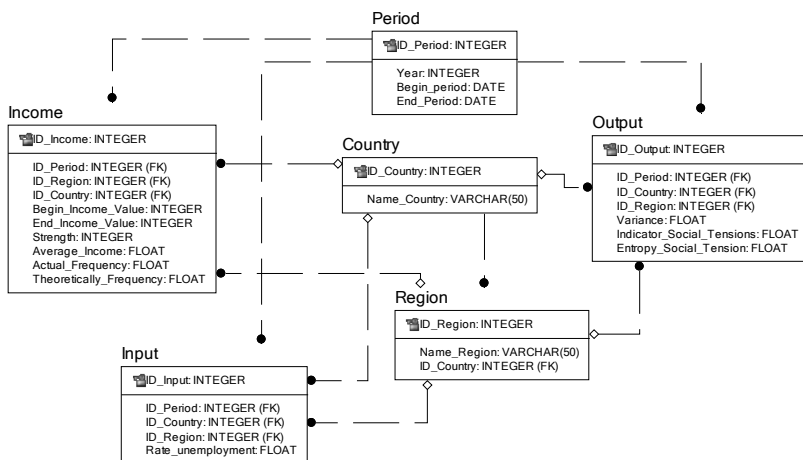


Рис. 1. Физическая структура данных информационной базы

В таблице 2 приведены наименование и обозначение таблиц, содержащих входные данные информационной базы.

Таблица 2. Наименование и назначение таблиц входных данных

Наименование	Назначение таблиц
Country	Справочник стран
Region	Справочник регионов (субъектов), входящих в страну
Period	Периоды времени, за который рассчитывается показатель социальной напряженности
Input	Входные данные за определенный период времени
Income	Уровень доходов населения за период времени разбитый на отдельные промежутки в денежном эквиваленте

Информационная система [11] позволяет автоматически рассчитывать предлагаемый индекс социальной напряженности по дифференциации доходов населения, а также индекс комплексной оценки социальной напряженности. На рисунке 2 представлена use-case диаграмма работы эксперта с описываемой информационной системой.

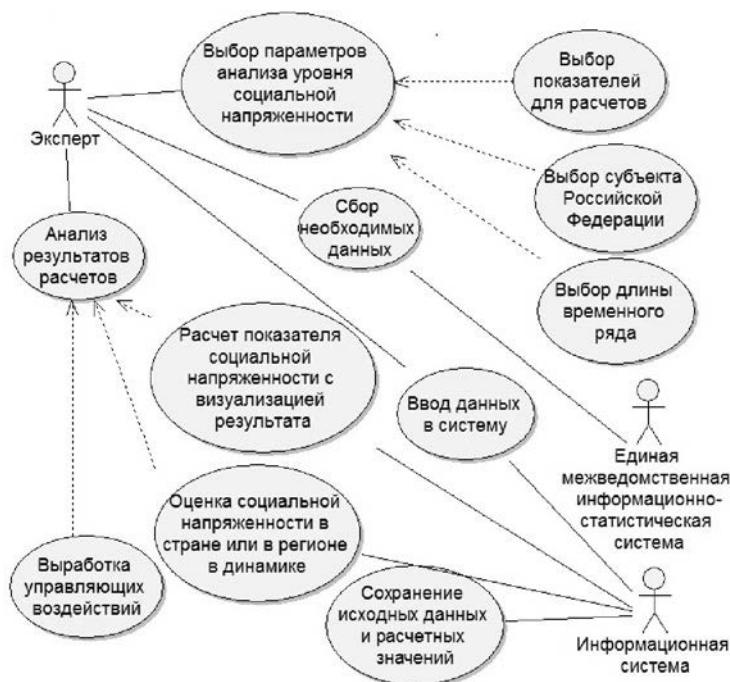


Рис. 2. Диаграмма процесса работы эксперта с информационной системой

Программная реализация состоит из трех логических блоков (модулей) по числу решаемых задач: модуля расчета параметров распределения доходов населения, модуля расчета показателя уровня социальной напряженности и модуля формирования отчетов для просмотра значений показателей в динамике.

В результате выполнения процедуры расчета социальной напряженности и энтропии формируется отчет, содержащий

показатели социальной напряженности с визуализацией результата (рисунок 3).

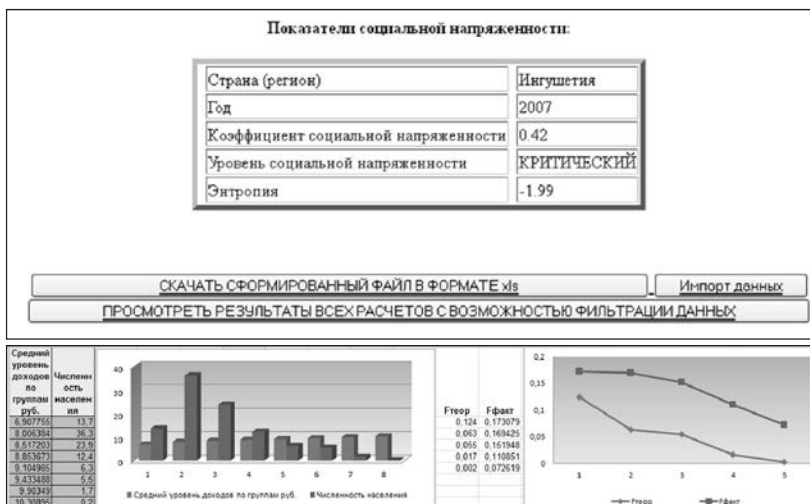


Рис. 3. Результат расчета показателей социальной напряженности

Рассмотрим пример расчета индекса социальной напряженности δ_{ST} в разработанной информационной системе для РФ. Исходные данные для расчетов приведены в таблице 3, результаты расчета δ_{ST} представлены в таблице 4 и на рисунке 4. В таблицу включены значения индекса Джини для возможности сравнения индексов.

Таблица 3. Исходные данные для расчетов

Доход X_j , рублей	Средний уровень дохода \bar{X}_j , рублей	Численность населения N, чел.	f_j
До 1500,0	750	1500000	0,01
1500,1-2500,0	2 000	5400000	0,04
2500,1-3500,0	3 000	8600000	0,06
3500,1-4500,0	4 000	10200000	0,07
4500,1-6000,0	5 250	15800000	0,11
6000,1-8000,0	7 000	19200000	0,14
8000,1-12000,0	10 000	28600000	0,20
Свыше 12000,0	13 500	51700000	0,37
Итого		141000000	1,00

Таблица 4 Индексы, характеризующие социальную напряженность

Год	δ_{ST}	Индекс Джини (www.gks.ru)
1995	1,26	0,387
1996	0,80	0,387
1997	0,58	0,390
1998	0,53	0,394
1999	0,62	0,400
2000	0,87	0,395
2001	0,54	0,397
2002	0,50	0,397
2003	0,66	0,403
2004	0,83	0,409
2005	0,96	0,409
2006	0,72	0,415
2007	0,90	0,422
2008	0,34	0,421
2009	0,41	0,421
2010	0,46	0,421
2011	0,45	0,417

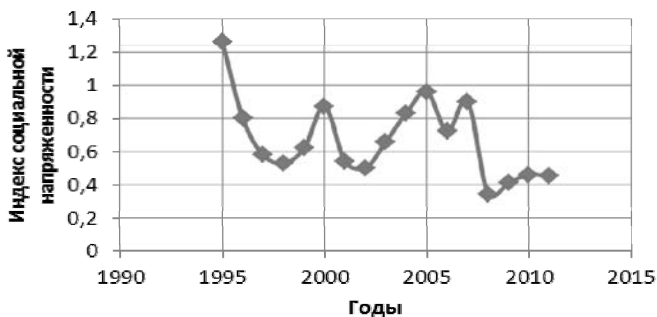


Рис. 4. График динамики индекса социальной напряженности Российской Федерации в 1995 – 2011 годы

Неустойчивость наблюдается с 1995 по 2001 годы, а также с 2004 по 2008, это подтверждается историческими данными – тогда в России происходили события, связанные с первой и второй Чеченской войной и нестабильностью государственного управления и экономическим кризисом в 2008 году. С приходом В.В. Путина в 2001 году наблюдается рост стабильности, который осложняется отдельными всплесками напряженности, связанными с мировым финансовым кризисом 2008 года. Таким образом, индикатор социальной напряженности Российской Федерации, полученные при

помощи программной реализации разработанной информационной модели, подтверждаются событиями, происходящими в стране в исследуемый период времени. Отличие значений предлагаемого индекса от значений известного индекса Джини обусловлено тем, что индекс социальной напряженности учитывает изменение всех доходных групп, а не только с наименьшими доходами и с наибольшими.

5. Заключение. Представление социальной напряженности существует как индикатор стабильности конкретной социальной системы и как объект управления. Детальное изучение особенностей ее роста, анализ тенденций проявления социальной активности в регионах современной России позволит прогнозировать протестную активность населения, выявлять актуальные для региона угрозы и риски, своевременно реагировать на нежелательные ситуации.

Разработанная система может быть полезна представителям государственных структур (например, Госкомстата) для выполнения расчетов и ведения базы данных по полученным показателям, сотрудникам службы безопасности (например, ФСБ) для подготовки мер безопасности в конфликтных ситуациях, а также политикам и экономистам, отвечающим за принятие решений в сфере регулирования распределения и перераспределения доходов населения. Данная система была создана в рамках выполнения проекта по государственному контракту от 10.10.2013 г. № 14.514.11.4113 ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2013 годы».

Таким образом, в работе описан метод применения законов равновесной термодинамики в сложных социально-экономических системах, в частности, для разработки методики расчёта индикатора социальной напряженности на основе данных из открытых источников с целью оценки вероятности возникновения гражданских волнений и войн. Кроме того, представлена информационная система, автоматизирующая расчет предлагаемого индекса оценки социальной напряженности по дифференциации доходов населения.

Литература

1. *Елисеева И.И.* Статистика: учебник для вузов // СПб.: Питер. 2012. 368 с.
2. *Богданов А.А.* Тектология. Всеобщая организационная наука. URL: <http://www.bogdinst.ru/bogdanov/glovely.htm> (дата обращения: 05.05.2015).
3. *Чижевский А.Л.* Земное эхо солнечных бурь // М. Мысль. 1976. 366 с.
4. *Разумихин Б.С.* Физические модели и методы теории равновесия в программировании и экономике // М. Наука. 1975. 304 с.

5. Бартоломью Д. Стохастические модели социальных процессов // М. Финансы и статистика. 1985. 295 с.
6. Всероссийская Интернет-конференция по проблемам экономифизики и эволюционной экономики. Доклады IV Интернет-конференции «Устойчивое развитие и целостность экономических систем» // URL: <http://www.bogdinst.ru/publ/conf.htm> (дата обращения: 05.05.2015).
7. Доломатов М.Ю. Об аналогии законов равновесной термодинамики в сложных экономических и природных системах // Актуальные проблемы методологии, философии науки и образования: Сборник трудов Международной научно-практической конференции. Москва-Уфа: Изд-во АТиСО. 2007. Т. 1. С. 43–48.
8. Доломатов М.Ю., Журавлева Н.А. Моделирование устойчивости социально-экономических систем на основе анализа доходов населения // Научные технологии. М. 2010. №2. С. 43–52.
9. Базаров И.П. Термодинамика. Учебник для вузов // М.: Высш. шк. 1991. 376 с.
10. Доломатов М.Ю., Мартынов В.В., Журавлева Н.А., Филосова Е.И., Ширяев О.В., Швецов О.В. Информационная система оценки и предсказания уровня социальной напряженности // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2013. № 4. С. 121–127.
11. Мартынов В.В., Доломатов М.Ю., Филосова Е.И., Журавлева Н.А., Швецов А.И., Ширяев О.В. Расчет социальной напряженности общества на основе данных из открытых источников с целью оценки вероятности возникновения гражданских волнений и войн (ГВиВ-Контроль) // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014610827. 2014.

References

1. Elisееva I.I. *Statistika: uchebnik dlja vuzov* [Statistics: a textbook for high schools]. SPb.: Piter. 2012. 368 p. (In Russ.).
2. Bogdanov A.A. *Tektologija. Vseobshhaja organizacionnaja nauka*. [Universal organizational science]. Available at: www.bogdinst.ru/bogdanov/glovely.htm (accessed 05.05.2015). (In Russ.).
3. Chizhevskij A.L. *Zemnoe jeha solnechnyh bur'*. [Earth echo of solar storms]. M., Mysl'. 1976. 366 p. (In Russ.).
4. Razumihin B.S. *Fizicheskie modeli i metody teorii ravnovesija v programirovanii i jekonomike* [Physical models and methods of the theory of balance in programming and the economy]. M. Nauka. 1975. 304 p. (In Russ.).
5. Bartolom'ju D. *Stohasticheskie modeli social'nyh processov*. [Stochastic models of social processes]. M. Finansy i statistika. 1985. 295 p. (In Russ.).
6. Vserossijskaja Internet-konferencija po problemam jekonofiziki i jevoljucionnoj jekonomiki. *Doklady IV Internet-konferencii «Ustojchivoe razvitie i celostnost' jekonomicheskich sistem»*. [All-Russian Internet conference on econophysics and evolutionary economics. Reports of the IV Internet-conference «Sustainable development and the integrity of the economic system»]. Available at: www.bogdinst.ru/publ/conf.htm (accessed 05.05.2015). (In Russ.).
7. Dolomatov M.Ju. [On the analogy of the law of equilibrium thermodynamics in a difficult economic and natural systems]. *Aktual'nye problemy metodologii, filosofii nauki i obrazovanija: Sbornik trudov Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii*. [Actual problems of methodology and philosophy of science and education: Proceedings of the International scientific and practical conference]. Moskva-Ufa: Izd-vo ATiSO, 2007. Issue 1. pp. 43–48. (In Russ.).

8. Dolomatov M.Ju., Zhuravleva N.A. [Modeling of sustainable socio-economic systems based on the analysis of household incomes]. *High Tech – Naukoemkie tehnologii*. M. 2010. vol. 2. pp. 43–52. (In Russ.).
9. Bazarov I.P. *Termodinamika. Uchebnik dlja vuzov*. [Thermodynamics. Textbook for high schools]. M.: Vyssh. shk. 1991. 376 p. (In Russ.).
10. Dolomatov M.Ju., Martynov V.V., Zhuravleva N.A., Filosova E.I., Shirjaev O.V., Shvecov O.V. [Information system for assessing and predicting the level of social tension] *Electrical and information systems and systems – Jelektrotehnicheskie i informacionnye komplekсы i sistemy*. 2013. vol. 4. pp. 121–127. (In Russ.).
11. Martynov V.V., Dolomatov M.Ju., Filosova E.I., Zhuravleva N.A., Shvecov A.I., Shirjaev O.V. [Calculation of social tensions society on the basis of data from open sources in order to assess the likelihood of civil unrest and war (GVIV control)]. Certificate of state registration of the computer number 2014610827. 2014. (In Russ.).

Мартынов Виталий Владимирович — д-р техн. наук, заведующий кафедрой экономической информатики, ФГБОУ ВПО Уфимский государственный авиационный технический университет, профессор кафедры экономической информатики, ФГБОУ ВПО Уфимский государственный авиационный технический университет. Область научных интересов: исследование операций, информационные технологии и системы. Число научных публикаций — 260. martynov@rb.ru, <http://www.ugatu.ac.ru>; ул. К. Маркса, 12, Уфа, 450000; р.т.: +7(347)2730822, Факс: +7(347)2724035.

Martynov Vitalij Vladimirovich — Ph.D., Dr. Sci., head of the economic informatics department, Federal state budgetary educational institution of higher professional education Ufa State Aviation Technical University, professor of economic informatics department, Federal state budgetary educational institution of higher professional education Ufa State Aviation Technical University. Research interests: operations research, information technologies and systems. The number of publications — 260. martynov@rb.ru, <http://www.ugatu.ac.ru>; 12, K. Marksa street, Ufa, 450000, Russia; office phone: +7(347)2730822, Fax: +7(347)2724035.

Доломатов Михаил Юрьевич — д-р хим. наук, профессор, профессор кафедры экономической информатики, ФГБОУ ВПО Уфимский государственный авиационный технический университет, заведующий научно-исследовательской лабораторией "Физика электронных процессов и наноматериалов", ФГБОУ ВПО Уфимский государственный университет экономики и сервиса, профессор кафедры электронных процессов, ФГБОУ ВПО Башкирский государственный университет. Область научных интересов: моделирование сложных систем с хаосом состава, электронная спектроскопия, квантовая механика, нефтепереработка, молекулярная электроника, медицина, физика, экология, нанотехнологии, астрофизика, нефтехимия. Число научных публикаций — 850. dolomatov@gmail.com; ул. Кирова, д. 99 корпус 1, кв. 51, Уфа, 450000; р.т.: 8-917-429-44-63.

Dolomatov Mihail Jur'evich — Ph.D., Dr. Sci., professor, professor of economic informatics department, Federal state budgetary educational institution of higher professional education Ufa State Aviation Technical University, head of scientific-research laboratory "Physics of electronic processes and nanomaterials", Federal state budgetary educational institution of higher professional education Ufa State University of Economics and Service, professor of physical electronics and nanophysics department, Federal state budgetary educational institution of higher professional education, Bashkir State University. Research interests: modeling of complex systems with chaos composition, electron spectroscopy, quantum mechanics, oil refining, molecular electronics, medicine, physics, ecology, nanotechnology, astrophysics,

petrochemicals. The number of publications — 850. dolomatov@gmail.com; 99, Kirov Str., building 1, apt. 51, Ufa, 450000, Russia; office phone: 8-917-429-44-63.

Журавлева Надежда Александровна — к-т техн. наук, доцент кафедры экономической информатики, ГБОУ ВПО Уфимский государственный авиационный технический университет, заместитель по научной части заведующего научно-исследовательской лабораторией "Физика электронных процессов и наноматериалов", ФГБОУ ВПО Уфимский государственный университет экономики и сервиса. Область научных интересов: математическое моделирование, исследование сложных систем с хаосом состава, социально-экономические системы, ресурсы межзвездной среды. Число научных публикаций — 47. Zhuravliova80@mail.ru; ул. Ленина, д.63, кв.24, Уфа, 450006; п.т.: 8-919-158-70-48.

Zhuravleva Nadezhda Aleksandrovna — Ph.D., associate professor of economic informatics department, Federal state budgetary educational institution of higher professional education Ufa State Aviation Technical University, deputy for scientific part of head of scientific-research laboratory "Physics of electronic processes and nanomaterials", Federal state budgetary educational institution of higher professional education Ufa State University of Economics and Service. Research interests: mathematical modeling, the study of complex systems with chaos composition, socio-economic systems, the resources of the interstellar medium. The number of publications — 47. Zhuravliova80@mail.ru; 63, Lenin street, apt.24, Ufa, 450006, Russia; office phone: 8-919-158-70-48.

Филосова Елена Ивановна — к-т техн. наук, доцент кафедры экономической информатики, ФГБОУ ВПО Уфимский государственный авиационный технический университет. Область научных интересов: проектирование ИС, образовательные технологии, онтологии. Число научных публикаций — 113. filosova@yandex.ru; ул. Набережная р. Уфы, д.47\1, кв.5, Уфа, 450105; п.т.: +7 (927) 635-89-70.

Filosova Elena Ivanovna — Ph.D., associate professor of economic informatics department, Federal state budgetary educational institution of higher professional education Ufa State Aviation Technical University. Research interests: information systems, educational technologies, ontologies. The number of publications — 113. filosova@yandex.ru; 47\1, Naberezhnaja r. Ufy, apt.5, Ufa, 450105, Russia; office phone: +7 (927) 635-89-70.

Закиева Елена Шавкатовна — к-т техн. наук, доцент, доцент кафедры технической кибернетики, ФГБОУ ВПО Уфимский государственный авиационный технический университет. Область научных интересов: моделирование социально-экономических систем, качество жизни, информационные технологии. Число научных публикаций — 80. zakievae@mail.ru; ул. К.Маркса, 12, Уфа, 450000; п.т.: +79625235385.

Zakieva Elena Shavkatovna — Ph.D., associate professor, associate professor of technical cybernetics department, Federal state budgetary educational institution of higher professional education Ufa State Aviation Technical University. Research interests: modeling of socio-economic systems, quality of life, information technology. The number of publications — 80. zakievae@mail.ru; 12, K. Marksa street, Ufa, 450000, Russia; office phone: +79625235385.

Поддержка исследований. Работа выполнена при финансовой поддержке ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2013 годы» (ГК № 14.514.11.4113).

Acknowledgements. The work was supported by the Federal Target Program "Research and development on priority directions of scientific-technological complex of Russia for 2007-2013" (GC № 14.514.11.4113).

РЕФЕРАТ

Доломатов М.Ю., Мартынов В.В., Журавлева Н.А., Филосова Е.И., Закиева Е.Ш. **Информационная система расчета социальной напряженности общества на основе применения законов равновесной термодинамики.**

В данной статье описывается метод применения законов равновесной термодинамики в сложных социально-экономических системах, в частности, для разработки методики расчёта индикатора социальной напряженности с целью оценки вероятности возникновения гражданских волнений и войн. Объектом исследований являлись методика расчёта индикатора социальной напряженности с использованием принципа Больцмана. Основная идея предлагаемого подхода заключается в разложении стохастического функционала на наиболее вероятный функционал и его часть, характеризующую отклонение (флуктуацию) от этого значения. Наиболее вероятным распределением доходов населения, характеризующим равновесное состояние, является логнормальное распределение доходов, относительно которого рассчитывается показатель уровня социальной напряженности по дифференциации доходов населения.

На основе описанного метода был создан с программный инструментарий, направленный на оперативную диагностику уровня конфликтности в обществе (на примере Российской Федерации) на основе данных из открытых источников. Рассмотрены модели, основные возможности и пример работы данной информационной системы.

SUMMARY

Dolomatov M.Y., Martynov V.V., Zhuravlev N.A., Filosova E.I., Zakiyeva E.Sh. **Information System for Social Dissatisfaction Calculating Based on Application of the Law of Equilibrium Thermodynamics.**

This article describes a method of applying the laws of equilibrium thermodynamics in complex socio-economic systems, in particular for the development of a methodology of calculation of social tension indicators in order to assess the likelihood of civil unrest and war. The object of research is the method of calculation of the social tension indicator with the principle of Boltzmann. The basic idea of the proposed approach is the expansion of stochastic functional on the most probable functional and part of it, characterizing the deviation (fluctuation) of this value. The most probable distribution of income, characterizing the equilibrium state, is a lognormal distribution of income, relative to which the indicator of the level of social tension on the income differentiation is calculated.

Based on this method software tools has been created, which is aimed at rapid diagnosis of the level of conflict in the society (for example, the Russian Federation) on the basis of data from open sources. The models of the information system, its basic features and an example of its operation are discussed.

С.В. МИКОНИ
**СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ
ОПТИМИЗАЦИИ НА КОНЕЧНОМ МНОЖЕСТВЕ
АЛЬТЕРНАТИВ**

Микони С.В. Системный анализ методов многокритериальной оптимизации на конечном множестве альтернатив.

Аннотация. Трактовка функций, применяемых различными методами оптимизации, ожидаемой полезностью, естественной для принятия решений, позволила выделить две группы методов – критериального и функционального выбора. Первые устанавливают предпочтения на значениях критериев, а вторые – на значениях функций, отражающих предпочтения на шкалах признаков. Роль видовых отличий отведена шкалам, в которых измеряются признаки. Такая трактовка функций, не зависящая от способа их создания, позволила рассматривать методы многокритериальной оптимизации и многомерной полезности с единых позиций. К группе методов функционального выбора отнесен и метод анализа иерархий, использующий функции приоритетов, вычисляемые на основе матриц парных сравнений. Полученная система методов позволяет сопоставлять их по качеству и оценивать эффективность решения конкретных задач.

Ключевые слова: оптимизация, классификация, целевой критерий, ограничительный критерий, критерий превосходства, критерий соответствия, целевое значение признака, нормирующая функция, функция отклонения от цели, функция полезности.

Mikoni S.V. System Analysis of Multi-criteria Optimization Methods on a Finite Set of Alternatives.

Abstract. The functions used by different optimization methods are interpreted with expected utility viewpoint. It makes possible to distinguish two groups of methods - criterion and functional choice ones. The first group of methods sets preferences on the values of the criteria, and the second - on the values of the functions presenting the preferences of decision maker on the scales of attributes. Such an interpretation of functions that does not depend on how they are created, allowed considering methods of multi-criteria optimization and multi-dimensional utility from unified positions. The analytic hierarchy process uses the priority function calculated based on the matrix of pairwise comparisons. So, it is related to the group of methods of functional choice too. The resulting system allows one to compare their methods for quality and evaluate the effectiveness of tasks solving.

Keywords: optimization; classification; target criterion; constraint criterion; the criterion of predominance; the criterion of correspondence; a normalizing function; the function of the deviation from the target; the utility function.

1. Введение. Трудно представить, чтобы методы, имеющие единое назначение, не имели сходства. А именно сходство лежит в основе любой систематизации. Между тем, до сих пор различные направления теории принятия решений развивались изолированно, а их приверженцы претендовали на всеобщность своих подходов [1-3]. Это, тем более, неприемлемо для науки, в которой теоретически лучшие по всем критериям объекты называются идеальными, а теоретически худшие по всем критериям – антиидеальными [4]. Очевидно, что и те и другие

могут рассматриваться только как возможные исключения. Подобно этим объектам каждый известный метод также не может претендовать на идеальность.

Проблему соотношения моделей по качеству решает квалиметрия – наука о качестве моделей [5]. Отправным пунктом для оценивания качества модели является модель задачи, объединяющая модель-прототип и модель метода. Качество модели-прототипа оценивается степенью ее соответствия особенностям решаемой задачи [6]. Отражаемые моделью свойства образуют группу критериев «Адекватность», количественно характеризующую степень соответствия модели решаемой задаче.

Другую группу образуют критерии, отражающие эффективность метода. Она выражается через соотношение производительности и потребляемых ресурсов. Теоретически производительность оценивается вычислительной сложностью метода, а практически – временем его реализации. Машинные ресурсы оцениваются объемом потребляемой памяти компьютера, а человеческие ресурсы – объемом предпочтений ЛПР и экспертов.

Качество получаемого результата оценивается его достоверностью (точностью, доверительной вероятностью, коэффициентом уверенности и пр.).

Перечисленные критерии качества позволяют находить наиболее эффективные области применения каждого метода. Условием решения этой проблемы является сопоставимость методов. Она устанавливается через сходство и различие методов, определяемое с применением системного анализа соответствующей области знания. Установлению сходства препятствует различие в терминах, применяемых в разных группах методов. Так, например, в теории полезности не употребляется термин «критерий» по той причине, что функция полезности, создаваемая на основе предпочтений экспертов, не отвечает аксиомам критерия превосходства.

Объединение методов теории принятия решений в единую систему и является целью данной работы. В ней мы ограничимся рассмотрением методов многокритериального выбора на конечном множестве альтернатив.

2. Формальная модель критерия. Критерий является ключевым понятием при выявлении сходства и различия методов многокритериальной оптимизации. Поэтому залогом успешной систематизации этих методов является формализация понятия «критерий». Она была предложена в [7]. Обоснуем эту модель.

Нахождение лучшего объекта – это только словесно сформулированная цель задачи оптимизации. Само понятие «цель» неоднозначно. Оно имеет различный смысл: от цели-намерения (*purpose*) до цели-задания или плана (*target*). При формулировании понятия «критерий» будем исходить именно от конкретной цели-плана (*target*).

Одним из значений греческого слова *κριτηριου* (*kriterion*) является «мерило». В этом смысле критерий можно рассматривать как *цель, измеряемую в некоторой шкале*.

Математически *шкала* описывается как кортеж $\langle X, Y, f \rangle$ определяющий знаковую систему Y и отображение f , ставящее в соответствие объектам из некоторого множества X тот или иной элемент знаковой системы $Y: f: X \rightarrow Y$. Назовем $y \in Y$ *делением* шкалы. Оно является значением функции $y=f(x)$, $x \in X$. Шкалы принято классифицировать по типам измеряемых данных, которые определяют допустимые для данной шкалы математические преобразования, а также типы отношений, отображаемых соответствующей шкалой. Для получения линейного порядка на множестве объектов деления шкалы (знаки) тоже должны быть упорядочены, так как предпочтения на множестве объектов определяются на основе предпочтений на делениях шкалы.

Отношение предпочтения требует установления порядка на множестве Y_j . Если Y_j – множество чисел, то они упорядочиваются по величине. После установления порядка численная шкала j -го признака p_j , $j = \overline{1, n}$, может быть представлена диапазоном чисел $[y_{j,\min}, y_{j,\max}]$, где $y_{j,\min}$ – нижняя граница, а $y_{j,\max}$ – верхняя граница шкалы, т.е.

$$y_{j,\min} = \inf_{x \in X} f_j(x) \text{ и } y_{j,\max} = \sup_{x \in X} f_j(x).$$

В задаче однокритериальной оптимизации цель-план выбирается на границах $y_{j,\min}$ и $y_{j,\max}$ шкалы j -го признака, либо минимальной, либо максимальной, что выражается соответственно оценочными (целевыми) функциями $f_j(x) \rightarrow \min$ и $f_j(x) \rightarrow \max$. Решение такой задачи находится на соответствующей границе шкалы.

В отличие от классической задачи оптимизации задача многокритериального выбора, как правило, не ограничивается поиском лучшего объекта. При нахождении рейтинга объектов каждый из них подлежит оцениванию относительно целевого значения шкалы. Поскольку оно доступно только лучшему объекту, остальные объекты должны оцениваться *близостью* к цели, что требует определения меры достижения цели. Для них граница шкалы является *идеальной* (недостижимой) целью.

Многокритериальный выбор основывается на нахождении компромисса между противоречивыми требованиями. Например, покупа-

телю квартиры хотелось бы иметь большую площадь. Но при ограниченных средствах он вынужден минимизировать цену квартиры и стоимость ее содержания. При этих условиях из списка квартир будет выбрана квартира не с самой большой площадью.

Можно пойти и другим путем. Пусть площадь предлагаемых для продажи квартир ограничивается интервалом [50, 200] квадратных метров. Из расчета минимально необходимой площади и ограничений в финансах покупатель может задаться интервальным требованием [60, 70] к площади квартиры. Такая цель косвенно учитывает финансовые ресурсы ЛПР. Назовем ее *реальной* (достижимой для ЛПР) целью.

Согласно примеру с площадью квартиры реальной цели $y_{j,\min} < c_j < y_{j,\max}$ соответствует не граничное, а промежуточное значение шкалы признака. Поскольку *целевая функция* устремляет решение к границе своей области определения, она непригодна для отражения стремления к реальной цели. Модель оценивания близости объектов к реальной цели c_j требует использования ее в качестве базы сравнения. В качестве такой модели будем использовать двухместный предикат бесконечнозначной логики:

$$Pr_{\geq}(f_j(x), c_j). \quad (1)$$

Первым аргументом предиката является значение $y_j=f_j(x)$, которое характеризует объект x по j -му свойству (признаку), а вторым аргументом – измеряемое в той же шкале целевое значение c_j этого признака. Предикат воспринимает первый аргумент как *оцениваемое* свойство объекта, а второй аргумент – как *базу сравнения*.

В отличие от предиката двоичной логики со значениями «Истина» (1) и «Ложь» (0) предикат бесконечнозначной логики позволяет количественно оценить меру достижения цели в долях единицы или в процентах, например, для объекта x цель по признаку p_j выполнена на 80%: $Pr_{\geq}(f_j(x), c_j)=0,8$. Значение признака, не достигшее целевого значения, может рассматриваться как *частичное достижение* цели.

Совпадение целевого значения c_j в зависимости от вида предпочтения с одной из границ шкалы $[y_{j,\min}, y_{j,\max}]$ рассматривается как важный частный случай. Так, например, максимизации j -го признака соответствует предикат $Pr_{>}(f_j(x), y_{j,\min})$, в котором $c_j=y_{j,\min}$. В оптимизационных задачах этому случаю соответствует целевая функция $f_j(x) \rightarrow \max$ (Предикат, отражающий целевую функцию, логично назвать *целевым* критерием.).

Реальная цель по j -му признаку задается внутри шкалы $[y_{j,\min}, y_{j,\max}]$: $y_{j,\min} < c_j < y_{j,\max}$. Ограничение «снизу» представляется предикатом

$\geq(f_j(x), c_j)$, а «сверху» – предикатом $\leq(f_j(x), c_j)$. Этими предикатами так же, как и *целевым* критерием, задается направленность предпочтения, что дает формальное основание критерию этого типа называть *ограничительными* (В классических задачах оптимизации они именуется *ограничениями*). Содержательно ограничения играют роль критериев в задаче формирования области допустимых альтернатив, которая относится к задачам выбора. Отношение превосходства объекта x_i над объектом x_k по j -му признаку описывается предикатом *превосходства* $\succ(f_j(x_i), f_j(x_k))$ с $f_j(x_k)$ в роли базы сравнения. При количественных оценках j -го признака оно выражается *ограничительными* критериями «снизу» или «не менее» (\geq) и «сверху» или «не более» (\leq).

Точечный и интервальный ограничительные критерии представляются предикатами *соответствия*: $Pr_{\leq}(f_j(x), c_j)$ и $Pr_{\geq}(f_j(x), c_{j,n}, c_{j,v})$. Интервальное задание цели можно рассматривать как *класс* ее допустимых значений. В том случае, когда на шкале признака задается $m > 1$ целей, решается задача *классификации*. Из множества H классов выбирается класс $h_k \in H$, которому объект x_i принадлежит в наибольшей степени. Степень принадлежности k -му классу на шкале j -го признака представляется функцией $\lambda_{j,k}(x) \leq 1$.

Поскольку критерий представляет собой составное понятие, включающее *признак*, *цель* и *отношение* между ними, отдельному рассмотрению может

подвергаться любое из составляющих понятий. Например, при определении шкалы измерения отдельно можно рассматривать признак. Часто в качестве критерия используется только имя оцениваемого признака (свойства) альтернативы, подразумевая, что цель и направленность предпочтения известны по умолчанию.

Учитывая тот факт, что в задачах выбора критерий отражает *отношение предпочтения*, он удовлетворяет двум аксиомам сопоставления объектов:

$$1. (A \succ B) \Leftrightarrow f(A) > f(B) \vee (B \succ A) \Leftrightarrow f(B) > f(A) \vee (A \equiv B) \Leftrightarrow f(A) = f(B).$$

$$2. f(A) \succ f(B) \wedge f(B) \succ f(C) \Rightarrow f(A) \succ f(C).$$

Первая аксиома утверждает, что, либо одна альтернатива *предпочтительнее* другой, либо они *равноценны*, и эти отношения могут быть определены по характеризующему их свойству f .

Вторая аксиома устанавливает транзитивность отношений предпочтения, в том числе относительно свойства f .

Для критерия превосходства должно выполняться условие монотонного роста (убывания) предпочтительности объекта при увели-

чении значений j -го показателя y_j при фиксированных значениях остальных $n-1$ показателей, $k \neq j$.

Помимо количественной трактовки понятие «мерило» допускает и *логическую* трактовку. Она является более примитивной, поскольку сводит количественную оценку объекта x к анализу присутствия у него (или отсутствия) некоторого свойства f_j , что соответствует проверке истинности предиката $\text{Pr } f(f_j(x), c_j) = \text{true} (\text{false})$ – «истина» («ложь»). Естественно, что в этом случае оптимизационная задача преобразуется в задачу исчисления высказываний и логического вывода. На применении этого аппарата основан *логический* поиск решения, реализуемый экспертными системами различного назначения.

Таким образом, в расширенной трактовке критерий рассматривается как средство не только количественного, но и логического *сопоставления* объектов. Это позволяет выражать его через *измеренную* модель цели, а в задачах принятия решений – интерпретировать *решающим правилом*.

Строго говоря, критерий и правило – это не одно и то же. Подобно тому, как функция может вычисляться с применением *различных* алгоритмов, оценивание объекта по критерию может осуществляться *различными* способами. В этом смысле правило трактуется как *алгоритм оценивания* альтернативы.

Предложенная в работе [7] модель критерия является универсальной и может применяться к любой задаче оптимизации.

3. Связь с методами оптимизации. В рамках предложенной модели критерия представляет интерес сопоставить методы многокритериальной оптимизации на конечном множестве альтернатив с общей задачей оптимизации.

Под *оптимизацией* понимается нахождение наилучшего объекта в n -мерном пространстве переменных. Задача оптимизации в n -мерном пространстве переменных формулируется следующим образом [8].

Требуется найти вектор $\mathbf{x}^* = (x_1^*, \dots, x_j^*, \dots, x_n^*)^T$, доставляющий минимум (максимум) функции $y = f(\mathbf{x})$ с заданной точностью ε , используя численный метод решения. Здесь $\mathbf{x} \in R^n$.

Как правило, область допустимых значений D задается. Тогда задача формализуется *целевой функцией* в области *допустимых значений* D :

$$f(\mathbf{x}) \rightarrow \min_{\mathbf{x} \in D}, \quad f(\mathbf{x}) \rightarrow \max_{\mathbf{x} \in D} \quad (2)$$

Область допустимых значений D определяется системой линейных или нелинейных ограничений, накладываемых на компоненты вектора \mathbf{x} :

$$D = \{ \mathbf{x} \mid q_j(x) \leq \overline{q_j}, j = \overline{1, n} \} \quad (3)$$

В реальных задачах *ограничения* на область возможных значений переменных модели отсутствуют чрезвычайно редко, потому что, как правило, переменные бывают связаны с некоторым ограниченным ресурсом. Но все-таки с задачами без ограничений сталкиваются. Это бывает в условиях «неограниченных» ресурсов или при наличии условий, не накладывающих ограничений на переменные задачи. В таком случае имеет место *безусловная* задача, т.е. задача без ограничений:

$$f(\mathbf{x}) \rightarrow \min_{\mathbf{x}}, \quad f(\mathbf{x}) \rightarrow \max_{\mathbf{x}} \quad (4)$$

Отсутствие *количественных* ограничений на используемые ресурсы не означает отсутствие *качественных* ограничений на вид целевой функции и типы переменных.

Функция может быть *линейной* и *нелинейной*. Нелинейная функция может быть *монотонной* и *немонотонной*. Немонотонная функция может быть *выпуклой* (унимодальной) и *невыпуклой*.

К переменным могут предъявляться требования дискретности или непрерывности, не отрицательной величины и т.п.

Для каждого класса задач существуют различные методы поиска решения. Большинство применяемых на практике методов решения задач оптимизации являются *итеративными*.

В основу этих методов положен механизм порождения последовательности точек $\mathbf{x}^0, \mathbf{x}^1, \dots, \mathbf{x}^k, \mathbf{x}^{k+1}, \dots$ по правилам, которые определены в соответствии с выбранным методом решения и обладают следующими свойствами:

- $\mathbf{x}^* = \lim_{k \rightarrow \infty} \mathbf{x}^k$
- $f(\mathbf{x}^{k+1}) < f(\mathbf{x}^k), k=0,1,2,\dots$

Общее правило построения последовательности $\mathbf{x}^0, \mathbf{x}^1, \dots, \mathbf{x}^k, \mathbf{x}^{k+1}, \dots$ численными методами безусловной оптимизации записывается в виде:

$$\mathbf{x}^{k+1} = \mathbf{x}^k + \alpha_k \cdot \mathbf{p}^k, \quad k = 0, 1, \dots \quad (5)$$

Такие методы, как это принято говорить, используют *алгоритмы спуска*. Здесь \mathbf{x}^0 – *начальная точка поиска*, \mathbf{p}^k – *принятое направление*.

ние перехода из точки \mathbf{x}^k в точку \mathbf{x}^{k+1} , которое называется направлением спуска, α_k – числовой множитель, определяющий величину шага.

Если целевая функция задачи оптимизации отвечает модели целевого критерия, реализующего идеальную цель, то переменные целевой функции не отвечают требованиям критерия. Действительно, изначально у них отсутствуют частные цели. Однако в процессе реализации алгоритма поиска выбранной на некотором шаге итерации переменной задается направление и величина шага. Это назначение, задаваемое алгоритмом поиска, можно трактовать как частную цель оптимизации. Таким образом, поиск экстремума функции n переменных можно рассматривать как многокритериальную задачу с внутренними локальными целями в отличие от задач многокритериального выбора, в которых локальные цели задаются изначально и извне – лицом, принимающим решение (ЛПР).

Что касается задачи поиска экстремума функции n переменных в области допустимых значений D , то эти ограничения, как частные цели, задаются в задачах математического программирования не отдельным переменным, а всей их совокупности. Количество ограничений такого вида определяется разновидностью имеющихся ресурсов.

4. Методы оптимизации и классификации. В настоящее время в теории принятия решений сформировались следующие группы методов многокритериального выбора на конечном множестве альтернатив:

- 1) методы доминантного анализа (Dominance analysis),
- 2) методы многокритериальной оптимизации с ограничениями (Multiobjective optimization with constraints),
- 3) методы многокритериальной оптимизации с взвешенными отклонениями от цели (Multiobjective optimization by weighted deviations),
- 4) методы вычисления приоритетов на основе парных сравнений (Pairwise prioritization),
- 5) методы многоатрибутной оптимизации по полезности (Utility-based multiattribute optimization),
- 6) методы многокритериальной классификации (Multicriteria classification).

Системообразующим признаком, объединяющим методы оптимизации и классификации в единую систему, является применяемый вид предпочтения. Видовыми отличиями этого признака являются отношения превосходства (\geq , \leq) и соответствия классам ($=$, $[]$). Методы оптимизации реализуют отношение превосходства на множестве

векторных оценок объектов, а методы классификации реализуют отношение *соответствия* классам.

Целью методов оптимизации является нахождение наилучшей альтернативы и упорядочение относительно нее остальных альтернатив. Целью методов классификации является нахождение *класса*, в наибольшей степени соответствующего предъявляемой альтернативе. Различаемые по качеству классы включают нефиксированное множество альтернатив. Таким образом, индивидуальное упорядочение объектов заменяется определением степени их принадлежности упорядоченным классам.

В реальных задачах выбора имеет место смешанное применение этих отношений. В задачах оптимизации оно влечет получение нестрогого порядка объектов, а в задачах классификации – индивидуальное упорядочение объектов относительно степени принадлежности упорядоченным по качеству классам [9]. Поэтому в общем случае отношения превосходства и соответствия объединяются в отношении нестрогого предпочтения: $R_{\geq} = R_{>} \cup R_{=}$.

5. Методы многокритериальной оптимизации. Как следует из предыдущего раздела, системообразующим признаком методов многокритериальной оптимизации на конечном множестве альтернатив является *отношение превосходства*. Измерение предпочтения превосходства требует применения как минимум качественной шкалы. Это объясняется тем, что в словесных значениях этой шкалы заложен очевидный смысл превосходства. Качественная шкала необходима и достаточна для *логического анализа* предпочтений, который заключается в определении истинности двоичного предиката $>(f_j(x_i), f_j(x_k))$ на шкале j -го признака. Если он ложен, то k -й объект предпочтительнее или равнозначен i -му объекту по j -му свойству. Логический анализ положен в основу метода вербального анализа решений (ВАР), предложенного О.И. Ларичевым. При подходе ВАР на первое место ставится точность *содержательного* описания проблемы, а не точность количественного измерения параметров [4].

Модель предпочтений, создаваемая для реализации методов критериального выбора, включает следующие уровни [10]:

- I. Отношение предпочтения на значениях каждого критерия.
- II. Отношение предпочтения на множестве критериев.
- III. Отношение предпочтения на множестве значений всех критериев.

Первый уровень модели достаточен для реализации отношения Парето-доминирования. Однако отношение Парето-доминирования позволяет установить линейный порядок только в вырожденном слу-

чае использования одного критерия. Для получения линейного порядка при использовании нескольких критериев требуется реализовать второй и третий уровень модели. Увеличение числа критериев влечет нелинейный рост объема экспертных предпочтений, требуемых для выполнения многокритериальной оптимизации. Таким образом, оборотной стороной применения простого математического аппарата в методах критериального выбора является быстрое увеличение объема экспертных предпочтений с ростом числа критериев.

Уменьшение объема экспертных предпочтений осуществляется путем преобразования векторных оценок объектов в скалярные (числовые) оценки. Эту роль выполняют обобщающие (синтезирующие) функции. Для вычисления значений обобщающей функции ее аргументы должны измеряться в одной шкале. Но признаки, характеризующие объект, как правило, измеряются в разных шкалах с разными единицами измерения (физическими, денежными и пр.). Поэтому их значения необходимо привести к общей шкале. Общая для всех признаков шкала должна удовлетворять двум требованиям:

- 1) измеряться в относительных единицах;
- 2) иметь фиксированные границы шкалы.

Относительные единицы измерения и фиксированные границы шкалы позволяют выполнять над аргументами обобщающей функции любые арифметические операции. Областью определения функции j -го признака является интервальная или балльная шкала, характеризуемая границами $[y_{j,\min}, y_{j,\max}]$, $j = \overline{1, n}$, а область значений функции измеряется в шкале $[0, 1]$, отвечающей указанным требованиям.

Скаляризация векторных оценок исключает необходимость в реализации третьего уровня модели многокритериального выбора, но требует выбора типа *обобщающей функции* и *функций*, отображающих значение каждого признака в шкалу $[0, 1]$. Эти функции не могут воспроизвести предпочтения между значениями всех критериев, формируемые экспертом. Мера несоответствия между ними и является платой за автоматизацию ручного труда. Но ручной труд практически невозможен при решении задач со многими значениями критериев в условиях дефицита экспертов и времени на создание модели.

Многокритериальное оценивание объектов не по значениям критериев, а по поставленным им в соответствие функциям знаменует переход от методов критериального выбора к методам функционального выбора. Системообразующим признаком, объединяющим эти группы методов, является *шкала*, применяемая для реализации предпочтений ЛПР. Она принимается за основание деления с видовыми отличиями *качественной* и *абсолютной* шкалы. Первому видовому

отлично соответствуют методы *критериального* выбора, а второму – методы *функционального* выбора.

6. Методы критериального выбора. К типичным представителям этих методов относятся упорядочение объектов на основе отношения Парето-доминирования, лексиминная и лексикографическая оптимизация, вербальный анализ решений (ВАР).

Перечисленные методы критериального выбора делятся на две группы по отношению к важности критериев: *не учитывающие* и *учитывающие* важность критериев. К представителям первой группы относятся отношение Парето-доминирования и лексиминная оптимизация. К представителям второй группы относятся лексикографическая оптимизация и методы вербального анализа решений.

Как было отмечено ранее, отношение Парето-доминирования использует только первый уровень предпочтений ЛПР. Отсутствие предпочтений второго уровня предполагает независимость критериев по важности. Этому же условию отвечает лексиминная оптимизация [11]. Однако в ней отношении Парето-доминирования предшествует переупорядочивание компонент в векторных оценках объектов в направлении *убывания их качества*. Это влечет игнорирование индивидуальности критериев. Таким образом, признаком, обобщающим эти методы, является *безразличие к важности* критериев, а видовыми отличиями методов являются соответственно *исходные* и *упорядоченные по качеству* векторные оценки объектов.

В отличие от двух рассмотренных методов лексикографическая оптимизация использует дополнительно второй уровень предпочтений ЛПР, а именно, *различную важность* критериев. Методы ВАР, основанные на создании единой шкалы изменения качества (ЕШИК), используют все три уровня предпочтений ЛПР. Признаком, обобщающим эти методы, является *детальность предпочтений*, а видовыми отличиями методов являются соответственно предпочтения на *множестве критериев* и на *множестве значений всех критериев*. Графически классификация основных методов критериального выбора (МКВ) изображена на рис. 1.

7. Методы функционального выбора. Методы этой группы объединяет *оценивание объектов по значениям функций*, поставленных в соответствие шкалам признаков. Функцию, отображающую шкалу признака в единую шкалу, назначает эксперт, руководствуясь соображениями ценности или полезности делений исходной шкалы. Вид функции зависит от ее *назначения и способа создания*.

По способу создания функции делятся на: функции, *вычисляемые* на основе заданных предпочтений, и функции, *формируемые* по

предпочтениям эксперта. На рис. 2 представлена классификация функций, вычисляемых на основе предпочтений ЛПП.

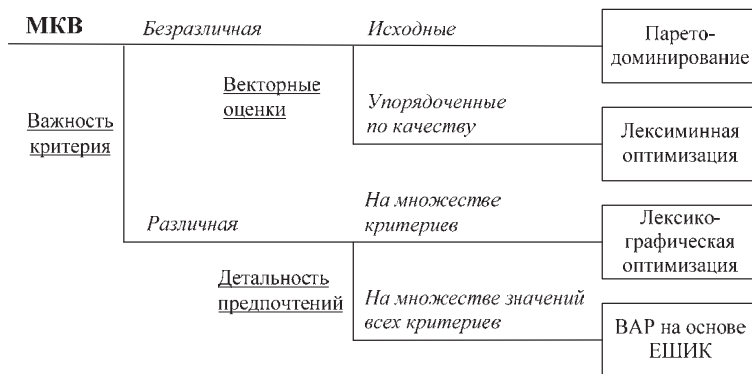


Рис.1. Классификация методов критериального выбора



Рис.2. Классификация функций, вычисляемых на основе предпочтений ЛПП

Простейшим примером вычисляемой функции является нормирующая функция целевого критерия, преобразующая предпочтение $P_{>}(y_{j,\max}, y_{j,\min})$ в линейную функцию $\delta_{\max}(y_j)$:

$$\delta_{\max}(y_j) = \frac{y_j - y_{j,\min}}{y_{j,\max} - y_{j,\min}}. \quad (6)$$

Несмотря на линейную зависимость значений функции $\delta_{\max}(y_j)$ от значений y_j j -го критерия на них оказывают влияние и границы шкалы $[y_{j,\min}, y_{j,\max}]$. Поскольку границы шкалы каждого признака назначаются экспертом, обобщенные оценки объектов зависят от соотношения шкал. А это означает, что выбор наилучшего объекта на основании этих оценок уже не является чисто критериальным.

Функция, которую ставят в соответствие ограничительному критерию, отражающему реальную цель ЛПР, имеет более сложную природу. Создание функции достижения реальной цели на основе критериев *превосходства* требует выполнения двух предпочтений на трех точках шкалы, которую целевое значение c_j делит на 2 участка. Третьим предпочтением может считаться назначение величины полезности $0 < u(c_j) < 1$ при достижении цели, если по умолчанию не принимается значение $u(c_j) = 0,5$. Три варианта нормализации отношения превосходства $y_j \geq c_j$ с учетом возможного ущерба (отрицательной полезности) приведены на рис. 3.

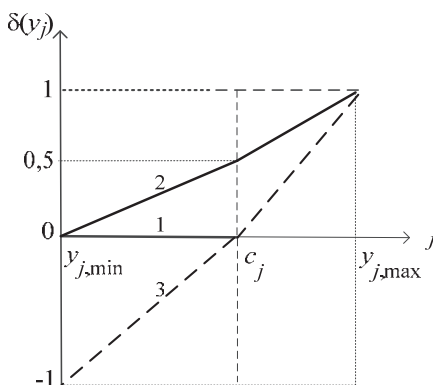


Рис. 3. Варианты нормализации критерия $y_j \geq c_j$ на биполярной оси полезности

Каждый из вариантов представляет собой кусочно-линейную монотонно возрастающую функцию. На основе критериев соответствия строятся немонотонные кусочно-линейные функции.

Функция отклонения от цели измеряется в полярной непрерывной шкале $[-1, +1]$. Если штрафам ставится в соответствие положительный участок шкалы $[0, +1]$, то поощрениям – отрицательный участок $[-1, 0]$. Графики функций в зоне превышения цели на рис. 4 выделены пунктирными линиями.

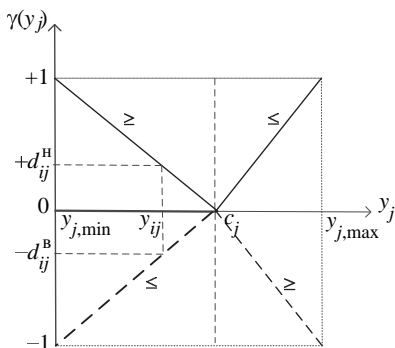


Рис. 4. Шкала отклонений от цели для ограничений «снизу» и «сверху»

Функция приоритетов вычисляется на основе матрицы парных сравнений с учетом или без учета «сил сущностей» [12].

Формулы вычисления функции полезности признака на основе функций принадлежности упорядоченным по качеству классам были предложены в работе [9].

Создание функции полезности, характеризующей склонность ЛПР к риску на основе участия в лотереях, было рассмотрено в работе [13]. Авторами работы предложена формула вычисления полезности отказа от участия в лотерее при известной полезности и вероятности удачного и неудачного исхода лотереи.

Классификация функций, формируемых непосредственно на основе предпочтений ЛПР, приведена на рис. 5.

Эксперт может формировать функцию, как в целом, так и по точкам шкалы. Если эксперт может указать меру склонности / несклонности к риску на различных отрезках шкалы, он может воспользоваться типовыми функциями полезности [14]. В тех случаях, когда имеются опытные или теоретические закономерности, которые можно трактовать с позиции полезности, они принимаются за функции полезности.

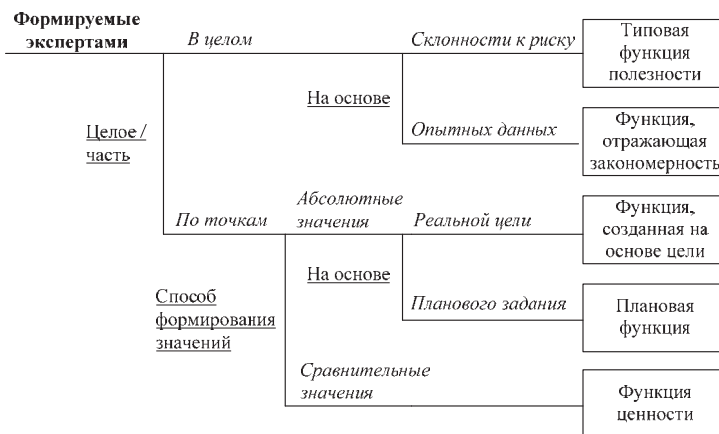


Рис. 5. Классификация функций, формируемых на основе предпочтений ЛПР

Метод создания функции на основе сравнения ценности делений шкалы предложили Кини Р.Л., Райфа Х. в работе [15]. Метод создания функции полезности на основе принципа частичного достижения реальной цели был предложен в работе [16]. Его модификацией можно считать метод создания плановой функции [17], особенность которого состоит в измерении функции в процентной шкале [0%, 200%]. Плановому значению показателя ставится в соответствие сто-процентное значение функции.

Теория многомерной полезности (Multiattribute utility theory) отличается от многокритериальной оптимизации непосредственным выражением предпочтений ЛПР через функцию ожидаемой полезности. Однако, как было показано ранее, скаляризация векторных оценок объектов требует преобразования критериев в функции. Несмотря на малую информативность по числу отражаемых ею предпочтений, нормирующая функция критерия может трактоваться как функция полезности. Это же касается и других функций, создаваемых другими способами [18]. Таким образом, функции, трактуемые в терминах полезности, позволяют объединить различные методы многомерной оптимизации в единую систему.

8. Заключение. Методы, применяемые в теории принятия решений, решают задачи оптимизации и классификации. Установление связей между ними требует нахождения системообразующих признаков, реализующих принцип сходства, и видовых отличий, реализующих принцип различия. За базовые системообразующие признаки были при-

няты критерий и функция. Формальная модель критерия объединила шкалу признака, его целевое значение и меру достижимости цели.

Модель критерия применима как к методам оптимизации, так и классификации. Первые используют критерии превосходства, а вторые – критерии соответствия.

Трактовка функций, применяемых в различных методах оптимизации ожидаемой полезностью, естественной для принятия решений, позволила выделить две группы методов – критериального и функционального выбора. Первые устанавливают предпочтения на значениях критериев, а вторые – на значениях функций, отражающих предпочтения на шкалах признаков. Роль видовых отличий отведена шкалам, в которых измеряются признаки. Такая трактовка функций, не зависящая от способа их создания, позволила рассматривать методы многокритериальной оптимизации и многомерной полезности с единых позиций.

Трактовка целевыми функциями обобщающих функций в задачах многомерной оптимизации по полезности и функций многих переменных в задаче поиска экстремума позволила установить связь между соответствующими методами. Здесь роль видовых отличий играют локальные цели. В задаче оптимизации они задаются переменным в процессе поиска экстремума целевой функции, а в задачах многокритериального выбора локальные цели задаются *изначально* и *извне* – лицом, принимающим решение (ЛПР).

Установление связей между различными методами оптимизации и классификации, применяемых в теории принятия решений, дает возможность рассматривать их в рамках единой системы. А это, в свою очередь, позволяет находить этим методам области эффективного применения, решая задачи квалиметрии моделей.

Литература

1. *Koksalan, M., Sagala, P.N.S.* Interactive Approaches for Discrete Alternative Multiple Criteria Decision Making with Monotone Utility Functions // *Management Science*. 1995. vol.41 (7). pp. 67-85.
2. *Bordley R., LiCalzi M.* Decision analysis using targets instead of utility functions // *Decisions in Economics and Finance*. Springer-Verlag 2000. pp. 53-74.
3. *Saaty T. L.* Relative Measurement and its Generalization in Decision Making: Why Pairwise Comparisons are Central in Mathematics for the Measurement of Intangible Factors – The Analytic Hierarchy/Network Process // *RACSAM (Review of the Royal Spanish Academy of Sciences, Series A, Mathematics)* 2008. vol.102 (2). pp. 251–318.
4. *Ларичев О.И.* Вербальный анализ решений // М.: Наука. 2006. 181 с.
5. *Соколов Б.В., Юсупов Р.М.* Концептуальные основы оценивания и анализа качества моделей и полимодальных комплексов // *Известия РАН. Теория и системы управления*. 2004. №6. С. 5-16.

6. Микони С.В., Соколов Б.В., Юсупов Р.М. Применение алгебраического подхода в квалиметрии моделей и полимодельных комплексов // Имитационное моделирование. Теория и практика (ИММОД-2013). Сб. докладов VI научно-практической конференции. Казань: Фэн. 2013. Том 1. С. 68-79.
7. Микони С.В. Многокритериальный выбор на конечном множестве альтернатив. Учебное пособие // СПб.: Лань, 2009. 272 с.
8. Лемешко Б.Ю. Методы оптимизации. Конспект лекций // Новосибирск: НГТУ, 2009. 126 с.
9. Гарина М.И., Микони С.В. Условие одинакового упорядочения объектов по функциям полезности и принадлежности // Труды Конгресса IS&IT'11. М: Физматлит. 2011. Том 1. С.33-37.
10. Микони С.В. Методология выбора на основе увеличения объема предпочтений // Труды Конгресса IS-IT'14. М: Физматлит. 2014. Том 1, С.161-168.
11. Поиновский В.В. Введение в теорию важности критериев в многокритериальных задачах принятия решений // М.: Физматлит. 2007. 105 с.
12. Миркин Б.Г. Проблема группового выбора // М.: Наука. 1974. 256 с.
13. Нейман Д., Моргенштерн О. Теория игр и экономическое поведение // М.: Наука, 1970. 645 с.
14. Микони С.В. Типовые функции полезности в многопризнаковом оценивании альтернатив // Сборник научных трудов международной научной конференции ISDMCГ'2013. Херсон: ХНТУ. 2013. С. 366-371.
15. Кини Р.Л., Райфа Х. Принятие решений при многих критериях: предпочтения и замещения // М.: Радио и связь. 1981. 559 с.
16. Бураков Д.П., Микони С.В. Функции частичного достижения цели // Труды Конгресса IS&IT'13. М: Физматлит. 2013. Том 1. С. 30-38.
17. Микони С.В., Тихомиров В.О., Тришанков В.В., Сорокина М.И. Определение рейтинга подразделений железной дороги по итогам выполнения планов // Региональная информатика-2004. Труды X-й СПб. конференции. СПб.: СПОИСУ. 2006. С. 266-273.
18. Микони С.В. Оценивание альтернатив по полезности как завершающий этап их многокритериальной оптимизации // Труды СПИИРАН, 2013, выпуск 31, С. 6–19.

References

1. Koksalan, M., Sagala, P.N.S. Interactive Approaches for Discrete Alternative Multiple Criteria Decision Making with Monotone Utility Functions. *Management Science*. 1995. vol.41 (7). pp. 67-85.
2. Bordley R., LiCalzi M. Decision analysis using targets instead of utility functions. *Decisions in Economics and Finance*. Springer-Verlag. 2000. pp. 53-74.
3. Saaty T. L. Relative Measurement and its Generalization in Decision Making: Why Pairwise Comparisons are Central in Mathematics for the Measurement of Intangible Factors. *The Analytic Hierarchy/Network Process*. RACSAM – Review of the Royal Spanish Academy of Sciences, Series A, Mathematics. 2008. vol.102 (2). pp. 251-318.
4. Larichev O.I. *Verbal'nyj analiz reshenij*. [Verbal Decision Analysis] M: Nauka. 2006. 181 p. (In Russ.).
5. Sokolov B.V., Jusupov R.M. [Conceptual framework for assessment and analysis of the quality of models and multimodal systems] *Izvestija RAN. Teorija i sistemy upravlenija - Proceedings of RAN. Theory and control systems*, 2004, no.6, pp. 5-16. (In Russ.).
6. Mikoni S.V., Sokolov B.V., Yusupov R.M. [Application of the algebraic approach in models of quality control and multiple-complexes] *Sbornik dokladov VI nauchno-prakticheskoi konferencii – Imitacionnoe modelirovanie. Teorija i praktika*. Kazań: «Fjen», 2013, Tom 1, pp. 68-79. (In Russ.).

7. Mikoni S.V. *Mnogokriterial'nyj vybor na konechnom mnozhestve al'ternativ. Uchebnoe posobie*. [Multi-criteria selection on a finite set of alternatives] SPb. Lan', 2009. 272 p. (In Russ.).
8. Lemesenko B.Ju. *Metody optimizacii. Konspekt lekcij*. [Optimization techniques. lectures] Novosibirsk: NGTU, 2009. 126 p. (In Russ.).
9. Garina M.I., Mikoni S.V. [Conditions for the same ordering of objects by utility functions and membership functions] *Trudy Kongressa IS&IT'11* [Proceedings of the IS&IT'11 conference]. M: Fizmatlit. 2011. Tom 1, pp. 33-37. (In Russ.).
10. Mikoni S.V. [Methodology for selection on the basis of increasing the volume of Preferences] – *Trudy Kongressa IS-IT'14, Divnomorskoe*, 2-9.09.2014. M: Fizmatlit. 2014, Issue 1, pp. 161-168. (In Russ.).
11. Podinovskij V.V. *Vvedenie v teoriju vazhnosti kriteriev v mnogokriterial'nyh zadachah prinjatija reshenij*. [Introduction to the importance of criteria in multicriteria decision problems]. M. Fizmatlit, 2007. 105 p. (In Russ.).
12. Mirkin B.G. *Problema gruppovogo vybora*. [The problem of group selection] M. Nauka. 1974. 324 p. (In Russ.).
13. Von Neumann J., Morgenstern O. *Theory of Games and Economic Behavior*. Princeton: Princeton University Press. 1947. 645 p.
14. Mikoni S.V. [Typical useful functions for evaluating alternatives] *Sbornik nauchnyh trudov mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii ISDMCI'2013* [Proceedings of the international conference ISDMCI'2013], Herson: HNTU. 2013. pp. 366-371. (In Russ.).
15. Keeney, R.L., Raiffa H. *Decisions with multiple objectives: preferences and value tradeoffs*. New York: Wiley. 1976. 559 p.
16. Burakov D.P., Mikoni S.V. [Functions of partial achievement target] *Trudy Kongressa IS&IT'13* [Proceedings of the IS&IT'13 conference] M: Fizmatlit. 2013. Issue 1. pp. 30-38. (In Russ.).
17. Mikoni S.V., Tihomirov V.O., Trishankov V.V., Sorokina M.I. [Ranking the divisions of the railway on the results of the implementation of plans] *Trudy X SPb. konferencii – Regional'naja informatika-2004*. [Proceedings of the conference "Region informatics" 2004]. SPb. SPOISU. 2006. pp. 266-273. (In Russ.).
18. Mikoni S.V. [Evaluation of alternatives for utility as the final stage of multi-criteria optimization]. *Trudy SPIIRAN - SPIIRAS Proceedings*. 2013. vol. 31. pp. 6–19. (In Russ.).

Микони Станислав Витальевич — д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры «Математика и моделирование» Петербургского государственного университета путей сообщения, ведущий научный сотрудник Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук (СПИИРАН). Область научных интересов: системный анализ, принятие решений, интеллектуальные технологии. Число научных публикаций — 254. svmikoni@gmail.com, www.mcd-svir.ru; СПИИРАН, 14-я линия В.О., д. 39, г. Санкт-Петербург, 199178, РФ; p.t. +7(812)328-0103.

Mikoni Stanislav Vitalyevitch — Ph.D., Dr. Sci., professor, Professor of Mathematics and Modeling Department of St. Petersburg State Transport University, leading researcher of SPIIRAS. Research interests: system analyses, decision making, intellect technologies. The number of publications — 254. svmikoni@gmail.com, www.mcd-svir.ru; SPIIRAS, 39, 14-th Line V.O., St. Petersburg, 199178, Russia; office phone +7(812)328-0103.

Поддержка исследований. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 13-01-00912).

Acknowledgements. This research is supported by RFBR (grant 13-01-00912).

РЕФЕРАТ

Микони С.В. Системный анализ методов многокритериальной оптимизации на конечном множестве альтернатив.

Систематизация математических моделей и методов актуальна для практики, поскольку позволяет найти наиболее эффективную область применения каждой модели и связанного с ней метода. Это в полной мере касается методов, разработанных в рамках теории принятия решений.

Основной задачей принятия решения является выбор наилучшей альтернативы в пространстве характеризующих ее признаков или оценивание ее качества. Очевидно, что методы решения этой задачи должны иметь общую основу. Установление связей между ними требует нахождения системообразующих признаков, реализующих принцип сходства, и видовых отличий, реализующих принцип различия. За базовые системообразующие признаки были приняты *критерий* и *функция*. Формальная модель критерия объединила шкалу признака, его целевое значение и меру достижимости цели.

Трактовка функций, применяемых различными методами оптимизации, ожидаемой полезностью, естественной для принятия решений, позволила выделить две группы методов – критериального и функционального выбора. Первые устанавливают предпочтения на значениях критериев, а вторые – на значениях функций, отражающих предпочтения на шкалах признаков. Роль видовых отличий отведена шкалам, в которых измеряются признаки. Такая трактовка функций, не зависящая от способа их создания, позволила рассматривать методы многокритериальной оптимизации и многомерной полезности с единых позиций. К группе методов функционального выбора отнесен и метод анализа иерархий, использующий функции приоритетов, вычисляемые на основе матриц парных сравнений.

Трактовка целевыми функциями обобщающих функций в задачах многомерной оптимизации по полезности и функций многих переменных в задаче поиска экстремума позволила установить связь между соответствующими методами. Здесь роль видовых отличий играют локальные цели. В задаче оптимизации они задаются переменным в процессе поиска экстремума целевой функции, а в задачах многокритериального выбора локальные цели задаются *изначально* и *извне* – лицом, принимающим решение (ЛПР).

Установление связи между различными модификациями методов теории принятия решений потребовало привлечения частных системообразующих признаков. Полученная система методов теории принятия решений позволяет сопоставлять их по качеству и оценивать эффективность решения конкретных задач.

SUMMARY

Mikoni S.V. System Analysis of Multi-criteria Optimization Methods on a Finite Set of Alternatives.

Mathematical methods systematization is useful for practice, as it allows one to find the most effective area of application of each method. This fully applies to the methods developed in the decision theory.

The main objective of the decision is to choose the best alternative in the attributes space or evaluation of its quality. Obviously, methods for solving this problem are to have a common basis. Establishing of relation between them requires finding common properties, implementing the principle of similarities and specific properties, implementing the principle of distinction. A criterion and a function were taken as basic common properties of multi-criteria optimization methods. Formal model criterion combined attribute scale, target value of attribute and measure of deviation from the target.

The functions used by different optimization methods are interpreted with expected utility viewpoint. It makes it possible to distinguish two groups of methods - criterion and functional choice ones. The first group of methods sets preferences on the values of the criteria, and the second - on the values of the functions presenting the preferences of decision maker on the scales of attributes. Such an interpretation of functions that does not depend on how they are created, allowed considering methods of multi-criteria optimization and multi-dimensional utility from unified positions. The analytic hierarchy process uses the priority function calculated based on the matrix of pairwise comparisons. So, it is related to the group of methods of functional choice too. The resulting system allows one to compare their methods for quality and evaluate the effectiveness of tasks solving.

Interpretation by objective functions of aggregate objective functions in problems of multi-dimensional utility optimization and functions of several variables in the problem of finding its extreme allowed establishing a relation between the methods. Here the local targets play the role of specific properties. In an optimization problem, they are set to variables in the process of finding the extreme of the objective function, and in problems of multicriteria choice local targets are set initially and outside – by the decision maker (DM).

The resulting system of optimization methods allows one to compare methods for quality and evaluate its effectiveness for tasks solving.

А.А. МУСАЕВ
**КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ АНАЛИЗ ХАОТИЧЕСКОЙ ДИНАМИКИ
ВАЛЮТНОГО РЫНКА**

Мусаев А.А. Корреляционный анализ хаотической динамики валютного рынка.

Аннотация. Рассмотрен вопрос взаимосвязей между процессами изменения котировок валютных инструментов на электронном рынке Forex. Наличие относительно устойчивых корреляционных связей рассматривается как упорядочивающих фактор над массивами хаотических временных последовательностей, отражающих динамику валютных котировок. Результаты проведенных исследования можно рассматривать как эмпирическую платформу для регрессионных оценок текущей рыночной стоимости валютных инструментов и построения эффективных индикаторов состояния рынка.

Ключевые слова: хаотические процессы, корреляционный анализ, котировки валюты, валютный рынок, валютные инструменты, Forex.

Musaev A.A. Correlation Analysis of the Currency Market Chaotic Dynamics.

Abstract. The problem of interrelations between processes of currency quotations change in the electronic market Forex is considered. Existence of rather stable correlation relations is considered as an ordering factor over the chaotic temporary sequences reflecting dynamics of currency quotations. Results of carried out researches can be considered as a functional platform for regression estimates of currency current cost. So its can be used for effective market indicators creation.

Keywords: chaotic processes, correlation analysis, currency market, rate of exchange, currency tools, Forex.

1. Введение. Теоретический аспект данной работы относится к группе исследований, ориентированных на изучение природы возникновения порядка в хаотических средах. Прикладной вопрос исследований эволюции корреляционных связей в многомерном хаотическом процессе направлен на задачу непрямого прогноза состояния объекта в многомерной и многосвязной хаотической среде.

Главной особенностью динамических процессов, отражающих состояние валютного и других электронных рынков, является хаотическая природа изменения котировок рыночных активов [1-5]. Генезис рыночного хаоса связан с неустойчивостью процесса ценообразования. Стоимость активов формируется под воздействием огромного количества гетерогенных трудно предсказуемых факторов. При этом рыночная цена отражает не столько реальную стоимость актива, сколько субъективное, мгновенно изменяющееся представление рынка о его текущем состоянии.

В этих условиях попытки построения эффективной управляющей стратегии, основанной на прямом прогнозировании состояния рынка, обречены на провал [6-11]. Тем не менее, факт существования

небольшого процента успешных трейдеров позволяет сделать предположение о наличии некоторых упорядочивающих факторов, позволяющих косвенно судить о возможных изменениях состояния рынка. В качестве варианта поиска такого упорядочивающего начала в настоящей статье приведено исследование корреляционных связей между различными финансовыми инструментами валютного рынка. Заметим, что некоторые аспекты изучения межрыночных взаимосвязей были рассмотрены в [12].

Одним из приложений корреляционного анализа валютного рынка является выявление финансовых инструментов, которые, в силу наличия естественных корреляционных взаимных связей, могут использоваться в качестве предикторов в задаче регрессионного восстановления оценки текущей стоимости рыночного актива. Сопоставление полученной регрессионной оценки с его текущей стоимостью позволяет определить уровень недооценки или переоценки актива. Данный результат, в свою очередь, дает возможность построить рыночный индикатор осцилляторного типа и отвечающую ему управляющую стратегию.

Таким образом, проводимый в настоящей работе корреляционный анализ представляет собой некоторую эмпирическую платформу, позволяющую перейти от схемы построения управляющих стратегий на основе анализа одномерного хаотического процесса [6-11] к схеме, базирующейся на многомерном квазихаотическом процессе. При этом снижение степени хаотичности достигается за счет учета относительно стабильных статистических связей между валютными инструментами.

2. Математические модели динамики котировок. Каждый из наблюдаемых динамических процессов изменения котировок валютных активов может описываться различными математическими моделями. Обзор подходов к задаче моделирования рыночных активов приведен, например, в [4, 13, 14]. При этом традиционные оценки качества модели, основанные на критериях подобия, оказываются малоэффективными. Важна не степень подобия между моделью и наблюдаемым процессом, а степень полезности модели для решения стоящей перед исследователем или разработчиком задачи [3]. В частности, качество модели, используемой в системе поддержки управляющих решений, должно оцениваться на основе терминального критерия эффективности – достигаемой прибыли при заданном уровне риска.

Для исследования корреляционных связей наиболее простой и относительно корректной моделью наблюдаемых процессов является двухкомпонентное аддитивное представление вида:

$$x_k = y_k + v_k, \quad k = 1, \dots, N.$$

Здесь под y_k , $k = 1, \dots, N$ понимается системная составляющая, используемая для определения тренда, прогноза или непосредственно в процессе выработки решений. Компонента y_k , $k = 1, \dots, N$ формируется путем динамического сглаживания исходного процесса и представляет собой колебательный непериодический (т.е. хаотический) процесс. Случайная составляющая v_k , $k = 1, \dots, N$, как правило, является центрированной относительно y_k . В силу гетероскедастичности потока наблюдений эта компонента образует нестационарный процесс.

Заметим, что предложенная модель содержит существенную неопределенность, связанную с самим понятием системной компоненты. По существу, разделение наблюдаемого ряда на системный процесс и помеховую составляющую является неоднозначным и требует дополнительного определения, связанного с такими субъективными факторами, как выбор коэффициента передачи сглаживающего фильтра, стратегии игры, критерия ее эффективности и т.п. Кроме того, на процесс идентификации системной составляющей определяющим образом влияют такие экзогенные факторы, как стратегические предпочтения участников торговых операций [3].

Для повышения объективности выбора математической модели может использоваться дополнительная информация, связанная с исследованием свойств наблюдаемых процессов. В качестве одного из таких формирующих дополнений могут быть использованы результаты многомерного корреляционного анализа изменения состояния группы валютных активов, представленные в настоящей статье.

3. Визуальный анализ корреляций. Для любых стохастических процессов оценка коэффициента корреляции зависит от размера окна наблюдения, на котором эта оценка осуществляется. В частности, для стационарных и случайных процессов точность оценки будет постоянно расти по мере увеличения размера выборки наблюдений.

Для модели стохастического хаоса, когда на исходный хаотический процесс накладывается статистическая шумовая компонента, аналитические исследования построить не удастся. Численные исследования также не всегда эффективны, тем не менее, они позволяют сделать некоторые общие заключения.

В качестве примера рассмотрим задачу традиционной оценки корреляционных связей между 16-ю наиболее часто используемыми на

практике валютными инструментами, представленными в таблице 1. В дальнейшем будем для их обозначения использовать номера валютных пар из этой таблицы.

Таблица 1. Валютные инструменты

№№	1	2	3	4
Инструмент	EURUSD	EURJPY	EURGBP	EURCHF
№№	5	6	7	8
Инструмент	EURCAD	USDCAD	USDCHF	USDJPY
№№	9	10	11	12
Инструмент	GBPCHF	GBPJPY	GBPUSD	AUDJPY
№№	13	14	15	16
Инструмент	AUDUSD	CHFJPY	NZDUSD	NZDJPY

Для предварительного анализа оценим значения коэффициентов парных корреляций между представленными в табл. 1 инструментами.

Соответствующие коэффициенты находятся из известного соотношения $r_{ij} = s_{ij} / \sqrt{s_{ii}s_{jj}}$, где s_{ij} , $i, j = 1, \dots, m$ - коэффициенты ковариации, образующие в совокупности матрицу ковариаций $S = X^T X / (n - 1) = \{s_{ij}, i, j = 1, \dots, m\}$ [15, 16].

Для оценки матрицы ковариаций используются исходные массивы наблюдений, образованные рядами котировок валютных пар и представленные в виде прямоугольной таблицы X размера $< n : m >$, где n - число наблюдений (равное числу строк), а m - число исследуемых параметров (число столбцов).

В качестве предварительного примера рассмотрим оценку матрицы корреляций $R = \{r_{ij}, i, j = 1, \dots, m\}$ для совокупности наблюдений за всеми 16 параметрами на временном интервале в 100 дней.

Тональное представление матриц корреляций между 16 валютными инструментами приведено на рис. 1. Наиболее светлые тона соответствуют сильной положительной корреляционной связи, а наиболее темные - отрицательной.

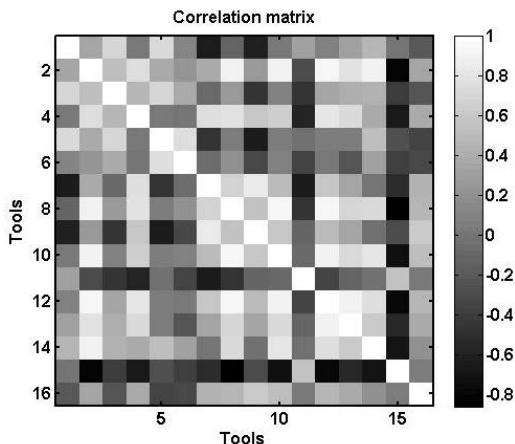


Рис. 1. Тональное представление матрицы корреляций между 16 валютными инструментами

В таблице 2 приведены перечни пар валютных инструментов с наиболее сильными положительными и отрицательными корреляционными связями. Для наглядной иллюстрации существующих корреляционных связей на рис. 2 представлены графики динамики коррелированной пары <8, 12>, и на рис. 3 - <2, 12>.

Таблица 2. Валютные пары с наиболее сильными корреляционными связями

№№	i	j	corr
1	8	12	0.94
2	2	12	0.93
3	8	10	0.93
4	10	12	0.91
5	2	8	0.90
6	12	13	0.89
7	1	14	0.89
8	2	10	0.89
9	7	9	0.84
10	4	12	0.82
21	8	15	-0.86
22	2	5	-0.82
23	12	15	-0.80
24	10	15	-0.73

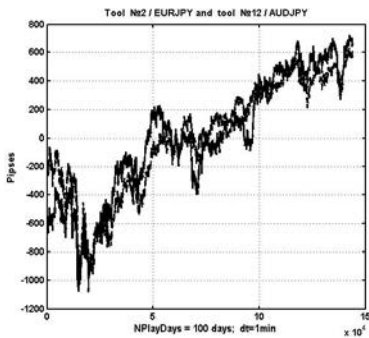


Рис. 2. Динамика изменения котировок валютных инструментов <8, 12>

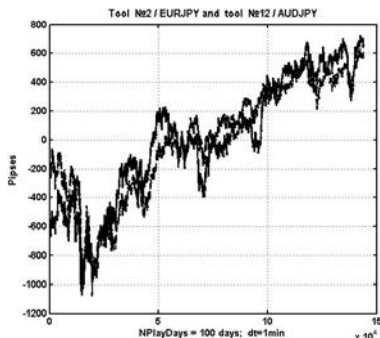
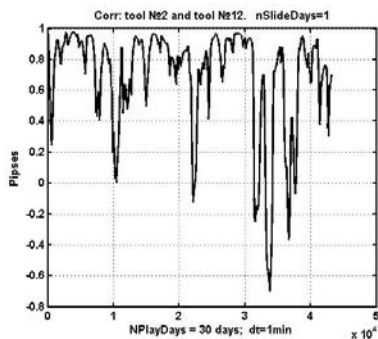
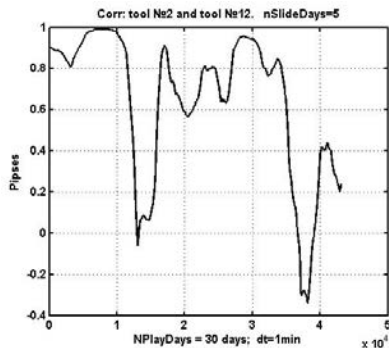


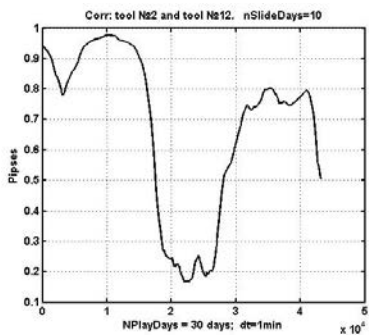
Рис. 3. Динамика изменения котировок валютных инструментов <2, 12>



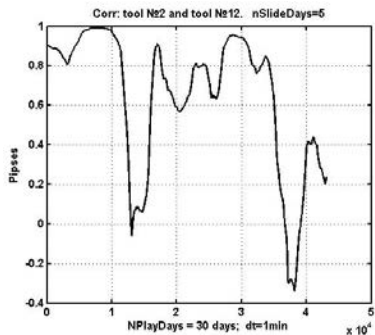
a)



b)



c)



d)

Рис. 4. Динамика коэффициента корреляции для различных значений скользящего окна наблюдения w в днях: а) $w=1$; б) $w=5$; в) $w=10$; д) $w=15$.

Из приведенной таблицы и графиков можно сделать вывод о наличии инструментов с сильными корреляционными связями, что создает теоретическую платформу для разработки управляющих стратегий, основанных на использовании осцилляторных индикаторов [17, 18] или парного трейдинга [19, 20].

4. От хаоса к порядку: выбор временного интервала. Существенным параметром, влияющим на качество оценивания корреляционной связи, является интервал времени наблюдений, по которым осуществляется соответствующая оценка.

Рассмотрим динамику изменения оценки коэффициента корреляции $r(t)$ для валютных инструментов $\langle 2, 12 \rangle$ на интервале времени $T = 30$ дней при использовании скользящих окон размера τ . На рис. 4 представлены графики $r(t)$ для $\tau = 1, 5, 10, 15$ дней.

Из приведенных графиков видно, что на малых интервалах наблюдения взаимосвязь между изменениями котировок также носит хаотический характер.

С ростом окна наблюдения динамика коэффициента передачи заметно упорядочивается. Однако при использовании этого параметра в качестве индикатора управляющей стратегии следует иметь виду, что рост окна наблюдения τ неизбежно приводит к задержке реакции процедуры выработки решения относительно текущего значения показателя взаимосвязи.

5. Анализ корреляционных связей валютных инструментов. Имея значения корреляционной матрицы на большом интервале наблюдения, нетрудно сформировать перечень регрессоров, которые можно использовать для оценки стоимости валютного инструмента по критерию максимального значения модуля коэффициента корреляции с другими валютными парами.

Ограничиваясь пятью наиболее коррелированными парами, соответствующие данные по степени связности валютных инструментов представлены в таблице 3. При этом оценка строилась на достаточно большом интервале наблюдения в 100 дней.

В первом столбце таблицы представлены номера валютных инструментов, приведенных в табл. 1. В столбцах 2-6 даны номера четырех валютных пар, наиболее коррелированных с валютным инструментом из первого столбца, а в 7-11 столбцах – соответствующие им значения парных корреляций.

Насколько приведенные корреляционные связи устойчивы? Для ответа на данный вопрос осуществим эту же оценку корреляционных связей на другом 100-дневном интервале времени, непересекающимся с предыдущем участком наблюдения. Соответствующие данные приведены в таблице 4.

Сравнение двух наборов данных демонстрирует их существенное расхождение по значениям оценок корреляционных связей и перечнем наиболее связанных валютных инструментов.

Таблица 3. Группы валютных пар, наиболее коррелированные с заданным валютным инструментом (1-100 дни)

Вал. пара	Корр. валютные пары				Значения коэфф. корр.			
	1	2	3	4	1	2	3	4
1	5	3	7	9	0,74	0,69	-0,64	-0,61
2	12	8	14	10	0,93	0,90	0,89	0,89
3	5	1	2	11	0,70	0,69	0,54	-0,48
4	12	8	2	7	0,82	0,79	0,76	0,75
5	6	1	3	9	0,76	0,74	0,70	-0,63
6	5	15	3	11	0,76	-0,39	0,37	-0,34
7	9	4	8	11	0,84	0,75	0,68	-0,65
8	12	10	2	15	0,94	0,93	0,90	-0,86
9	7	5	1	16	0,84	-0,63	-0,61	0,60
10	8	12	2	14	0,93	0,91	0,89	0,81
11	7	4	15	3	-0,65	-0,58	0,55	-0,48
12	8	2	10	13	0,94	0,93	0,91	0,89
13	12	2	4	10	0,89	0,79	0,72	0,72
14	2	10	12	8	0,89	0,81	0,74	0,73
15	8	2	12	10	-0,86	-0,82	-0,80	-0,73
16	9	10	8	12	0,60	0,53	0,46	0,45

Таблица 4. Группы валютных пар, наиболее коррелированные с заданным валютным инструментом (101-200 дни)

Вал. пара	Корр. валютные пары				Значения коэфф. корр.			
	1	2	3	4	1	2	3	4
1	2	13	12	11	0,98	0,98	0,98	0,97
2	12	14	16	10	0,99	0,99	0,99	0,99
3	9	11	10	7	-0,79	-0,75	-0,73	0,72
4	1	13	12	2	0,92	0,91	0,91	0,91
5	6	3	8	16	0,36	0,27	-0,26	-0,18
6	16	15	2	14	-0,96	-0,96	-0,96	-0,95
7	11	14	10	15	-0,98	-0,96	-0,96	-0,96
8	16	14	10	2	0,98	0,97	0,97	0,97
9	10	11	14	16	0,98	0,98	0,96	0,95
10	14	16	11	2	1	0,99	0,99	0,99
11	10	14	7	9	0,99	0,98	-0,98	0,98
12	13	2	16	15	1	0,99	0,99	0,98
13	12	1	2	15	1	0,98	0,98	0,97
14	10	16	15	2	1	0,99	0,99	0,99
15	16	14	10	2	1	0,99	0,99	0,99
16	15	14	2	10	1	0,99	0,99	0,99

Данный вывод очередной раз подтверждает тезис о хаотической природе котировок валютных активов. Тем не менее, изменение в структуре зависимостей происходит значительно медленнее, чем в самом процессе изменения котировок.

Для подтверждения последнего тезиса рассмотрим динамику изменения коэффициента корреляции между сильно связанными парами валютных инструментов $\langle 2, 12 \rangle$ для больших скользящих окон наблюдения (50 дней) на интервале 100 дней с шагом в один день (рис. 5).

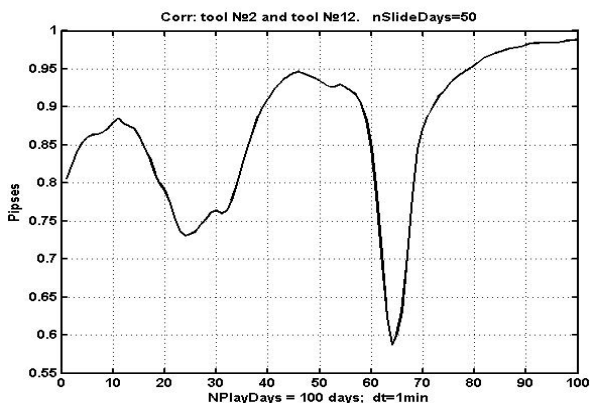


Рис. 5. Динамика коэффициента корреляции для валютных пар $\langle 2, 12 \rangle$ при скользящем окне наблюдения $w=50$ дней

Из приведенного графика видно, что значения коэффициента корреляции изменяются достаточно медленно, что подтверждает возможность оценивания рыночной стоимости валютных активов методом многомерной регрессии.

Кроме того, относительная упорядоченность корреляционных связей позволяет использовать парные (или рыночно-нейтральных) стратегии. Однако следует иметь в виду, что на малых окнах наблюдения вариабельность оценок корреляций достаточно велика (см. рис. 4а, 4б) и, следовательно, необходимо иметь достаточный запас депозита для защиты от их случайных флуктуаций.

6. Сопоставление процессов изменений котировок и корреляционных связей. Для сравнения динамики изменения котировок с динамикой изменения корреляционных связей на рис. 6 приведены их синхронные графики.

На верхнем графике изображено изменение оценки модуля коэффициента корреляции между сильно коррелированными валютными

инструментами $\langle 2, 12 \rangle$, формируемой на скользящем окне размером 25 дней, а на нижнем графике – динамика разности центрированных значений котировок валютных инструментов $\langle 2, 12 \rangle$
 $d(t) = Y_2(t) - Y_{12}(t)$.

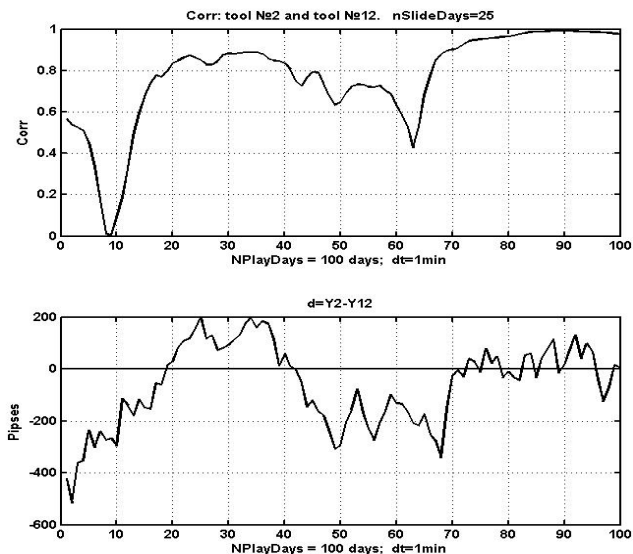


Рис. 6. Синхронизированные графики динамики изменения коэффициента корреляции (верхний график) и разности центрированных котировок валютной пары $\langle 2, 12 \rangle$

Из приведенных графиков можно видеть тенденцию к расхождению процесса $d(t)$ при снижении модуля коэффициента корреляции. В случае если коэффициент корреляции будет принимать отрицательные значения, парная стратегия должна строиться не на основе разности, а на основе суммы коррелированных инструментов. Тем не менее, использовать коэффициент корреляции в качестве адапционного показателя достаточно сложно в силу временных задержек, характерных для процесса оценивания статистических параметров хаотических процессов.

Оптимизация адаптивного процесса будет связана с нахождением компромиссного решения, отвечающего условиям минимизации реакции оценки корреляции на изменение динамики котировок и минимизации уровня ложных тревог, обусловленных несистемными

флуктуациями. В соответствии с распространенной методологией оптимизации, один из этих показателей будет сформирован в форме допустимого ограничения, а второй будет подлежать минимизации.

7. Анализ взаимосвязей валютных пар на больших интервалах оценивания. Сравним последовательности номеров валютных пар, упорядоченных по степени их коррелированности с каждым из 16-ти валютных инструментов, представленных в таблице 1, для интервалов оценивания в 50 дней (таблица 5) и 300 дней (таблица 6). В первом столбце приведены последовательности номеров валютных инструментов, а во втором ряду – указанная последовательность, составленная из остальных валютных пар и упорядоченная по убыванию модуля коэффициента корреляции.

Таблица 5. Номера валютных пар, упорядоченные по убыванию модуля коэффициента корреляции, интервал наблюдения - 50 дней

Вал. пара	Коррелированные валютные пары												
	5	3	9	7	14	6	2	10	8	16	12	15	13
1	5	3	9	7	14	6	2	10	8	16	12	15	13
2	4	12	8	14	13	10	3	16	15	11	7	1	5
3	5	1	9	6	14	11	2	15	4	7	10	16	13
4	12	8	2	7	13	10	15	11	9	16	3	14	6
5	3	1	6	9	7	14	16	10	2	11	8	12	15
6	5	3	11	15	9	16	1	13	10	2	12	4	7
7	9	8	12	4	10	1	16	15	5	13	11	2	3
8	12	10	4	7	2	16	9	13	15	11	1	14	5
9	7	10	1	5	8	12	16	3	4	6	13	14	15
10	8	16	12	9	7	4	2	13	5	6	1	14	3
11	15	3	4	6	8	7	2	12	5	13	16	9	14
12	8	4	13	10	2	7	16	9	15	11	14	5	6
13	12	4	2	16	8	10	7	9	6	14	3	5	11
14	2	1	3	5	16	12	9	10	8	13	4	7	6
15	11	4	8	7	2	6	12	3	10	9	5	16	1
16	10	12	8	9	13	7	2	4	6	5	14	1	3

Из приведенных таблиц видно, что, в отличие от статистических моделей, рост окна наблюдения хаотических данных не приводит к стабилизации значения коэффициента корреляции и, как следствие, к установлению фиксированного списка предикторов для задачи регрессионного анализа. Таким образом, выбор предикторов регрессионной схемы должен периодически корректироваться.

Таблица 6. Номера валютных пар, упорядоченные по убыванию модуля коэффициента корреляции, интервал наблюдения 300 дней

Вал. пара	Коррелированные валютные пары															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	13	15	7	6	2	16	12	11	14	10	4	9	8			
2	12	14	16	10	13	6	11	1	15	4	9	8	7			
3	9	10	11	16	6	15	12	2	8	14	13	5	4			
4	2	12	10	16	13	6	11	1	9	14	15	8	7			
5	3	9	8	6	10	11	16	12	15	2	14	4	13			
6	16	11	15	13	10	12	2	1	14	9	4	7	3			
7	1	15	13	6	14	11	16	2	12	10	4	9	3			
8	10	2	14	12	16	9	4	11	6	13	3	15	1			
9	3	10	11	16	6	2	12	15	14	4	13	8	1			
10	16	11	2	12	14	6	9	13	15	1	4	8	3			
11	10	16	15	6	13	2	12	9	14	1	3	4	7			
12	2	13	14	16	10	6	11	15	1	4	9	8	7			
13	12	1	16	15	2	6	14	11	10	7	4	9	8			
14	2	12	16	10	13	11	6	15	1	8	7	9	4			
15	16	11	6	13	1	12	10	14	2	7	9	4	3			
16	10	12	15	2	11	14	6	13	1	9	4	7	8			

8. Анализ изменения коэффициента корреляции для выборки нарастающего объема. Выше были приведены графики изменения коэффициента корреляции для выборок различного размера, формируемых на скользящем окне наблюдения.

Теперь рассмотрим динамику изменения этого же параметра для выборки нарастающего объема

Для анализа характера изменения коэффициента корреляции использовались две валютных пары <2, 12> и <8, 10> с сильной корреляцией и одна валютная пара <1, 5> с очень слабой корреляцией.

Расчет осуществляется по выборке нарастающего объема с интервалом в 10 дней на 10 шагах оценивания, т.е. до размера выборки в 100 дней.

На рис. 7 представлены графики изменения коэффициента корреляции для валютных пар <2, 12> (верхний ряд) и <8, 10> (нижний ряд). В правом столбце приведены графики для первого 100-дневного интервала наблюдения, а второй график – для второго, непересекающегося с первым 100-дневным интервалом.

На рис. 8 приведены результаты тех же вычислений для общего 300-х дневного интервала наблюдения.

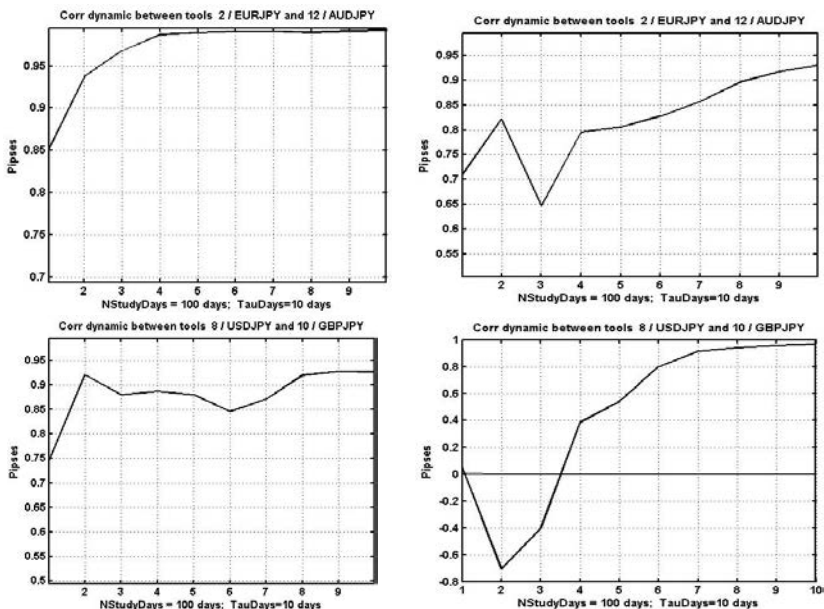


Рис 7. Изменение коэффициента корреляции для валютных пар <2, 12> (верхний ряд) и <8, 10> (нижний ряд) для двух 100-дневных интервалов наблюдения по выборке нарастающего объема

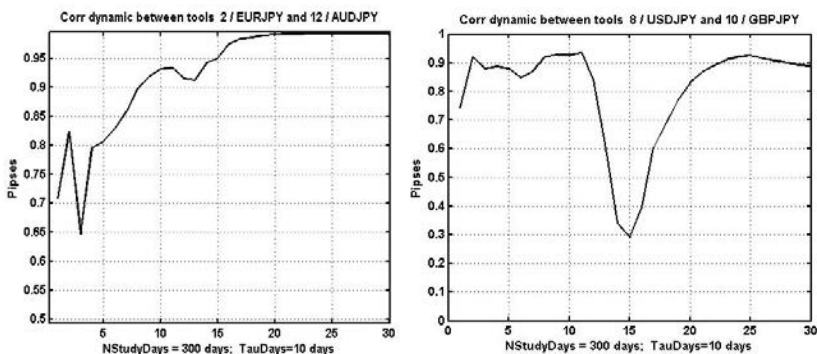


Рис 8. Изменение коэффициента корреляции для валютных пар <2, 12> и <8, 10> для 300-дневного интервалов наблюдения по выборке нарастающего объема.

Очевидно, что приведенные графики, основанные на выборке нарастающего объема, в разных своих частях обладают разной чувствительностью к локальным вариациям валютных пар. В начале графи-

ков их динамика весьма чувствительна к локальным корреляциям, а ближе к концу – в большей степени отражает усредненную меру корреляционной связи.

9. Заключение. Представленные в статье материалы служат эмпирической платформой для формирования процедуры динамической коррекции алгоритмов управления торговыми операциями на валютном рынке.

Основным теоретическим выводом из приведенных численных исследований корреляционных связей является установление факта наличия локальных упорядоченных структур в многомерных хаотических процессах, протекающих на рынке Forex.

В практическом плане из приведенных исследований вытекает принципиальная возможность создания управляющих стратегий, ориентированных на использование локальных упорядоченных структур в рядах наблюдений. Однако в силу нестационарности хаотических процессов требуются периодические перенастройки параметров, а иногда и всей структуры управляющей стратегии. Другими словами, требуется адаптация управления к относительно медленным изменениям корреляционной структуры.

В то же время следует иметь в виду, что адаптация в хаосе – не панацея, а целый ряд новых проблем, связанных с принципиальными задержками адаптивного контура управления.

Кроме того, оценки многомерных корреляций могут служить основой для формирования нового класса обобщенных индикаторов рынка. В частности, для этих целей могут использоваться оценки факторов влияния, формируемые методом факторного анализа, или главные компоненты наблюдаемых процессов. Данному вопросу предполагается посвятить последующие исследования.

Литература

1. *Peters E. E.* Chaos and order in the capital markets: a new view of cycles, prices, and market volatility (2nd ed.) // NY: John Wiley & Sons, 1996. 288p.
2. *Williams B.M.* Trading chaos // NY: John Wiley & Sons, Inc. 2002. 251p.
3. *Мусаев А.А.* Quod est veritas. Трансформация взглядов на системную составляющую наблюдаемого процесса // Труды СПИИРАН. 2010. Вып. 15. С. 53–74.
4. *Мусаев А.А.* Моделирование котировок торговых активов // Труды СПИИРАН. 2011. Вып. 17. С. 5–32.
5. *Колодко Д.В.* Нестационарность и самоподобие валютного рынка Forex // Управление экономическими системами. 2012 №3. URL: <http://www.uecs.ru/uecs-39-392012/item/1144--forex>.
6. *Мусаев А.А.* Статистический анализ инерционности хаотических процессов // Труды СПИИРАН. 2014. Вып. 2(33). С. 48-59.
7. *Чекулаев М.* Торгуем в тренде // Валютный спекулянт. 2006. № 2. URL: http://www.spekulant.ru/archive/Torguem_v_trende.html.

8. Чеботарев Ю. Торговые роботы на российском фондовом рынке // М.: Омега-Л. 2006. 144 с.
9. Гринблат Д. Из прошлого в будущее // *Forex magazine*. 2014. №523/15. С. 22-24.
10. Bosse T., Treur J., Jonker C.M. Formal analysis of design process dynamics // *AI EDAM*. 2010. vol. 24. no. 3. pp. 397–423.
11. Lien K. Day Trading the Currency Market: Technical and Fundamental Strategies to Profit from Market Swings // NY: Wiley & Sons, Inc. 2005. 256 p.
12. Мусаев А.А. Корреляционный анализ процессов изменения состояния фондовых и валютных рынков // Труды СПИИРАН. 2011. Вып. 18. С. 5-18.
13. Канторович Г.Г. Анализ временных рядов // *Экономический журнал ВШЭ*. 2002. №2. С. 251–273.
14. Перцовский О.Е. Моделирование валютных рынков на основе процессов с длинной памятью: Препринт WP2/2004/03 // М.: ГУ ВШЭ, 2003. 52 с.
15. Bolch B.W., Huang, C. J. Multivariate statistical methods for business and economics // N.J.: Englewood Cliffs. 1974. 317p.
16. Айвазян С. А., Мхитарян В. С. Прикладная статистика и основы эконометрии: Учебник для вузов. // М.: ЮНИТИ. 1998. 1022с.
17. Мусаев А.А. , Барласов И. А. Оценивание состояния фондовых рынков на основе многомерной регрессии на скользящем окне наблюдения // Труды СПИИРАН. 2012. Вып. 19. С. 243–254.
18. Колби Р., Мейерс Т. Энциклопедия технических индикаторов рынка // М.: Альпина бизнес букс. 2007. 837с.
19. Engle R.F., Granger C.W.J. Co-integration and Error Correction: Representation, Estimation and Testing // *Econometrics*. 1987. vol. 55. no.2. pp. 251-76.
20. Мусаев А.А. Статистические свойства линейных форм валютных инструментов // Труды СПИИРАН. 2011. Вып. 16. С. 141–159.

References

1. Peters E. E. Chaos and order in the capital markets: a new view of cycles, prices, and market volatility (2nd ed.). NY: John Wiley & Sons, 1996. 288p.
2. Williams B.M. Trading chaos. NY: John Wiley & Sons, Inc. 2002. 251p.
3. Musaev A.A. [Quod est veritas. Transformation of views for a system component of observed process]. *Trudy SPIIRAN – SPIIRAS Proceedings*. 2010. vol. 15. pp. 53-57. (In Russ.).
4. Musaev A.A. [Modeling of quotations of trade assets]. *Trudy SPIIRAN – SPIIRAS Proceedings*. 2011. vol. 17. pp. 5–32. (In Russ.).
5. Kolodko D.V. [Not stationarity and self-similarity of the currency market Forex]. *Upravlenie jekonomicheskimi sistemami – Management of economic systems*. 2012 no.3. Available at: <http://www.uecs.ru/uecs-39-392012/item/1144--forex>. (accessed: 26.11.2014). (In Russ.).
6. Musaev A.A. [Statistical analysis of a lag effect of chaotic processes]. *Trudy SPIIRAN - SPIIRAS Proceedings*. 2011. vol. 2(33). pp. 48-59. (In Russ.).
7. Chekulaev M. [We trade in a trend]. *Valjutnyj spekuljant – Plural currency speculators*. 2006. no. 2. Available at: http://www.spekulant.ru /archive /Torguem _v_trende.html. (In Russ.).
8. Chebotarev Yu. [Trade robots in the Russian stock market] *Torgovie roboti na rossiiskom fondovom rinke*. Moscow: Omega-L. 2006. 144p. (In Russ.).
9. Grinblat D. [From the past in the future]. *Forex magazine*. 2014. no.523/15. pp. 22-24. (In Russ.).
10. Bosse T., Treur J., Jonker C.M. Formal analysis of design process dynamics. *AI EDAM*. 2010. vol. 24. no. 3. pp. 397–423.

11. Lien K. Day Trading the Currency Market: Technical and Fundamental Strategies to Profit from Market Swings. NY: Wiley & Sons, Inc. 2005. 256 p.
12. Musaev A.A. [Correlation analysis of processes on the stock and currency markets]. *Trudy SPIIRAN – SPIIRAS Proceedings*. 2011. vol. 18. pp. 5–18. (In Russ.).
13. Kantorovich G.G. [Time series analysis]. *Jekonomicheskij zhurnal VShJe – Economical Journal HES*. 2002. no. 2. pp. 251–273. (In Russ.).
14. Percovskii O.E. [Modeling of the currency markets on the basis of processes with long memory] Modelirovanie valyutnih rynkov ha osnove processov s dlinnoi pamyatyu: Preprint WP2/2004/03. Moscow: GU HES, 2003. 52p. (In Russ.).
15. Bolch B.W., Huang, C. J. Multivariate statistical methods for business and economics. N.J.: Englewood Cliffs. 1974. 317p.
16. Aivazyan S.A., Mhitaryan B.C. [Applied statistics and fundamentals of econometrics: The textbook for higher education institutions]. *Prikladnaya statistika i osnovi econometrii: Uchebnik dlya vusov*. Moscow: UNITI. 1998. 1022p. (In Russ.).
17. Musaev A.A., Barlasov I.A. [Estimation of a stock markets state on the basis of multi-dimensional regression on the sliding watch window] *Trudy SPIIRAN – SPIIRAS Proceedings*. 2012. vol. 19. pp. 243–254. (In Russ.).
18. Colby R., Mayers T. [Encyclopedia of technical indicators of the market] *Encyclopedia tehniceskikh indikatorov rinka*. Moscow: Alpina Business books. 2007. 837p.
19. Engle R.F., Granger C.W.J. Co-integration and Error Correction: Representation, Estimation and Testing. *Econometrics*. 1987. vol. 55. no. 2. pp. 251–76.
20. Musaev A.A. [Statistical properties of linear forms of currency tools]. *Trudy SPIIRAN – SPIIRAS Proceedings*. 2011. vol. 16. pp. 141–159. (In Russ.).

Мусаев Александр Азерович — д-р техн. наук, профессор, ведущий научный сотрудник лаборатории информационных технологий в системном анализе и моделировании, Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук (СПИИРАН), декан факультета информационных технологий и управления, Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), научный консультант, ОАО Специализированная инжиниринговая компания «Севзапмонтажавтоматика». Область научных интересов: прикладная статистика, анализ данных, прогнозирование. Число научных публикаций — 220. amusaev@technolog.edu.ru; 14-я линия В.О., д. 39, Санкт-Петербург, 199178; р.т.: +7-(812)-494-9323, Факс: +7 (812)350-1113.

Musaev Alexander Azerovich — Ph.D., Dr. Sci., professor, leading researcher, laboratory of IT in System Analysis and Modeling of St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of Russian Academy of Sciences (SPIIRAS), dean of IT and control systems department, St. Petersburg State Technological Institute (technical university), expert, public corporation Specialized Engineering Company "Sevzapmontageautomatica". Research interests: data analysis, complicated dynamic processes prognosis and control, stochastic chaos systems. The number of publications — 220. amusaev@technolog.edu.ru; 39, 14-th Line V.O., St. Petersburg, 199178, Russia, SPIIRAS; office phone: +7-(812)-494-9323, Fax: +7 (812)350-1113.

РЕФЕРАТ

Мусаев А.А. **Корреляционный анализ хаотической динамики валютного рынка.**

Теоретический аспект данной работы относится к группе исследований, ориентированных на изучение природы возникновения порядка в хаотических средах. Прикладной вопрос исследований эволюции корреляционных связей в многомерном хаотическом процессе направлен на задачу непрямого прогноза состояния объекта в многомерной и многосвязной хаотической среде.

Главной особенностью динамических процессов, отражающих состояние валютного и других электронных рынков, является хаотическая природа изменения котировок рыночных активов. Генезис рыночного хаоса связан с неустойчивостью процесса ценообразования. Стоимость активов формируется под воздействием огромного количества гетерогенных трудно предсказуемых факторов. При этом рыночная цена отражает не столько реальную стоимость актива, сколько субъективное, мгновенно изменяющееся представление рынка о его текущем состоянии.

В этих условиях попытки построения эффективной управляющей стратегии, основанной на прямом прогнозировании состояния рынка, обречены на провал. Тем не менее, факт существования небольшого процента успешных трейдеров позволяет сделать предположение о наличии некоторых упорядочивающих факторов, позволяющих косвенно судить о возможных изменениях состояния рынка.

В качестве варианта поиска такого упорядочивающего начала в настоящей статье приведено исследование корреляционных связей между различными финансовыми инструментами валютного рынка.

Одной из задач корреляционного анализа валютного рынка является выявление финансовых инструментов, которые, в силу наличия естественных корреляционных взаимных связей, могут использоваться в качестве предикторов в задаче регрессионного восстановления оценки текущей стоимости рыночного актива. Сопоставление полученной регрессионной оценки с его текущей стоимостью позволяет определить уровень недооценки или переоценки актива. Данный результат, в свою очередь, дает возможность построить рыночный индикатор осцилляторного типа и отвечающую ему управляющую стратегию.

Другой важной практической задачей является разработка аппарата, позволяющего выявлять финансовые инструменты для реализации торговых стратегий, не зависящих от трендов.

Таким образом, проводимый в настоящей работе корреляционный анализ представляет собой некоторую эмпирическую платформу, позволяющую перейти от схемы построения управляющих стратегий на основе анализа одномерного хаотического процесса к схеме, базирующейся на многомерном квазихаотическом процессе. При этом снижение степени хаотичности достигается за счет учета относительно стабильных статистических связей между валютными инструментами.

SUMMARY

Musaev A.A. **Correlation Analysis of the Currency Market Chaotic Dynamics.**

The theoretical aspect of this work belongs to the group of the researches focused on studying of the nature of emergence of order in chaotic environments. The applied question of researches of correlation evolution in multidimensional chaotic process is aimed at a task of the implicit forecast of a state of object in the multidimensional and multicoherent chaotic environment.

The main feature of the dynamic processes, reflecting state of currency and other electronic markets, is the chaotic nature of change of market assets quotations. Genesis of market chaos is connected with instability of pricing process. The cost of assets is formed under the influence of a huge number of heterogeneous factors, which are difficult to predict. Thus, market price reflects not so much the real cost of an asset as the subjective, instantly changing ideas about current state of the markets.

Owing to the basic dialectic principles, chaotic process can't be absolutely steady; it is characterized by appearance of local tendencies, keeping trends or a quasiperiodic component during uncertain interval of time.

Under these circumstances, any attempts of the effective operating strategy creation based on direct forecasting of the market state are doomed to failure. Nevertheless, the fact of existence of a small percentage of successful traders allows one to make the assumption about existence of some ordering factors. So, it becomes possible to indirectly judge about the market state changes.

Research of correlations between various financial instruments of the currency market is given as an option of search of such order factors.

One of appendices of the correlation analysis of the currency market is identification of financial tools which, owing to the existence of a natural correlation, can be used as predictors in a problem of regression restoration of an assessment of the current cost of a market asset. Comparison of the received regression assessment to its current cost allows one to determine the level of underestimation or revaluation of an asset. This result, in turn, gives the chance to construct the market indicator of oscillator type and the operating strategy answering to it.

The correlation analysis, which is carried out in the real work, represents some information platform allowing to pass from the scheme of creation of operating strategy on the basis of the analysis of one-dimensional chaotic process to the scheme which is based on multidimensional quasichaotic process. Thus, decrease in chaotic degree is reached at the expense of the accounting of rather stable statistical relations between currency tools.

А.С. Гейда, З.Ф.Исмаилова, И.В.Клитный, И.В. Лысенко
**ОТНОШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ
ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ, ПОТЕНЦИАЛА СИСТЕМ
И СМЕЖНЫХ ОПЕРАЦИОННЫХ СВОЙСТВ**

Гейда А.С., Исмаилова З.Ф., Клитный И.В., Лысенко И.В. **Отношения эффективности функционирования, потенциала систем и смежных операционных свойств.**

Аннотация. В статье рассмотрены общие черты, особенности, перспективы использования различных видов операционных свойств в теории эффективности целенаправленных процессов, теории потенциала систем, при решении задач системной инженерии, задач военной науки, задач эконометрики. Показано, что использование предложенных общих подходов к использованию операционных свойств на основе прогнозирования соответствия характеристик эффектов характеристикам целей в разных условиях, на основе прогнозных математических моделей должно позволить решать значительный спектр имеющихся и новых задач в разных областях. Предложена шкала отношений порядка операционных свойств, позволяющая определить отношения между различными операционными свойствами на основе определения того, насколько полно передаются при исследовании этих свойств соответствия характеристик эффектов и целей функционирования.

Ключевые слова: операционные свойства, эффективность, действенность, производительность, потенциал системы, экономический потенциал, военный потенциал, потенциальные состояния, оценивание, цели, показатели, требования.

Geida A.S., Ismailova Z.F., Klitnyy I.V., Lysenko I.V. **Relations of Effectiveness of System Functioning, System Potential and Adjacent Operational Properties.**

Abstract. The article describes general features, distinctions and prospects of using different types of operational properties in the theory of targeted processes efficiency, theories of system capability, as well as for solving problems of systems engineering, problems of military science and tasks of econometrics. General approaches are offered for operational properties usage based on forecasting if characteristics of effects comply with characteristics of requirements under different conditions, using mathematical models. These approaches make it possible to solve a considerable range of current and new problems in different areas. A ratio scale of the order of operational properties is suggested. It allows one to determine the relations between various operational properties. It reflects the level of compliance between characteristics of effects and purposes of functioning.

Keywords: operational properties, efficiency, effectiveness, efficacy, productivity, performance, potential, potentiality, capabilities, capability, system potential, economic potential, military capabilities, military potential, estimation, goals, indicators, requirements.

1. Введение. Ранее [2] нами были введены операционные свойства систем и их функционирования, описаны основные задачи их исследования. Операционные свойства (ОСв) используются при решении разнообразных задач экономической теории, системной инженерии, при планировании функционирования предприятий, в других областях человеческой деятельности [1–9]. При этом наблюдается несогласованность используемых терминов, методов и моделей исследования ОСв в различных задачах. В статье установлены отношения порядка

между различными ОСв, описаны особенности различных ОСв и общий способ их оценивания. Отношения порядка установлены за счет указания видов связей различных ОСв и их показателей с целями функционирования. При этом, в основном, рассматриваются приложения в области техники и экономики. Используются следующие определения.

Техническая система [10, 11] – целостная совокупность элементов и связей между ними, используемая при реализации деятельности для достижения заданных целей. Как правило, *сложной технической системой* (СТС) называют техническую систему, изучение которой связано со сложностями, возникающими при исследовании технических систем. Например, отмечается [12], что такие сложности часто вызваны наличием людей и их коллективов, реализующих целенаправленную деятельность в составе ряда технических систем.

Цель функционирования СТС – желаемое состояние в будущем, характеристики желаемого результата функционирования СТС. Измеримые результаты функционирования СТС, к которым предъявляются требования, в соответствии с заданной целью функционирования СТС, называют *эффектами* функционирования СТС.

Операционные свойства СТС и ее функционирования – свойства СТС, характеризующие соответствие эффектов функционирования СТС [2] требованиям к этим эффектам, выдвигаемым в соответствии с целями функционирования СТС. Цели могут меняться во времени, что вызывается изменениями в среде СТС, в том числе – в результате деятельности в среде. Такие изменения называют *актуализацией целей*.

В зависимости от рассматриваемых целей, видов их актуализации, видов эффектов, видов соответствий эффектов требованиям к ним могут быть определены различные ОСв. За счет определения различных видов соответствий эффектов между собой и требованиям к ним далее определены виды ОСв и установлены отношения между ними.

ОСв исследуются, поскольку СТС создаются, а затем деятельность с их использованием (функционирование СТС) организуется, чтобы давать требуемые эффекты и достигать, в результате цепочки результатов, актуализируемые цели, а затем, возможно, переходить к достижению новых актуализируемых целей и (или) совершенствовать достижение существующих целей. Тем самым, ОСв – свойства, по которым следует судить о совершенстве и совершенствовании СТС и организованной с их использованием деятельности.

Если задана фиксированная цель функционирования заданной СТС, то отношение на границе СТС и среды, реализуемое для достижения этой конкретной цели, представляет собой функционирование

для достижения заданной цели – *целенаправленный процесс функционирования системы* (ЦПФС) [1, 2]. Так, если такой ЦПФС направлен на достижение одной из целей функционирования, для достижения которой СТС и создавалась, то такой ЦПФС называют процессом «целевого» функционирования. Если такой ЦПФС направлен на совершенствование СТС – например, для достижения новой цели (актуализированной взамен предыдущей), для улучшения достижения существующей цели, для модернизации системы так, чтобы достигалась новая цель или существующая цель достигалась с лучшими характеристиками – такой ЦПФС назовем *конверсией* [2, 13, 14]. Конверсией могут быть представлены как создание системы, так и ее утилизация, т.е. начало и конец *жизненного цикла (ЖЦ)* СТС.

Эффективность ЦПФС – свойство ЦПФС, характеризующее его приспособленность к достижению заданной цели. Как видно из приведенных определений, СТС может реализовывать комплекс ЦПФС. Соответственно, для описания ОСв СТС (реализующей комплекс ЦПФС) следует ввести ОСв СТС – ее потенциал.

Потенциал системы – свойство, характеризующее приспособленность системы к достижению целей при функционировании [2].

Эффективность ЦПФС – комплексное операционное свойство функционирования системы для достижения заданной цели, изучается в рамках теории эффективности ЦПФС [1]. Потенциал системы – комплексное ОСв системы. Изучается в рамках теории потенциала систем [13]. Необходимость судить об ОСв систем возникает при решении задач на всех этапах ЖЦ систем. Решаемые при этом задачи предлагается называть *задачами операционного совершенствования*. Возможные воздействия при решении задач операционного совершенствования направлены на лучшее достижение целей и описывают всевозможные способы улучшения достижения целей. Такие возможные воздействия систематизированы на схеме (рисунок Рис. 1) ниже. Эта последовательность изменений описывает все возможные пути формирования различных *способов действий по достижению целей* за счет определения отношений разного вида и изменения их характеристик. Тем самым, упрощенно деятельность может быть представлена, как комплекс (планируемых) способов действий, из множеств возможных и получение (прогнозируемых) откликов на них. Судить о прогнозируемых результатах операционного совершенствования следует по достигаемым показателям ОСв. К задачам операционного совершенствования относятся задачи теории эффективности [1–3], теории потенциала [13–15], задачи исследования эффективности в эконометрике,

задачи системной инженерии и многие другие задачи [4–12]. Рассмотрим особенности исследования ОСв.

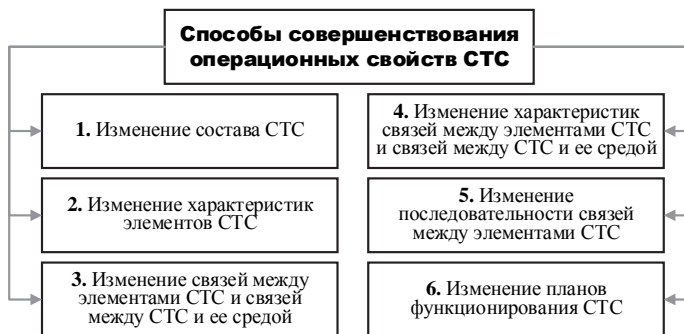


Рис. 1. Схема классификации возможных воздействий при совершенствовании операционных свойств СТС

2. Исследование операционных свойств в теории эффективности ЦПФС. В теории эффективности изучаются ОСв ЦПФС, в том числе комплексное ОСв ЦПФС – эффективность. Они исследуются по схеме решения задач исследований эффективности, приводимой ниже в упрощенном виде:

1. Строятся концептуальные и затем, формальные модели СТС и реализуемого СТС ЦПФС для достижения заданной цели, а затем решаемая задача описывается, как математическая задача исследований. Задачи описываются с учетом случайностей разного вида [11].

2. Строятся модели аналитических зависимостей между переменными значениями характеристик СТС и ЦПФС и эффектами ЦПФС.

3. Унифицировано, путем определения (теоретико-вероятностных, нечетких) мер соответствия эффектов между собой и требованиям к ним, в соответствии с целями ЦПФС, определяются показатели операционных свойств ЦПФС. Решаются математические задачи выбора оптимальных значений переменных.

Важнейшие достоинства описанной схемы исследований:

1. Исследования по схеме теории эффективности ЦПФС позволяют решать задачи научно обоснованно, на основе прогнозных математических моделей формирования эффектов, с учетом случайностей разной природы, на основе применения для решения задач формальных математических методов теории выбора, исследования операций, математического программирования.

2. Исследуются возможности наступления тех или иных состояний в будущем и их соответствие целям в зависимости от характеристик способов действий.

3. С использованием описанной схемы возможно успешное решение не только задач оценивания и анализа эффективности ЦПФС, но и решение задач синтеза. Решение таких задач позволяет «проектировать будущее» на основе предпринимаемых действий научно обоснованно, на основе использования математических моделей этого будущего.

Опишем схему исследований эффективности ЦПФС формализовано. Обозначим:

$\tilde{Y}(\pi; X)$ – вектор эффектов процесса функционирования СТС в соответствии с планом π функционирования для достижения заданной цели G функционирования. В этом векторе эффектов план – основная (для целей исследования) часть комплекса выбранных (и запланированных для реализации) способов действий людей (способов проявления свободы), из множества $\Pi \equiv \{\pi_n, n = \overline{1, N}\}$ возможных планов действий. Эффекты в векторе – отклик «природы» на выбранные способы «свободных» действий [16], функция от плана действий и природных параметров X СТС и ее функционирования.

$\tilde{Y}^o(G; X')$ – вектор требований к эффектам процесса функционирования СТС в соответствии с заданной целью G функционирования СТС и природными параметрами X' среды СТС и функционирования среды;

$P^{o\omega}(\tilde{Y}(\pi; X), \tilde{Y}^o(G; X')) \equiv Poss(\tilde{\mathbf{R}}(\tilde{Y}(\pi; X), \tilde{Y}^o(G; X')))$, где $\tilde{\mathbf{R}}$ – случайное отношение между $\tilde{Y}(\pi; X)$ и $\tilde{Y}^o(G; X')$;

$P^{o\omega}(\tilde{Y}(\pi; X), \tilde{Y}^o(G; X'))$ – возможность случайного события, состоящего в том, что будет достигнута цель функционирования СТС ОПК. Указанная возможность – величина, характеризующая меру соответствия результатов проявления «свободы» и «природы» [12,16] при функционировании СТС в заданной среде СТС, при достижения заданной цели функционирования СТС. Она используется в качестве показателя эффективности функционирования СТС для достижения заданной цели. Пусть, например, рассматривается случай, когда имеется 2 эффекта, оба они – числовые.

Например, $\tilde{Y}_1(\pi)$ – «целевой» результат, $\tilde{Y}_2(\pi)$ – время. $\tilde{Y}(\pi) \equiv \langle \tilde{Y}_1(\pi), \tilde{Y}_2(\pi) \rangle$; Пусть требования к результатам заданы в виде детерминированных чисел. $Y^\circ(G) \equiv \langle Y_1^\circ(G), Y_2^\circ(G) \rangle$.

Тогда, возможность достижения цели может быть, например, представлена с использованием вероятности (достижения цели):

$$P^{ou}(\tilde{Y}(\pi; X), \tilde{Y}^\circ(G; X')) = Poss((\tilde{Y}_1(\pi; X) \geq Y_1^\circ(G; X') \cap (\tilde{Y}_2(\pi; X) \leq Y_2^\circ(G; X'))).$$

Для использования полученных выражений при решении задач исследования операционных свойств необходимо связать полученные выражения со способами выполнения действий и их комплексами.

Пусть $y_{pq}(a_{pq}; x_{pq})$ – вектор эффектов, получаемых при реализации действия a_p способом действия a_{pq} . Здесь x_{pq} – характеристики, определяющие значения y_{pq} . Эти характеристики относятся к характеристикам природы. Способ действия a_{pq} относится к характеристикам свободы.

Эффекты, получаемые комбинированием различных мероприятий $a \equiv \{a_p, p = \overline{1, P}\}$, реализуемых различными способами $a_{Qp} \equiv \{a_{pq}, p = \overline{1, P}, q_p = \overline{1, Q_p}\}$, обозначим $Y_{PQ}(a_{Qp}; x_{Qp})$. Комбинации мероприятий и способов их реализации обозначим K_{PQ} .

Для решения задач исследования операционных свойств необходимо определить такие K_{PQ} и $Y_{PQ}(a_{Qp}; x_{Qp})$, что:

$$\tilde{Y}(\pi; X) = Y_{PQ}(a_{Qp}; x_{Qp}).$$

При этом, $\pi \subseteq K_{PQ}$, $X \subseteq \bigcup_{K_{PQ}} x_{Qp}$. Затем, следует решить задачи

оценивания, анализа и синтеза планов π по показателям операционных свойств. Увеличение числа способов возможных мероприятий, как и увеличение вариантов их комбинирования может вести к улучшению $Y_{PQ}(a_{Qp}; x_{Qp})$ (но может и не вести к такому результату).

3. Исследование операционных свойств в теории потенциала систем. Методология исследования потенциала систем опирается на методологию исследования эффективности. Опишем схему решения задач исследования потенциала СТС формализовано. Она использует приведенную выше схему решения задач оценивания эффективности.

Обозначим: $G_j - j$ -я цель использования заданной СТС из заданного множества G возможных целей использования этой системы;

$\tilde{A}_{j,s}$ – событие, состоящее в прекращении достижения цели $G_s \in G$ и актуализации цели $G_j \in G$; \sim – символ случайного объекта (события, величины, отношения);

$p_{j,s} \stackrel{d}{=} Poss(\tilde{A}_{j,s})$ – мера возможности актуализации $\tilde{A}_{j,s}$, где " $\stackrel{d}{=}$ " – символ «равенство по определению»; $\tilde{Y}'_{j,k}$ – величина (характеристика) прогнозируемого k -го результата функционирования СТС для достижения цели $G_j \in G$, $\tilde{Y}_j \equiv \{\tilde{Y}_{j,k}; k = \overline{I, K}\}$;

$\tilde{Y}_{s,j,k}''$ – величина (характеристика) прогнозируемого k -го результата конверсии СТС для перехода от достижения цели $G_s \in G$ к достижению цели $G_j \in G$, $\tilde{Y}_j \equiv \{\tilde{Y}_{j,k}; k = \overline{I, K}\}$;

$\tilde{Y}_{s,j,k}^{\circ}$ – величина (характеристика) требуемого (директивного) k -го результата функционирования СТС для достижения цели $G_j \in G$, $\tilde{Y}_j^{\circ} \equiv \{\tilde{Y}_{j,k}^{\circ}; k = \overline{I, K}\}$ (с учетом требований конверсии);

$\tilde{Y}_{s,j,k} = f(\tilde{Y}'_{j,k}, \tilde{Y}_{s,j,k}'')$ – величина (характеристика) k -го результата конверсии для перехода от достижения цели $G_s \in G$ к достижению цели $G_j \in G$ и последующего функционирования СТС, например, $\tilde{Y}_{s,j,k} = \tilde{Y}'_{j,k} + \tilde{Y}_{s,j,k}''$, если одноименные эффекты конверсии и (целевого) функционирования аддитивны;

$$\tilde{R}_{s,j,k}(\tilde{Y}_{s,j,k}, \tilde{Y}_{s,j,k}^{\circ}) \equiv \{(\tilde{Y}_{s,j,k,z}, \tilde{Y}_{s,j,k,z}^{\circ}), z = \overline{I, Z}\};$$

$\mu_{\tilde{R}_{s,j,k}}(Y_{s,j,k}, Y_{s,j,k}^{\circ})$ – случайное отношение между k -м результатом конверсии и последующего функционирования и требованиями к нему, то есть – множество $k.z$ -х пар величин (характеристик) прогнозируемых и требуемых результатов функционирования, таких, что они могут находиться в требуемом отношении $\tilde{R}_{s,j,k}(\tilde{Y}_{s,j,k}, \tilde{Y}_{s,j,k}^{\circ})$ друг с

другом и мера $\mu_{\tilde{R}_{s,j,k}}(Y_{s,j,k}, Y_{s,j,k}^{\circ})$ возможности случайного события, состоящего в том, что отношение $\tilde{R}_{s,j,k}(\tilde{Y}_{s,j,k}, \tilde{Y}_{s,j,k}^{\circ})$ будет выполнено;

$$\tilde{\mathbf{R}}_{s,j}(\tilde{Y}_{s,j}, \tilde{Y}_{s,j}^{\circ}) \equiv \bigcup_{k=1, \bar{K}} \tilde{R}_{s,j,k}(\tilde{Y}_{s,j,k}, \tilde{Y}_{s,j,k}^{\circ}) - \text{комплексное случайное}$$

k – мерное отношение между результатами конверсии для перехода от достижения цели $G_s \in G$ к $G_j \in G$ и последующего функционирования для достижению цели $G_j \in G$ и требованиями к ним при условии актуализации цели $G_j \in G$ после $G_s \in G$;

$\tilde{A}_{\tilde{\mathbf{R}}_{s,j}}(\tilde{Y}_{s,j}, \tilde{Y}_{s,j}^{\circ})$ – случайное событие, состоящее в том, что случайное k – мерное отношение $\tilde{\mathbf{R}}_{s,j}$ будет реализовано на множестве пар $(\tilde{Y}_{s,j}, \tilde{Y}_{s,j}^{\circ})$, каждая из которых принадлежит отношению $\tilde{\mathbf{R}}_{s,j}$ с $\mu_{\tilde{R}_{s,j,k}}$;

$Poss(\tilde{A}_{\tilde{\mathbf{R}}_{s,j}}(\tilde{Y}_{s,j}, \tilde{Y}_{s,j}^{\circ}))$ – показатель эффективности и конверсивности достижения заданной цели G_j при условии ее актуализации в результате прекращения достижения цели $G_s \in G$; \tilde{Y} – вектор характеристик результатов конверсии и функционирования СТС; \tilde{Y}° – вектор характеристик требований к результатам конверсии и функционирования СТС;

$$\tilde{\mathbf{R}}(\tilde{Y}, \tilde{Y}^{\circ}) \equiv \bigcup_{\substack{j,s \in \bar{1}, \bar{J}; \\ j \neq s}} \tilde{\mathbf{R}}_{s,j}(\tilde{Y}_{s,j}, \tilde{Y}_{s,j}^{\circ}) - \text{случайное } s \cdot j - \text{ мерное отношение}$$

между результатами функционирования и требованиями при переходах от достижения цели $G_s \in G$ к достижению цели G_j ;

$\tilde{A}_{\tilde{\mathbf{R}}(\tilde{Y}, \tilde{Y}^{\circ})}$ – случайное событие, состоящее в том, что случайное отношение $\tilde{\mathbf{R}}$, введенное выше, будет реализовано на множестве пар $(\tilde{Y}, \tilde{Y}^{\circ})$ при переходах от достижения цели $G_s \in G$ к достижению G_j ;

$\Psi(\tilde{Y}, \tilde{Y}^{\circ}) \equiv Poss(\tilde{A}_{\tilde{\mathbf{R}}(\tilde{Y}, \tilde{Y}^{\circ})}(\tilde{Y}, \tilde{Y}^{\circ}))$ – общее выражение для показателя потенциала СТС в многомерном виде, мера возможности события, состоящего в реализации требуемого отношения на всех возмож-

ных реализациях (случайного) отношения между эффектами. ОСв, кроме ТЭЦП и теории потенциала, исследуются при решении многих задач [4–15, 17–30]. Рассмотрим их особенности.

4. Исследование операционных свойств при решении задач системной инженерии. Элементы концепции и методологии теории потенциала целесообразно использовать *при решении задач системной инженерии* [12, 19, 22] и других задач, возникающих при исследовании сложных систем [18–29]. Предмет системной инженерии понимается пока неоднозначно, обычно под задачами системной инженерии («Systems Engineering») принято [12, 21] понимать такие задачи, которые возникают при рассмотрении всевозможных процессов, реализуемых для проектирования, создания и других процессов жизненного цикла искусственных систем. Задачи системной инженерии часто [17] описываются, как три (и более) единство системы отношений между элементами технической системы, системы отношений при функционировании этих элементов системы и системы отношений в процессе жизненного цикла системы. В [12] указано, что системную инженерию следует реализовывать в операционном пространстве («functional space»), исследуя цепочки преобразования эффектов. Так в [12] при описании концепции системной инженерии вводятся следующие основные концепты, связанные с получением *цепочек эффектов в различных условиях*: установка, предприятие («plant»), функционирование которого направлено на выпуск продукта; продукт («product»), производимый предприятием или установкой; услуга, предоставляемая заказчику («service») с использованием продукта (установки); заказчики («users»), заинтересованные лица («stakeholders»), инженерия («engineering»), затраты («cost»), целевые результаты («revenue»). Утверждается, что судить о совершенстве результатов системной инженерии следует по соотношению целевых результатов и затрат при функционировании создаваемой системы. По аналогии с соответствующим финансовым показателем, указанное соотношение названо прибылью на вложения («Return On Investment», ROI), понимаемым расширительно, не только в финансовом смысле. Мера такого соответствия может быть установлена *при исследовании ОСв аналитически, на моделях*, если требования («stakeholder concerns») выражены формализовано.

Вайн Ваймор (Wayne Wymore) [29] считает, что основная высокоуровневая функция системной инженерии – убедиться в том, что система удовлетворяет требованиям к ней на всех этапах жизненного цикла. Функциональный аспект преобразования ресурсов представляется автором, как основа для описания систем и их функционирования,

с использованием основного несводимого функционального элемента, реализующего преобразование ресурсов в результаты («irreducible functional element», IrE) исследуемым классом систем с той или иной структурой и составом. В [47] такой элемент, *фактически – модель формирования ОСв*. Отличие модели показателя ОСв, введенного выше от модели IrE состоит, в следующем:

1. Модель показателя описывает соответствие целям, а не только соответствия эффектов в IrE и отражает «stakeholder concerns».

2. Модель показателя описывает формирование показателей от эффектов и требований затем – от переменных, и тем самым, позволяет формулировать задачи, как *оптимизационные математические задачи*.

3. Модель показателя содержит описание того, *какие модели должны быть построены* для решения задач.

Эффекты, введенные ранее при описании способов действия могут быть представлен в функциональном виде, как функция f_{pq} , сопоставляющая эффектам – затратам ресурсов $y_{pq}^{pec} \subseteq y_{pq}$ (в том числе времени $t_{pq} \in y_{pq}^{pec}$) эффекты – целевые результаты $y_{pq}^{цел} \subseteq y_{pq}$:

$$f_{pq}(y_{pq}^{pec}, a_{pq}; x_{pq}) \equiv y_{pq}^{цел}(y_{pq}^{pec}, a_{pq}; x_{pq}).$$

Такая функция и есть аналог IrE системной инженерии.

С использованием таких функций, путем их комбинирования в систему действий с разными характеристиками и реализуются требуемые преобразования эффектов. Исследование ОСв и системная инженерия *пересекаются по решаемым задачам*. Представляется, что системная инженерия шире, поскольку она носит практический, мультидисциплинарный характер, а исследование ОСв носит теоретический характер и реализуется на основе математических моделей и методов.

5. Исследование операционных свойств при решении задач военной науки. В военной науке активно используется [30, 31] понятие боевого, военно-экономического потенциала. Необходимость исследования потенциала вооруженных сил, оборонно-промышленного комплекса (ОПК), предприятий и организаций обуславливается, в частности, наличием разнообразных цепочек преобразований результатов при их функционировании. К числу элементов таких цепочек относятся эффекты государственной программа вооружений (ГПВ), государственного оборонного заказа (ГОЗ), федеральных целевых программ совершенствования предприятий ОПК (ФЦП), программ фундаментальных исследований (ПФИ). Эти цепочки должны приводить к достижению целей государства по обеспечению безопасности.

Важность исследования операционных свойств систем и их функционирования для решения комплекса задач национальной обороны отмечается и в публикациях стран НАТО по оборонной тематике. В [39] введены показатели операционных свойств – МОЕ (measure of effectiveness, МОР (measure of performance), ТРМ (Technical Performance Measures), Key Performance Parameters (KPP). Определен порядок их оценивания. [17]. Оценивание этих свойств необходимо [35–39], при решении задач исследования процессов системной инженерии и задач организации процессов приобретения вооружения и военной техники («military acquisitions»), соответствующим ГПВ и ГОЗ в РФ.

МОЕ определена, как показатель свойства, характеризующего приспособленность достигать цели («операционная мера успеха»). При этом не предполагается фиксированной (заданной) какая-либо система.

МОР определены, как основные характеристики функционирования заданной системы для достижения заданной цели, определяющие эффективность конкретного функционирования. ТРМ – характеристика элемента и описывает операционные свойства элементов систем. Фактически, речь идет о потенциале элементов СТС выполнять задания СТС. КРР – основные характеристики системы и процессов ее функционирования, определяющие ее эффективность. Они близки по смыслу параметрам системы и ее функционирования, от которых зависят характеристики эффектов в ТЭЦП. При этом утверждается [17], что в качестве КРР используют не все, а основную часть параметров, отклонения которых могут приводить к несоблюдению требований заказчика. В результате, совокупность введенных в [37–39] показателей, если их увязать в комплекс с характеристиками целей и описать показатель эффективности через меру соответствия характеристик эффектов характеристикам целей – так, как это реализовано в ТЭЦП, позволит оценивать МОЕ, как комплексный показатель эффективности.

Исследование потенциальных возможностей («Capabilities») изделий вооружения и военной техники и связь их с эффективностью применения, а затем с эффективностью жизненного цикла и другими операционными свойствами обсуждается в [35]. Потенциальная возможность («Capability») определена генеральным штабом ВС США [39] как «возможность достигать желаемого эффекта согласно имеющимся стандартам и условиям путем комбинации путей и средств реализации множества действий». Представляется, что данное определение довольно близко по смыслу к понятию о потенциальных состояниях системы при исследовании потенциала СТС. При этом ряд авторов определяет это понятие по-другому. Так, в «Capabilities approach» А. Сена [40] «Capability» – возможность реализовать успеш-

ное функционирование и соответственно, возможность получить результат процесса функционирования (Functioning), возможные достижимые состояния, которые способна достигать система («capable of») за счет функционирования. Понятие о «Capabilities» и во множественном числе, «Capabilities», активно используется при исследовании «Систем систем» (System of Systems) и в других оборонных исследованиях стран НАТО [32, 33].

В [33] указаны требования к описанию «Capabilities». В частности, характеристики, описывающие их и единицы их измерения должны быть такими, чтобы можно было оценить соответствие характеристик целям и *эффективность достижения целей* [33].

Говоря о «Capabilities» следует иметь в виду состояния (достижимые возможности) функционирования (при достижении той или иной цели). *Потенциальным состоянием* будем называть состояния системы, которое может быть получено при функционировании системы для достижения какой-либо цели [33]. Совокупность потенциальных состояний и характеристик целей функционирования в разных условиях («Capabilities objectives») [32] позволяет определить потенциал исследуемой системы, а затем использовать полученные значения для планирования, основанного на потенциальных возможностях («Capability based planning») [34], путем решения соответствующих математических задач. Такое исследование операционных свойств при решении задач военной науки должно позволить перейти к решению практических задач, как математических оптимизационных задач на числовых моделях.

6. Исследование операционных свойств в эконометрике.

Эффективность в эконометрике [7] понимается, как свойство предприятия, характеризующее отсутствие несовершенства объекта исследований (исследуется предприятия и их функционирование) по сравнению с наилучшими известными образцами для заданных условий известного рынка. Такое понимание восходит к идеям Г. Дебре и М. Фарелл [41], состоящих в том, что эффективность предприятия той или иной отрасли может быть измерена тем приростом выпускаемого продукта, который может в текущих «обычных» экономических и технических условиях для отрасли быть достигнут без дополнительного расходования ресурсов предприятием. Такого рода понимание эффективности будем называть *«эконометрической» эффективностью*.

Наилучшие образцы и их характеристики для разных условий определяются путем исследования имеющихся статистических данных, с определением границы производственных возможностей, называемой также эффективной гиперповерхностью [42, 28] – «frontier». По

расстоянию до этой границы и определяются показатели, принимаемые, как показатели эффективности разных видов. Так, например, имеется метод анализа среды функционирования [5, 43] («Data Envelopment Analysis», DEA), метод [41] стохастической производственной границы («Stochastic Frontier Analysis», SFA). Точки эффективной гиперповерхности можно трактовать, как целевые значения характеристик функционирования (цель – достижение уровня лидеров, уровня границ производственных возможностей), а «расстояние» до точек гиперповерхности – как меру «недостижения» цели. При такой трактовке эконометрическая эффективность может быть увязана с эффективностью ЦПФС в теории эффективности ЦПФС (ТЭЦП), как с более общим понятием. А именно, в ТЭЦП показатели эффективности ЦПФС (и ряда других, частных операционных свойств) измеряются не по мере выполнения отношения близости к «идеальным» эффектам, а по мере выполнения отношения, определяющего достижение заданной цели функционирования. Цель в ТЭЦП чаще всего описывается, как ограниченная область гиперпространства эффектов. При задании же цели с использованием эконометрических представлений, цель определяется характеристиками эффективной гиперповерхности. Разница между двумя концепциями оценивания эффективности – эконометрической эффективности и эффективности ЦПФС в такой трактовке цели будет заключаться в определении цели и меры соответствия эффектов целям. При этом, в эконометрических методах, использующих стохастическую производственную границу оценивание эконометрической эффективности будет примерно соответствовать оцениванию эффективности в ТЭЦП при условии задания в качестве характеристик цели области производственной границы. Отличие оценивания эффективности ЦПФС от эконометрического оценивания эффективности состоит в том, что характеристики эффектов и целей рассчитываются на основе прогноза, а не наблюдаются.

7. Шкала отношений порядка операционных свойств. Как следует из выполненного анализа, во многих разделах технических и экономических наук используются разные представления об операционных свойствах, причем достаточно часто эти понятия недостаточно согласованы. В зарубежных англоязычных источниках используются такие понятия, как производительность (англ. «productivity» – производительность, продуктивность, эффективность) и потенциальная эффективность, качество функционирования (англ. «performance» – действие, качество функционирования, производительность), которые, как утверждает ряд авторов, следует отличать от свойств, определяемых рядом различных англоязычных понятий, тоже переводимых, как

эффективность («effectiveness, efficacy, effectiveness»), несмотря на то, что их смысл не только в отечественных но и в зарубежных источниках различается. В связи с этим представляется важным рассмотреть эти и ряд других понятий, используемых в отечественной и зарубежной литературе в тех случаях, когда исследователь стремится характеризовать результаты функционирования – т.е., операционные свойства систем и их функционирований и предложить такой принцип классификации свойств, чтобы установить отношения порядка между используемыми терминами, описывающими операционные свойства. В качестве принципа для установления такого отношения порядка предлагается использовать полноту описания отношения с характеристиками целей функционирования различными операционными свойствами и их показателями. Анализ терминов для обозначения ОСв, их показателей, соответствующих концептов и денотатов, практики их употребления свидетельствует, что их отличия состоят в степени учета характеристик целей функционирования, а общность состоит в том, что все они так или иначе используют для оценивания показателей ОСв характеристики эффектов функционирования СТС для достижения каких-либо целей. Представление о цели и эффективности функционирования, как свойстве, характеризующем приспособленность к достижению заданной цели, согласуется с традиционными понятиями из теории стрельбы, теории эффективности целенаправленных процессов [1–3] представлениями о цели и, затем, об эффективности функционирования, как о мере возможности достижения цели [2], с практикой решения оптимизационных и других задач теории эффективности [13], нормативными документами и стандартами, определяющими эффективность функционирования технических систем [6, 44]. С использованием различных мер отношений характеристик эффектов с характеристиками целей функционирования оказывается возможным определить *шкалу отношений порядка* [45] *ОСв*.

Когда какое-либо свойство исследуется по эффектам функционирования СТС, эффекты следует рассматривать комплексно, если в названии свойства не выделены какие-либо определенные группы эффектов (например, оперативность, ресурсоемкость). Поэтому представляется, что все свойства, название которых содержит корень «effect» должны описывать весь комплекс эффектов, а не их часть, и должны включать отношение с определенной целью или целями и именно в особенностях этого отношения с целями должны различаться указанные свойства. *Комплексные операционные свойства* описывают эффекты, отношения между эффектами и отношения с целями функционирования на разных уровнях. Следует выделить *частные опера-*

ционные свойства, содержащие в своем названии или определении конкретные эффекты. Например, производительность труда в самом названии содержит описание эффекта (затраты трудовых ресурсов), который выделен при исследовании. Энергоэффективность содержит указание на ресурс в виде энергии, который изучается исследователем. Поэтому, при исследовании таких свойств рассматривается лишь часть эффектов.

По отношению к достижению целей функционирования системы комплексные операционные свойства функционирования СТС следует условно разместить в порядке «productivity», «efficacy», «efficiency», «effectiveness», «performance». За указанной группой свойств располагают свойства потенциала системы, конкурентоспособности, а затем, возможно, и другие еще не введенные свойства. Перейдем к описанию ОСв в разных частях предлагаемой шкалы.

Представления о различных операционных свойствах и их соответствия с другими операционными свойствами по отношению к целям функционирования могут быть проиллюстрированы (рисунок 2) с использованием схем, на которых в разные моменты времени схематически представлены объекты, необходимые для исследования ОСв.

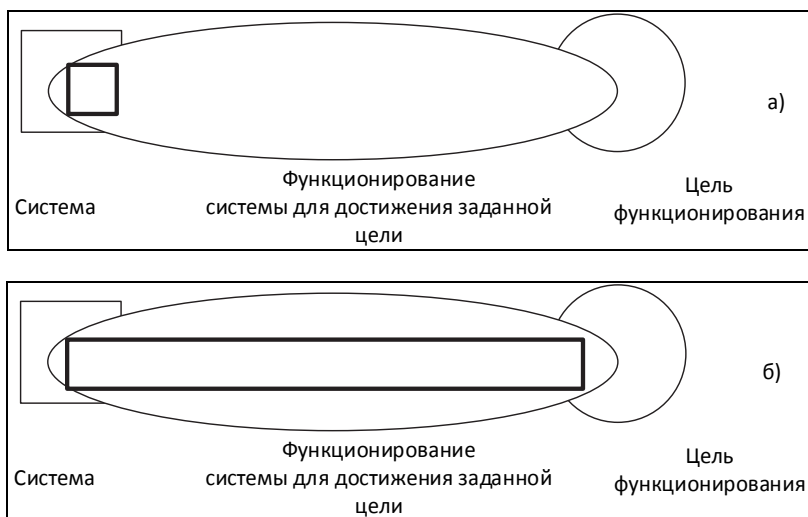


Рис. 2. Схема проявления операционных свойств: а) «efficacy», б) «efficiency»

Квадратом изображена система, прямоугольник с полужирным выделением описывает ту часть системы и ее функционирования, которая отражается при исследовании соответствующего операционного

свойства, овалом передан процесс функционирования системы и кругом – цель функционирования, рисунок 2, а) иллюстрирует объекты исследования и их отношения при исследовании производительности и эффективности в том смысле, который обычно вкладывается в понятия «performance», «efficacy». Такие показатели характеризуют функционирование системы частично, например, за счет показателей производительности, энергоэффективности, а для эффективности в смысле «efficacy» – за счет оценивания всего комплекса отношений между эффектами. Цель и степень ее достижения не оценивается этими показателями, но косвенно учитывается путем указания какой результат целевой, а какой нет. На рисунке б) проиллюстрированы объекты исследования, оцениваемые при исследовании эффективности в смысле “efficiency” и в ряде случаев – “effectiveness”. Свойства, оцениваемые в соответствии со схемой (рисунок 2, а)) считаются свойствами, учитывающими отношения с целями в меньшей степени, чем свойства, оцениваемые в соответствии со схемой, приведенной на следующей схеме (рисунок 2, б)). Говорят, что свойства (рисунок 2, б)) находятся *выше в шкале операционных свойств* по их отношению с целями, чем свойства (рисунок 2, а)). Рассмотрим ряд свойств, оцениваемых по указанным схемам.

Продуктивность, производительность («productivity»). При исследовании вопрос о достаточности получаемых результатов для достижения каких-либо целей не ставится. Однако, несмотря на это, для оценивания этого свойства нужно иметь представление о том, для получения каких (целевых) эффектов расходуются ресурсы. Тем самым, сведения о цели учтены, но событие, состоящее в достижении цели, не исследуется. Ряд авторов [46–48] указывает на то, что производительность должна исследоваться лишь с учетом целей и задач функционирования предприятия и стратегии достижения указанных целей.

Свойство, передающееся термином «performance» лучше не использовать в смысле производительность, продуктивность. Этот термин лучше понимать, как эффективность в широком смысле. Так, С. Гросскопф [49], например, определяет продуктивность, как свойство, составной частью которой является эффективность («efficiency»). Последняя понимается в узко эконометрическом смысле, как отсутствие производственных и других потерь по сравнению с имеющимся образцом.

В задачах теории эффективности ЦПФС [1–3] производительность – одна из характеристик операционного функционала. В [55] отмечается, что различие понятий об эффективности («efficacy, efficiency, effectiveness, performance») и продуктивности лежит в определении разных видов отношений между входами, выходами и целями.

Понятие о *действенности* («*efficacy*» – действенность, эффективность, эффективность) представляется на шкале отношений с целями функционирования ближе всего к продуктивности и производительности и дальше всего от свойств, комплексно описывающих соответствие целям. Эффектность, действенность, как и производительность, оценивается в отсутствии сведений о достижении цели, но в предположении, что общие сведения о цели имеются. А именно, известен весь комплекс эффектов и то, как они преобразуются. Этим действенность и отличается, на наш взгляд, от производительности и продуктивности, где известны целевые и обеспечивающие эффекты, но, возможно, не все. Действенность определяется результатами действия, на которые оно было направлено. Эти результаты – затраты ресурсов и целевые результаты, поскольку действие состоит в обмене ресурсов на результат и без затрат ресурсов результат не может быть реализован. Однако, предположений о достижении цели при исследовании «*efficacy*» нет.

Когда какое-либо свойство исследуется по эффектам функционирования СТС, эффекты следует рассматривать комплексно, если в названии свойства не выделены какие-либо определенные группы эффектов (например, оперативность, ресурсоемкость). Поэтому представляется, что все свойства, название которых содержит «*effect...*» должны описывать весь комплекс эффектов, а не их часть. Термины оперативность, ресурсоемкость, результативность, безопасность описывают ОСв, но не содержат корня «*effect*», не характеризуют все результаты и не могут называться комплексным ОСв, являясь частными ОСв.

Рассмотрим понятия о комплексных ОСв, описываемых англоязычными терминами «*effectiveness*» и «*efficiency*». Они находятся далее от «*efficacy*» по разрабатываемой шкале отношений ОСв. Схема оценивания для эффективности в смысле «*efficiency*» была приведена ранее на схеме (рисунок 2, б)). На схеме (рисунок 3, а)) проиллюстрировано оценивание показателя ОСв в смысле «*effectiveness*», когда исследуется последовательность достигаемых целей. Рассматриваемое ОСв «*effectiveness*» продолжает и использует исследование ОСв «*efficiency*» в том смысле, что оно рассматривает цепочки получения эффектов, образующиеся в результате достижения целей. Например, произведенная продукция и израсходованные для этого ресурсы позволяют перейти к обмену (продукцией, ресурсами) со средой, а затем – к получению прибыли [12] в широком ее понимании. Сейчас нет общепринятого определения «*efficacy*», «*effectiveness*» и «*efficiency*» и их различий в русском переводе и эти термины, как и англоязычный термин «*performance*» обычно переводят, как эффективность. Тем не менее, сложилась определенная практика использования англоязыч-

ных терминов. Как указано в [50, 51] «efficiency» означает "делать вещи правильно", а «effectiveness» - делать правильные вещи ("Efficiency is doing things right, effectiveness is doing the right things.").

Понятие «effectiveness» на шкале операционных свойств ближе к понятию эффективности ЦПФС, однако, менее связано с целью, чем понятие эффективности ЦПФС. А именно, «делать правильные вещи» еще не значит достичь цели. В этом смысле, ближе всего к понятию эффективности ЦПФС представляется англоязычное понятие о «performance».

Следует отметить, что в разных источниках (в том числе, нормативных) указанные понятия трактуются по-разному. Так, например, в соответствии с глоссарием библиотеки инфраструктуры информационных технологий (IT Infrastructure Library, ITIL) [52] «effectiveness» переведена, как результативность, а «efficiency», как эффективность. ГОСТ Р ИСО/МЭК 27000-2012 [54] содержит определение «efficiency», как результативности и «effectiveness», как эффективности. При этом, в определениях этих ОСв авторы связывают «efficiency» с преобразованием ресурсов в результаты, а «effectiveness» с достижением целей и использованием полученного результата. На наш взгляд, оба свойства описывают достижение целей. Отличия связаны с тем, какие цели и цепочки целей и за счет чего достигаются. А именно, представляется, что «efficiency» характеризует достижение цели процесса преобразования ресурсов в результат, а «effectiveness» – последующего процесса удовлетворения потребителя. Следует учитывать, что результативность может переводиться еще и как «productivity» и не связываться с затратами всех ресурсов и достижением всех требуемых результатов [2, 6], а потому может характеризовать достижение цели лишь частично. При использовании термина эффективность необходимо уточнять чего (какого ЦПФС по достижению каких целей) эффективность рассматривается – эффективность преобразования ресурсов в требуемый результат или эффективность такого преобразования, а затем – преобразования по передаче результата в среду (обмена) и потребления результатов такого обмена. Если указанные термины переводить, как эффективность, но уточнять, какой процесс (процессы) достижения каких целей рассматриваются, то отличий в трактовке возможно избежать. В результате, «effectiveness» описывает то, как надо («правильно») достигать комплексные цели (решать комплекс задач) за счет правильного же выполнения ЦПФС достижения целей в цепочках достижения целей. Близкое по смыслу свойство эффективности в смысле «performance», как правило, понимается так, что оно включает и «efficacy», и «efficiency», и «effectiveness» и

соответственно, его следует определять, как находящееся выше эффективности в смысле «effectiveness» на шкале операционных свойств.

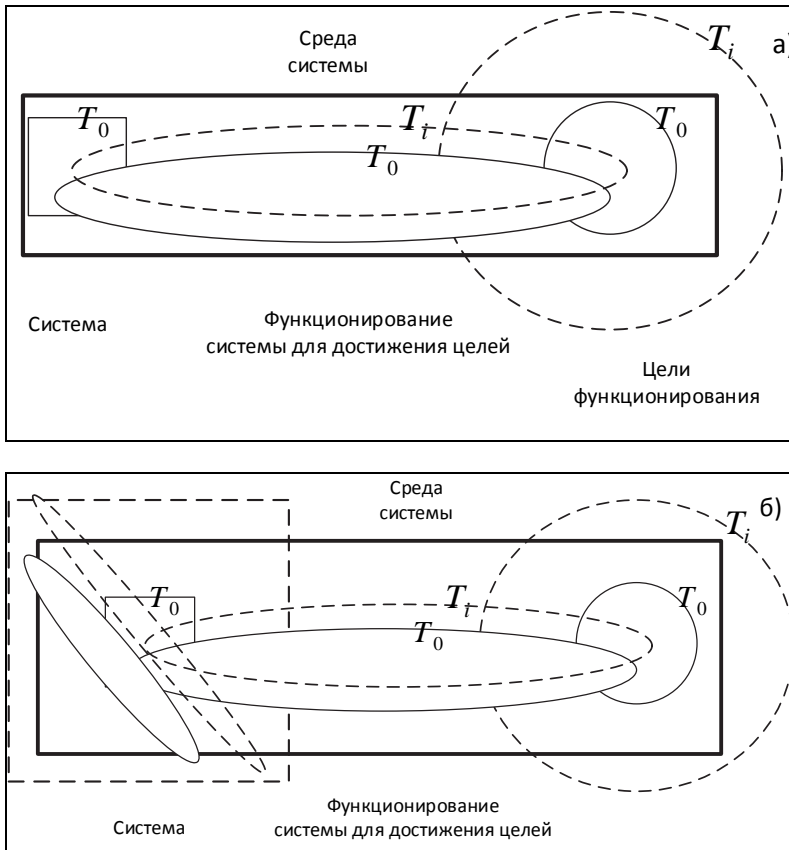


Рис. 3. Схема проявления операционного свойства effectiveness а) и потенциала б)

Рассматриваемые цепочки результатов включают только цепочки получения эффектов одного функционирования, а не другие возможные функционирования по достижению целей при разных функционированиях, реализуемых системой. Среди таких целей могут быть цели изменения системы и ее функционирования, ее конверсии для достижения новой цели, обмена со средой для продолжения достижения целей. Последовательности проявлений цепочек эффектов функционирования системы при этом следует рассматривать как более общее, по отношению к исследуемым целям, соответствие эффектов тре-

бованиям, чем свойство «effectiveness». Для такого исследования необходимо ввести соответствующее операционное свойство СТС – *свойство потенциала СТС* [2]. Это свойство относится к другому объекту исследований – системе, и на рассматриваемой шкале лежит выше свойства «effectiveness». При этом оказывается необходимым исследовать не только последовательности (цепочки) процессов достижения целей, направленных на достижение стратегической цели, но и цепочки процессов функционирования, цели которых связаны с переводом системы от достижения одной цели к достижению новой цели, сменившей исходную, или к продолжению достижения цели.

На схеме (рисунок 3, б)) показано оценивание потенциала СТС и аналогичных свойств – таких, как экономический потенциал предприятия, экономический потенциал рынка, отрасли. Оцениваются не только процессы достижения целей, но и переходы системы от достижения одной цели к достижению последующей (показаны условно в виде штриховых линий в левой части схемы, соответствующей системе в разные моменты времени).

В [12] подчеркивается, что исследовать систему необходимо именно как систему указанных процессов, как систему функционирования («system of functional elements»), что позволяет в частности, решить проблему формирования «эмерджентных» свойств, поскольку при объединении в комплекс функциональных элементов проблемы с «эмерджентными» свойствами не возникает [12]. Изложенное выше позволяет сделать вывод о том, что исследование комплексных ОСв следует осуществлять так, чтобы исследовалась система соответствий результатов функционирования системы характеристикам достигаемых целей и при этом, и функционирование и цели рассматривались, как система.

Такое исследование предполагается реализовать, например, при исследовании комплексных ОСв информационных технологий.

7. Заключение. С общих позиций рассмотрены особенности исследования ОСв систем и их функционирования при решении различных практических задач. Описаны общие черты, различия, перспективы решения задач исследования различных видов ОСв. Предложен общий подход к исследованию ОСв на основе прогнозирования соответствия характеристик эффектов и целей в разных условиях. Полученные результаты позволяют научно обоснованно выбирать и оценивать исследуемое ОСв в решаемых задачах, в зависимости от объекта исследований, его особенностей и особенностей задачи. С использованием предложенного общего подхода к исследованию различных ОСв представляется возможным выполнить научно обоснованное определение ОСв ин-

формационных технологий и других объектов, для решения задач исследования которых необходимо оценивать такие свойства.

Литература

1. *Морозов Л.М., Петухов Г.Б., Сидоров В.Н.* Методологические основы теории эффективности. Учебное пособие / Под ред. Юсупова Р.М. // Л.: МО СССР. 1979. 174 с.
2. *Петухов Г.Б., Якунин В.И.* Методологические основы внешнего проектирования целенаправленных процессов и целеустремленных систем // М. АСТ. 2006. 504 с.
3. *Гейда А.С., Лысенко И.В.* Оценка показателей операционных свойств систем и процессов их функционирования // Труды СПИИРАН. 2013. № 25. С. 317–337.
4. *Franceschini F., Galetto M., Maisano D.* Management by Measurement: Designing Key Indicators and Performance Measurement Systems // Springer, 2007. 242 p.
5. *Drucker P.F.* The Effective Executive: The Definitive Guide to Getting the Right Things Done // HarperCollins Publishers. 2006. 202 p.
6. ГОСТ Р 27.002-2009. Надежность в технике. Термины и определения. ИЕС 60050: 1990-12 (NEQ) // М.: Национальный стандарт российской федерации. 2009. 247 с.
7. *Кривоножко В.Е., Сафин М.М., Уткин О.Б., Лычев А.В.* Программный комплекс «EffiVision» для анализа деятельности сложных систем // «Информационные технологии и вычислительные системы». 2005. № 3. С. 85–95.
8. *Гонтарева И.В., Нижегородцев Р.М.* Системная эффективность предприятия: сущность, факторы, структура // Москва-Киров: ВСЭИ. 2012. 152 с.
9. *Разумовский В.А.* Анализ эффективности инвестиционных проектов в интерактивном режиме // Вооружение. Политика. Конверсия. М. 2003. № 4. С. 17–25.
10. *Резников Б.А.* Системный анализ и методы системотехники. Часть 1. Методология системных исследований. Моделирование сложных систем // М.:МОСССР. 1990. 645 с.
11. *Лысенко И.В.* Анализ и синтез сложных технических систем. Часть 1. Анализ и синтез систем обеспечения готовности ракет-носителей и космических аппаратов к запуску (основы теории) // М.: Воениздат. 1995. 365 с.
12. *Aslaksen E.W.* The System Concept and Its Application to Engineering // Springer. 2013. 266 p.
13. *Гейда А.С., Исмаилова З.Ф., Клишный И.В., Лысенко И.В.* Задачи исследования операционных и обменных свойств систем // Труды СПИИРАН. 2014. № 35. С. 136-160.
14. *Гейда А. С., Лысенко И. В.* Задачи исследования потенциала социально-экономических систем // Труды СПИИРАН. 2009. № 10. С. 63–84.
15. *Гейда А. С., Лысенко И. В.* Автоматизация решения задач исследования потенциала систем и эффективности их функционирования // Труды СПИИРАН. 2012. № 22. С.260–281.
16. *Кант И.* Критика чистого разума / Перевод Н. Лосского // М.: Мысль. 1994. 591 с.
17. *Systems engineering handbook. A “what to” guide for all SE practitioners. Technical Report INCOSE-TP-2003-016-02. Version 2a // International Council Systems Engineering, 2004.*
18. *Downey A.B.* Think Complexity. Complexity Science and Computational Modeling // O’Reilly Media. 2012.
19. *Hybertson D.W.* Model-oriented systems engineering science: a unifying framework for traditional and complex systems // Auerbach. 2009. 379 p.

20. *Sudit E.F.* Effectiveness, Quality and Efficiency: A Management Oriented Approach // Springer. 1996. 136 p.
21. Guide to the System Engineering Body of Knowledge. SEBoK v. 1.3.1 // INCOSE. 2014.
22. *Kossiakoff A., Sweet W., Seymour S., Biemer S.* Systems Engineering Principles and Practice. Second Edition // John Wiley & Sons, Inc. 2011. 560 p.
23. *Schlenker L., Matchar A.* The effective organization. The Nuts and Bolts of Business Value // John Wiley & Sons. 2005. 202 p.
24. *Simpson J.J., Dagli C., Miller A.* Development and Application of Abstract Relation Types for Use in Systems and System-of-Systems Design and Evaluation // Proceedings of Seventeenth Annual International Symposium of INCOSE. Systems Engineering: Key to Intelligent Enterprises. San Diego. California. 2007.
25. *Simpson J.J., Simpson M.J.* Formal, theoretical aspects of systems engineering // Systems Engineering. 2010. vol. 13. Issue 2. pp. 204–207.
26. *Stevens R.* Engineering Mega-Systems: The Challenge of Systems Engineering in the Information Age. CRC Press. C@ESE (Complex and enterprise Systems Engineering series). 2011. 256 p.
27. *Taticch P.* Business Performance Measurement and Management: New Contexts, Themes and Challenges // Springer Science & Business Media. 2010.
28. *Coelli T.J., Prasada Rao D.S., O'Donnell C.J., Battese G.E.* An Introduction to Efficiency and Productivity Analysis // Springer. 2005. 357 p.
29. *Wymore A.W.* Model-Based Systems Engineering // CRC Press. Boca Raton. FL. USA. 1993. 710 p.
30. *Буравлев А.И., Гладышевский В.Л.* Оптимальное распределение ресурсов в задачах программно-целевого планирования развития вооружения и военной техники // Вооружение и экономика. М. 2014. №2 (27) С. 21–35.
31. ГОСТ 31278-2004. Сотрудничество государств-участников Содружества Независимых Государств военно-экономическое. Термины и определения // М. «Стандартинформ». 2006.
32. *Olivier J., Balestrini-Robinson S.* Capability-Based System-of-Systems Approach in Support of Complex Naval Ship Design // 5th International Conference on Complex System Design & Management (CSD&M 2014). Paris, France: Center of Excellence on Systems Architecture, Management, Economy and Strategy (CESAMES). 2014. pp. 59–70.
33. JCIDS Manual. Manual for the operation of the joint capabilities integration and development system // US Department of Defense. Washington. DC. 2012.
34. Joint test and evaluation methodology (JTEM) program manager's handbook for testing in a joint environment. Office of the secretary of defense // Wash. DC. USA. 2009.
35. *Elm J.P., Goldenson D.R., Emam K.E., Donatelli N., Neisa A.* A Survey of Systems Engineering Effectiveness - Initial Results (with detailed survey response data) // Pittsburgh. PA: Software Engineering Institute, Carnegie Mellon University. 2008. 288 p.
36. National Defense Industrial Association. Systems Engineering Division Practical Software and Systems Measurement Working Group Report. System Development Performance Measurement // NDIA. PSM. Washington, USA. 2011. 36 p.
37. *Roedler G.J., Schimmoller R., Rhodes D., Jones C. (Eds).* Systems engineering leading indicators guide. INCOSE Technical Product Number: INCOSE-TP-2005-001-03. Version 2.0 // Massachusetts Institute of Technology. INCOSE and PSM. 2010. 146 p.
38. MIL-STD-499B (draft), military standard: system engineering management // USA department of Defense. 1993. 70 p.

39. Operation of the Joint Capabilities Integration and Development System // Chairman of the Joint Chiefs of Staff (CJCS). CJCS Manual 3170.01C Washington. DC. 2007.
40. *Kuklys W.* Amartya Sen's capability approach. Theoretical insights and empirical applications // Berlin New York: Springer.2005. 117 p.
41. *Farrell M.J.* The Measurement of Productive Efficiency // Journal of the Royal Statistical Society. Series A (General). Wiley. 1957. vol. 120. no. 3. pp. 253–290.
42. *Fried H.O., Lovell C.A.K., Schmidt S.S. (Eds.)* The measurement of productive efficiency. Techniques and Applications // Oxford university press. 1993.
43. *Кривоножко В.Е.* Неформальное описание технологии АСФ // «Банковские технологии». 2001. №5. С. 19–28.
44. Эффективность технических систем / Под ред. В.Ф.Уткина, Ю.В. Крючкова // Надежность и эффективность в технике. Справочник в 10-ти томах / Под ред. акад. Авдеевского В.С.и др. М. Машиностроение. 1988. Том 3. 328 с.
45. ГСИ. Шкалы измерений. Основные положения. Группа Т80. Термины и определения. МИ 2365-96 // М. ГП ВНИИФТРИ. 1996. 14 с.
46. *Abdel-Maksoud A., Abdel-Kader M.* Non-Financial Performance Measures: a Cross-Countries Comparison // Non-Financial Performance Measurement and Management Practices in Manufacturing Firms: A Comparative International Analysis. Elsevier, Oxford. pp. 191–228.
47. *Aslaksen E.W.* Designing Complex Systems. Foundations of design in the functional domain // CRC Press. Complex and enterprise Systems Engineering series. Auerbach Publications. Boca Raton. FL. 2008. 176 p.
48. *Neely A.D., Gregory M.J., Platts, K.W.* Performance measurement system design: a literature review and research agenda // International Journal of Operations & Production Management. 1995. vol. 15. no. 4. pp. 80–116.
49. *Färe R., Grosskopf S.* New Directions: Efficiency and Productivity (Studies in Productivity and Efficiency) // Kluwer Academic Publishers. London. 2005. 174 p.
50. *Cokins G.* Performance Management: Myth or Reality? // Performance Management: Integrating Strategy Execution, Methodologies, Risk, and Analytics. Wiley. 2009. 274 p.
51. *Cokins G.* Why is Modeling Foundational to Performance Management? // Dashboard inside newsletter. 2009.
52. Глоссарий терминов и определений ИТИЛ // Crown Copyright. 2011. 167 p.
53. СОВИТ 5. Бизнес-модель по руководству и управлению ИТ на предприятии // ISACA. IL. 2012. 95 с.
54. ГОСТ 27000-2012. Информационная технология. Методы и средства обеспечения безопасности. Системы менеджмента информационной безопасности. Обзор и терминология // М. Стандартиформ. 2014. 17 с.
55. *Mandl U., Dierx A., Ilzkovitz F.* The effectiveness and efficiency of public spending // European Economy economic papers. EU economic and financial affairs. 2008. vol. 301.

References

1. Morozov L.M., Petuhov G.B., Sidorov V.N. *Metodologicheskie osnovy teorii jeffektivnosti. Uchebnoe posobie* [Methodological foundations of effectiveness theory. Tutorial]. L., 1979. 174 p. (In Russ.).
 2. Petuhov G.B., Yakunin V.I. *Metodologicheskie osnovy vneshnego proektirovaniya celenapravlennyh processov i celeustremlyennyh sistem* [Methodological foundations of purposeful processes and purpose-oriented systems external design]. M. 2006. 504 p. (In Russ.).
 3. Geyda A.S., Lysenko I.V. [Operational properties of systems and their functioning indicators appraisal]. *Trudy SPIIRAN – SPIIRAS Proceedings*. 2013. vol. 25 pp. 317–337. (In Russ.).
- 240 SPIIRAS Proceedings. 2015. Issue 4(41). ISSN 2078-9181 (print), ISSN 2078-9599 (online)
www.proceedings.spiiras.nw.ru

4. Franceschini F., Galetto M., Maisano D. Management by Measurement: Designing Key Indicators and Performance Measurement Systems. Springer, 2007. 242 p.
5. Drucker P.F. The Effective Executive: The Definitive Guide to Getting the Right Things Done. HarperCollins Publishers. 2006. 202 p.
6. GOST R 27.002-2009. [Reliability in technics. Concepts and definitions.]. M.: Gosstandart Rossii. 2009. (In Russ.).
7. Krivonozhko V.E., Safin M.M., Utkin O.B., Lyuchev A.V. [EffiVision Software for analysis of complex systems activity]. *Informacionnye tehnologii i vychislitel'nye sistemy – Information technologies and computational systems*. 2005. vol. 3. pp. 85–95. (In Russ.).
8. Gontareva I.V., Nizhegorodtzev R.M. *Sistemnaja jeffektivnost' predpriyatija: sushhnost', faktory, struktura* [Systemic business effectiveness: essence, factors, structure]. M.: VSEI. 2012. 152 p. (In Russ.).
9. Razymovsky V.A. [Investment projects efficiency analysis in interactive mode]. *Vooruzhenie. Politiika. Konversija. – Armaments. Policy. Conversion*. M. 2003. vol. 4. pp.17–25. (In Russ.).
10. Reznikov B.A. *Sistemnyj analiz i metody sistemotekhniki. Chast' 1. Metodologija sistem-nyh issledovanij. Modelirovanie slozhnyh sistem* [System analysis and methods of System Engineering. Part 1. Methodology of system research. Complex systems modeling]. M. 1990. 645 p. (In Russ.).
11. Lysenko I.V. *Analiz i sintez slozhnyh tehnikeskikh sistem. Chast' 1. Analiz i sintez sistem obespechenija gotovnosti raket-nositelej i kosmicheskikh apparatov k zapusku (osnovy teorii)* [Analysis and Synthesis of complex technical systems. Part 1. Analysis and Synthesis of rocket launchers and spacecraft's readiness systems to the launch. (Fundamentals of the Theory)]. M. 1995. 365 p. (In Russ.).
12. Aslaksen E.W. *The System Concept and Its Application to Engineering*. Springer. 2013. 266 p
13. Geyda A.S., Ismailova Z.F., Klitnuy I.V., Lysenko I.V. [Operational and exchange properties of systems research problems.] *Trudy SPIIRAN – SPIIRAS Proceedings*. 2014. vol. 35. pp. 136–160. (In Russ.).
14. Geyda A.S., Lysenko I.V. [Research problems of socio-economical systems capabilities]. *Trudy SPIIRAN – SPIIRAS Proceedings*. vol. 10. 2009. pp. 63–84. (In Russ.).
15. Geyda A.S., Lysenko I.V. *Avtomatizacija reshenija zadach issledovanija potentsiala sistem i jeffektivnosti ih funkcionirovanija* [Automation of systems capabilities investigation and systems functioning effectiveness investigation problems solving]. *Trudy SPIIRAN – SPIIRAS Proceedings*. 2012. vol. 22. pp. 260–281. (In Russ.).
16. Kant I. *Kritika chistogo razuma* [Critique of the pure reason]. M. 1994. 591 p. (In Russ.).
17. *Systems engineering handbook. A “what to” guide for all SE practitioners*. Technical Report INCOSE-TP-2003-016-02. Version 2a. International Council Systems Engineering. 2004.
18. Downey A.B. *Think Complexity. Complexity Science and Computational Modeling*. O'Reilly Media. 2012.
19. Hybertson D.W. *Model-oriented systems engineering science: a unifying framework for traditional and complex systems*. Auerbach. 2009. 379 p.
20. Sudit E.F. *Effectiveness, Quality and Efficiency: A Management Oriented Approach*. Springer. 1996. 136 p.
21. *Guide to the System Engineering Body of Knowledge. SEBoK v. 1.3.1. INCOSE*. 2014.
22. Kossiakoff A., Sweet W., Seymour S., Biemer S. *Systems Engineering Principles and Practice*. Second Edition. John Wiley & Sons, Inc. 2011. 560 p.

23. Schlenker L., Matcham A. The effective organization. The Nuts and Bolts of Business Value. John Wiley & Sons. 2005. 202 p.
24. Simpson J.J., Dagli C., Miller A. Development and Application of Abstract Relation Types for Use in Systems and System-of-Systems Design and Evaluation. Proceedings of Seventeenth Annual International Symposium of INCOSE. Systems Engineering: Key to Intelligent Enterprises. San Diego, California. 2007.
25. Simpson J.J., Simpson M.J. Formal, theoretical aspects of systems engineering. Systems Engineering. 2010. vol. 13. Issue 2. pp. 204–207.
26. Stevens R. Engineering Mega-Systems: The Challenge of Systems Engineering in the Information Age. CRC Press. C@ESE (Complex and enterprise Systems Engineering series). 2011. 256 p.
27. Taticch P. Business Performance Measurement and Management: New Contexts, Themes and Challenges. Springer Science & Business Media. 2010.
28. Coelli T.J., Prasada Rao D.S., O'Donnell C.J., Battese G.E. An Introduction to Efficiency and Productivity Analysis. Springer. 2005. 357 p.
29. Wymore A.W. Model-Based Systems Engineering. CRC Press. 1993. 710 p.
30. Buravlev A.I., Gladyshevsky V.L. [Optimal resource allocation in the problems of program goal oriented planning of weapons and military equipment]. *Vooruzhenie i jekonomika – Weapons and Economy*. M. 2014. vol. 2(27). pp. 21-35. (In Russ.).
31. GOST 31278-2004. [Military and economical interstate cooperation of the community of independent states. Terms and definitions]. M.: StandartInform. 2006. (In Russ.).
32. Olivier J., Balestrini-Robinson S. Capability-Based System-of-Systems Approach in Support of Complex Naval Ship Design. 5th International Conference on Complex System Design & Management (CSD&M 2014). Paris, France: Center of Excellence on Systems Architecture, Management, Economy and Strategy (CESAMES). 2014. pp. 59–70.
33. JCIDS Manual. Manual for the operation of the joint capabilities integration and development system. US Department of Defense. Washington. DC. 2012.
34. Joint test and evaluation methodology (JTEM) program manager's handbook for testing in a joint environment. Office of the secretary of defense. Wash. DC. USA. 2009.
35. Elm J.P., Goldenson D.R., Emam K.E., Donatelli N., Neisa A. A Survey of Systems Engineering Effectiveness - Initial Results (with detailed survey response data). Pittsburgh. PA: Software Engineering Institute, Carnegie Mellon University. 2008. 288 p.
36. National Defense Industrial Association. Systems Engineering Division Practical Software and Systems Measurement Working Group Report. System Development Performance Measurement. NDIA. PSM. Washington, USA. 2011. 36 p.
37. Roedler G.J., Schimmoller R., Rhodes D., Jones C. (Eds). Systems engineering leading indicators guide. INCOSE Technical Product Number: INCOSE-TP-2005-001-03. Version 2.0. Massachusetts Institute of Technology. INCOSE and PSM. 2010. 146 p.
38. MIL-STD-499B (draft), military standard: system engineering management). USA department of Defense. 1993. 70 p.
39. Operation of the Joint Capabilities Integration and Development System. Chairman of the Joint Chiefs of Staff (CJCS). CJCS Manual 3170.01C Washington. DC. 2007.
40. Kuklys W. Amartya Sen's capability approach. Theoretical insights and empirical applications. Berlin New York: Springer.2005. 117 p.
41. Farrell M.J. The Measurement of Productive Efficiency. Journal of the Royal Statistical Society. Series A (General). Wiley. 1957. vol. 120. no. 3. pp. 253–290.
42. Fried H.O., Lovell C.A.K., Schmidt S.S. (Eds.) The measurement of productive efficiency. Techniques and Applications. Oxford university press. 1993.
43. Krivonozhko V.E. [Informal description of DEA technology]. *Bankovskie tehnologii – Banking technologies*. 2001. vol. 5. 19–28. (In Russ.).

44. *Jeftektivnost' tehničeskikh sistem. Pod red. V.F.Utkina, Ju.V. Krjučkova. Nadežhnost' i jeftektivnost' v tehnike. Spravočnik v 10-ti tomah. Pod red. akad. Avduevskogo V.S.i dr.* [Safety and Effectiveness in technics. Edited by V.F.Utkin, Ju.V. Krjučkov. Technical systems effectiveness. Reference encyclopedia in 10 vol. Edited by acad. Avduevskij V.S. et. al]. M. 1988. vol. 3. 328 p.
45. GOST. [GSI. Measurements Scales. Main definitions. MI 2365-96]. M. VNIIFTRI. 1996. 14 p. (In Russ.).
46. Abdel-Maksoud A. Abdel-Kader M. Non-Financial Performance Measures: a Cross-Countries Comparison. Non-Financial Performance Measurement and Management Practices in Manufacturing Firms: A Comparative International Analysis. Elsevier, Oxford. pp. 191–228.
47. Aslaksen E.W. Designing Complex Systems. Foundations of design in the functional domain. CRC Press. Complex and enterprise Systems Engineering series. Auerbach Publications. Boca Raton. FL. 2008. 176 p.
48. Neely A.D., Gregory M.J., Platts K.W. Performance measurement system design: a literature review and research agenda. International Journal of Operations & Production Management. 1995. vol. 15. no. 4. pp. 80–116.
49. Färe R., Grosskopf S. New Directions: Efficiency and Productivity (Studies in Productivity and Efficiency). Kluwer Academic Publishers. London. 2005. 174 p.
50. Cokins G. Performance Management: Myth or Reality? Performance Management: Integrating Strategy Execution, Methodologies, Risk, and Analytics. Wiley. 2009. 274 p.
51. Cokins G. Why is Modeling Foundational to Performance Management? Dashboard inside newsletter. 2009.
52. *Glossarij terminov i opredelenij ITIL* [Glossary of the ITIL concepts and definitions]. Crown Copyright. 2011. 167 p. (In Russ.).
53. *COBIT 5. Biznes-model' po rukovodstvu i upravleniju IT na predpriyatii* [COBIT 5. Business-Model for management and control of enterprise IT]. ISACA. IL. 2012. 95 p. (In Russ.).
54. GOST 27000-2012. [Information technology. Security techniques. Information security management systems. Overview and vocabulary.] M. StandartInform. 2014. 17 p. (In Russ.).
55. Mandl U., Dierx A., Ilzkovitz F. The effectiveness and efficiency of public spending. European Economy economic papers. EU economic and financial affairs. 2008. vol. 301.

Гейда Александр Сергеевич — к-т техн. наук, доцент, старший научный сотрудник лаборатории информационно-аналитических технологий в экономике, Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук (СПИИРАН). Область научных интересов: анализ и синтез организационно-технических, социально-экономических систем, оценивание эффективности их функционирования, потенциала организационно-технических и социально-экономических систем в условиях риска.. Число научных публикаций — 121. geida@ias.spb.su; Россия, 199178, г. Санкт-Петербург, 14 линия, 39; р.т.: +7812 3283257.

Geida Alexander Sergeevich — Ph.D., assistant professor, senior researcher, Laboratory for Information-Analytic Technologies for Economics, Institution of the Russian Academy of Sciences St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of RAS (SPIIRAS). Research interests: analysis and synthesis of techno-organizational, socio-economical systems, their functioning efficiency estimation, estimation of techno-organizational, socio-economical systems capabilities under risk conditions. The number of publications — 121. geida@ias.spb.su; 39, 14-th Line V.O., St. Petersburg, 199178, Russia; office phone: +7812 3283257.

Исмаилова Зульфия Флюровна — преподаватель, ФГБОУ ВПО «ОмГУ им. Ф.М. Достоевского». Область научных интересов: автоматизированное моделирование в задачах анализа и синтеза сложных систем, теория графов, алгоритмы на графах. Число научных публикаций — 11. ismaizul@inbox.ru; проспект Мира, д. 55-А, г. Омск, 644077; р.т.: +7(3812)46-66.

Ismailova Zulpia Flurovna — assistant professor, Omsk F. M. Dostoevsky State University. Research interests: automated modeling for solving complex systems analysis and design problems, graph theory, algorithms on graphs. The number of publications — 11. ismaizul@inbox.ru; prospect Mira, 55-A, Omsk, 644077, Russian federation; office phone: +7(3812)46-66.

Клитный Игорь Владимирович — научный сотрудник, главное управление глубоководных исследований МО РФ. Область научных интересов: моделирование сложных организационно-технических систем, исследование совершенства функционирования предприятий ОПК, исследование конкурентоспособности продукции военного назначения. Число научных публикаций — 7. kligor2015@inbox.ru; 14-я линия В.О., д. 39, г. Санкт-Петербург, 199178; р.т.: +7(812)328-3257, Факс: +7(812)328-4450.

Klitnyu Igor Vladimirovich — researcher, Main headquarter of deep-water researches ministry of defense of Russian Federation. Research interests: modeling of complex organizational and technical systems, research of military industrial complex enterprises improvement, competitiveness of military products research. The number of publications — 7. kligor2015@inbox.ru; 39, 14-th Line V.O., St. Petersburg, 199178, Russia; office phone: +7(812)328-3257, Fax: +7(812)328-4450.

Лысенко Игорь Васильевич — д-р техн. наук, профессор, заведующий лабораторией информационно-аналитических технологий в экономике, Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН (СПИИРАН). Область научных интересов: моделирование, информационно-аналитические технологии, экономический анализ функционирования организационно-технических систем, программно-целевое планирование и управление, разработка теории нечетких чисел и функций с приложениями. Число научных публикаций — 243. ilys@iias.spb.su; 14-я линия В.О., д. 39, г. Санкт-Петербург, 199178; р.т.: +7(812)328-3257, Факс: +7(812)328-4450.

Lysenko Igor Vasilievich — Ph.D., Dr. Sci., professor, head of laboratory for information-analytic technologies for economics, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of RAS (SPIIRAS). Research interests: modeling, information-analytic technologies, economic analysis of techno-organizational systems functioning, fuzzy numbers theory and applications. The number of publications — 243. ilys@iias.spb.su; 39, 14-th Line V.O., St. Petersburg, 199178, Russia; office phone: +7(812)328-3257, Fax: +7(812)328-4450.

РЕФЕРАТ

Гейда А.С., Исмаилова З.Ф., Клитный И.В., Лысенко И.В. **Отношения эффективности функционирования, потенциала систем и смежных операционных свойств.**

В статье рассмотрены особенности использования операционных свойств систем и их функционирования при исследованиях в разных областях науки. Описаны общие черты, особенности, перспективы исследования различных видов операционных свойств в теории эффективности целенаправленных процессов, теории потенциала систем, при решении задач системной инженерии, задач военной науки, в эконометрике.

Предложен общий подход к исследованию операционных свойств на основе прогнозирования соответствия характеристик эффектов характеристикам целей в разных условиях. Использование общего подхода на основе строящихся математических моделей проиллюстрировано на примере оценивания свойств потенциала системы и эффективности функционирования системы.

Показано, что использование предложенных общих подходов исследования операционных свойств на основе прогнозирования соответствия характеристик эффектов характеристикам целей в разных условиях, с использованием прогнозных математических моделей, должно позволить решать значительный спектр имеющихся и новых задач в разных областях.

Предложена шкала отношений порядка операционных свойств, позволяющая определить отношения между различными операционными свойствами на основе определения того, насколько полно передаются при исследовании этих свойств соответствия характеристик эффектов и целей функционирования. Сделан вывод о том, что комплексное исследование операционных свойств следует осуществлять так, чтобы исследовалась система соответствий характеристик результатов функционирования системы характеристикам целей и при этом, и функционирование, и цели рассматривались, как система.

SUMMARY

Geida A.S., Ismailova Z.F., Klitnuy I.V., Lysenko I.V. **Relations of Effectiveness of System Functioning, System Potential and Adjacent Operational Properties.**

The article considers features of the use of operational properties of systems and their functioning when conducting research in different areas of science. The general features, distinctions and prospects of using different types of operational properties in the theory of targeted processes efficiency, theories of system capability, as well as for solving problems of systems engineering, problems of military science and tasks of econometrics are also described. General approach for operational properties usage is offered. It is based on forecasting if characteristics of effects comply with characteristics of requirements under different conditions. The use of the general approach based on mathematical models under construction is illustrated by the example of the estimation of the properties of system capability and system functioning efficiency.

Offered general approaches of operational properties usage based on forecasting compliance between characteristics of effects and characteristics of requirements under different conditions, using mathematical models and information technologies, seem promising for solving a considerable range of current and new problems in different areas. A ratio scale of the order of operational properties is suggested allowing one to determine the relations between various operational properties. It reflects the level of compliance between characteristics of effects and purposes of functioning. It was concluded that research of operational properties should be carried out to investigate the system of compliance between the characteristics of the results of functioning of system and characteristics of requirements. At the same time, functioning and requirements should be considered as a system.

РУКОВОДСТВО ДЛЯ АВТОРОВ



Взаимодействие автора с редакцией осуществляется через личный кабинет на сайте журнала «Труды СПИИРАН» <http://www.proceedings.spiiras.nw.ru>. При регистрации авторам рекомендуется заполнить все предложенные поля данных, так как это значительно ускорит процесс оформления метаданных к новым статьям.

Подготовка статьи ведется с помощью текстовых редакторов MS Word 2007 и выше. При подаче материала в редакцию сначала отправляется только статья в формате *.docx. Для обеспечения требований слепого рецензирования при представлении статьи в журнал авторам необходимо удалить персональные данные, содержащиеся в тексте файла и его свойствах.

Объем основного текста – от 5 до 20 страниц включительно. Формат страницы документа – А5 (148 мм ширина, 210 мм высота); ориентация – портретная; все поля – 20 мм. Верхний и нижний колонтитулы страницы – пустые. Основной шрифт документа – Times New Roman, основной кегль (размер) шрифта – 10 pt. Переносы разрешены. Абзацный отступ устанавливается размером в 10 мм. Межстрочный интервал – одинарный. Номера страниц не проставляются.

Не допускается использования цветных шрифтов, цветовых выделений и цветных рисунков. Статьи должны быть полностью готовы к черно-белой печати.

Основная часть текста статьи разбивается на разделы, среди которых являются обязательными: введение, хотя бы один «содержательный» раздел и заключение. Допускается также мотивированное содержанием и структурой материала выделение подразделов.

В основную часть допускается помещать рисунки, таблицы, листинги и формулы. Правила их оформления подробно рассмотрены на нашем сайте в разделе «Руководство для авторов».

