

СОДЕРЖАНИЕ

Поздравляем Вадима Анатольевича Шахнова с 80-летием..... 5

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ ПРОБЛЕМ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА

Иванов А. И., Кубасов И. А.

СИЛЬНЫЙ ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ: ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА НЕЙРОСЕТЕВЫХ РЕШЕНИЙ С ПЕРЕХОДОМ К ОБРАБОТКЕ ВХОДНЫХ ДАННЫХ БОЛЬШОГО ОБЪЕМА..... 9

Острейковский В. А., Лысенкова С. А., Недорезов В. Г., Юрков Н. К.

КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ ОБОСНОВАНИЯ ПРИМЕНЕНИЯ ОПЕРАТОРОВ ЭВОЛЮЦИИ МИКРОСКОПИЧЕСКОЙ ЭНТРОПИИ, ПРЕОБРАЗОВАНИЯ И ВНУТРЕННЕГО ВРЕМЕНИ В ТЕОРИИ ДОЛГОВЕЧНОСТИ СТРУКТУРНО И ФУНКЦИОНАЛЬНО СЛОЖНЫХ СИСТЕМ..... 17

Никулин В. А., Лоскутов А. И., Клыков В. А., Ряхова Е. А., Столяров А. В.

МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ БЕСПИЛОТНОГО АВИАЦИОННОГО КОМПЛЕКСА С ЦЕЛЬЮ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ТЕХНИЧЕСКОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ..... 31

ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

Клячкин В. Н., Карпунина И. Н.

СТАТИСТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ СТАБИЛЬНОСТИ ВИБРАЦИЙ ГИДРОАГРЕГАТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА ГЛАВНЫХ КОМПОНЕНТ 41

Иванов А. И., Кубасов И. А., Самокутнев А. М.

ТЕСТИРОВАНИЕ БОЛЬШИХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ НА МАЛЫХ ВЫБОРКАХ 49

Новоселов А. С., Москалев С. А., Папко А. А., Поспелов А. В., Недопекин Н. В., Лузгина О. Н.

К ПРОБЛЕМЕ ВЫБОРА МЕТОДА ОЦЕНКИ ДРЕЙФОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОЛНОВЫХ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ ГИРОСКОПОВ ГЕ 006 НА ОСНОВЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ПОДТВЕРЖДЕНИЯ 57

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ

Маклашов В. А., Мирзоев Р. М.

АЛГОРИТМ ВЫЧИСЛЕНИЯ ПЕЛЕНГА НА ИСТОЧНИК РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ 66

Михеев М. Ю., Прокофьев О. В., Семочкина И. Ю.

ДРЕВОВИДНЫЕ КАРТЫ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ПОДДЕРЖКИ РЕШЕНИЙ 76

Мельничук А. И., Горячев Н. В., Юрков Н. К.

К ПРОБЛЕМЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ АНТЕННЫ ВИВАЛЬДИ ДЛЯ ИЗЛУЧЕНИЯ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИМПУЛЬСА 87

Фролов С. И., Данилова Е. А., Таньков Г. В., Кочегаров И. И., Григорьев А. В. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РЕЗОНАНСНЫХ ЧАСТОТ ТОНКОСТЕННЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ БОРТОВЫХ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ	102
Васильева С. В., Коновалова О. В., Панкин А. М., Тутнов И. А., Соболев А. В., Царев В. С. УПРАВЛЕНИЕ РИСКАМИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ЯДЕРНЫХ ОБЪЕКТОВ ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА НА ОСНОВЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ДИАГНОСТИКИ ИХ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ.....	114
Ширинкина Е. В. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПЛАТФОРМЫ БИЗНЕС-ОБУЧЕНИЯ: АНАЛИТИКА ЛУЧШИХ ПРАКТИК.....	123

БЕЗОПАСНОСТЬ В ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ

Маслобоев А. В., Цыгичко В. Н. МЕТОД ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ МНОГОУРОВНЕВЫХ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ СИСТЕМ ОБЕСПЕЧЕНИЯ РЕГИОНАЛЬНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ	129
Самаров В. В. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СИСТЕМЫ АУДИТА ОПЕРАЦИОННЫХ СИСТЕМ СЕМЕЙСТВА LINUX ПРИ ПРОВЕДЕНИИ СЕРТИФИКАЦИОННЫХ ИСПЫТАНИЙ ПРОГРАММНЫХ ИЗДЕЛИЙ.....	144

CONTENT

FUNDAMENTALS OF RELIABILITY AND QUALITY ISSUES

Ivanov A.I., Kubasov I.A.

STRONG ARTIFICIAL INTELLIGENCE: IMPROVING THE QUALITY OF NEURAL NETWORK SOLUTIONS WITH THE TRANSITION TO PROCESSING INPUT DATA OF A LARGE VOLUME.....9

Ostreykovskiy V.A., Lysenkova S.A., Nedorezov V.G., Yurkov N.K.

CONCEPTUAL FOUNDATIONS FOR THE JUSTIFICATION OF THE USE OF MICROSCOPIC ENTROPY EVOLUTION OPERATORS, TRANSFORMATIONS AND INTERNAL TIME IN THE THEORY OF DURABILITY STRUCTURALLY AND FUNCTIONALLY COMPLEX SYSTEMS.....17

Nikulin V.A., Loskutov A.I., Klykov V.A., Ryakhova E.A., Stolyarov A.V.

METHODOLOGY OF CONSTRUCTING A MATHEMATICAL MODEL OF THE OPERATION PROCESS OF AN UNMANNED AVIATION COMPLEX TO SOLVE THE PROBLEM OF TECHNICAL DIAGNOSIS.....31

**DIAGNOSTIC METHODS FOR ENSURING RELIABILITY
AND THE QUALITY OF COMPLEX SYSTEMS**

Klyachkin V.N., Karpunina I.N.

STATISTICAL CONTROL OF HYDRO-UNIT VIBRATIONS STABILITY USING THE PRINCIPAL COMPONENTS METHOD41

Ivanov A.I., Kubasov I.A., Samokutyaev A.M.

TESTING LARGE NEURAL NETWORKS ON SMALL SAMPLES49

Novoselov A. S., Moskalev S. A., Papko A. A., Pospelov A. V., Nedopekin N. V., Luzgina O. N.

ON THE PROBLEM OF CHOOSING A METHOD FOR ESTIMATING THE DRIFT CHARACTERISTICS OF WAVE SOLID-STATE GYROSCOPES GE 006 BASED ON EXPERIMENTAL CONFIRMATION57

**TECHNOLOGICAL BASIS FOR IMPROVING
RELIABILITY AND PRODUCT QUALITY**

Maklashov V.A., Mirzoev R.M.

ALGORITHM FOR CALCULATING DIRECTIONS TO A RADIO SOURCE.....66

Mikheev M.Yu., Prokofev O.V., Semochkina I.Yu.

TREEMAPS TO IMPROVE QUALITY OF SUPPORT OF DECISIONS76

Mel'nichuk A.I., Goryachev N.V., Yurkov N.K.

ON THE PROBLEM OF COMPUTER-AIDED DESIGN OF THE VIVALDI ANTENNA FOR THE EMISSION OF AN ULTRA-WIDEBAND ELECTROMAGNETIC PULSE87

Frolov S.I., Danilova E.A., Tan'kov G.V., Kochegarov I.I., Grigor'ev A.V.
DEVELOPMENT OF A METHOD FOR DETERMINING THE RESONANT FREQUENCIES
OF THIN-WALLED CYLINDRICAL STRUCTURES ON-BOARD ELECTRONIC EQUIPMENT 102

Vasil'eva S.V., Konovalova O.V., Pankin A.M., Tutnov I.A., Sobolev A.V., Tsarev V.S.
RISK MANAGEMENT OF NUCLEAR POWER FACILITIES IN THE FUEL AND ENERGY
COMPLEX BASED ON MEASUREMENT DIAGNOSTICS THEIR TECHNICAL CONDITION..... 114

Shirinkina E.V.
TECHNOLOGY PLATFORMS FOR BUSINESS TRAINING: BEST PRACTICE ANALYTICS..... 123

SAFETY IN EMERGENCY SITUATIONS

Masloboev A.V., Tsygichko V.N.
A METHOD FOR EFFICIENCY ASSESSMENT OF MULTI-LEVEL DISTRIBUTED SYSTEM
FOR REGIONAL SECURITY SUPPORT 129

Samarov V. V.
USE OF THE LINUX OPERATING SYSTEM AUDIT SYSTEM
WHEN CONDUCTING CERTIFICATION TESTS OF SOFTWARE PRODUCTS 144

ПОЗДРАВЛЯЕМ ВАДИМА АНАТОЛЬЕВИЧА ШАХНОВА С 80-ЛЕТИЕМ

Вадим Анатольевич Шахнов родился 29 января 1941 г. в Москве. Началась война, мама Вадима Анатольевича оставляет учебу, и они переезжают к ее сестре в г. Фрунзе (Киргизская ССР). Здесь Вадим Анатольевич пошел в школу, отлично учился. После окончания второго класса семья переезжает в г. Кушку (Туркменская ССР), где они прожили семь лет. В школе были прекрасные учителя математики и физики, которые привили любовь к этим предметам. Десятый класс Вадим Анатольевич заканчивает в г. Мары (Туркменская ССР) с двумя четверками в аттестате: по литературе и химии.

Переехав в г. Фрунзе, Вадим Анатольевич работает фрезеровщиком на инструментальном заводе имени В. И. Ленина, много занимается на подготовительных курсах Фрунзенского политеха и в 1959 г., сдав экзамены на все пятерки, поступает во Фрунзенский политехнический институт. В вузовской учебе тогда было нововведение: учились вечером, а днем работали на производстве, осваивая будущие специальности [1].

В Политехе высшую математику преподавал педагог Д. Джунушев. Он преподносил сложный материал настолько просто и доходчиво, что почти все его студенты сдавали экзамены с первого захода. В Вадиме Анатольевиче он сразу отметил способность к математике, давал дополнительные задания и впоследствии привлекал к приему экзаменов у вечерников.

После успешного окончания второго курса и работы фрезеровщиком на заводе имени В. И. Ленина Вадим Анатольевич приезжает в Москву, подает документы в Физтех, МЭИ и МВТУ имени Н. Э. Баумана, и так складывается его дальнейшая судьба, что он становится студентом последнего. В 1961 г. он становится студентом кафедры «Вычислительные машины» (П6) МВТУ имени Н. Э. Баумана, руководимой профессором Б. В. Анисимовым [2].

Учеба в МВТУ в те времена была настоящей школой жизни. Лекции читали профессионалы своего дела, практики: профессор Н. Н. Малинин, доцент А. Я. Савельев, доцент В. Н. Голубкин, профессор Б. В. Анисимов, профессор А. Н. Малов и др. Все они проводили занятия с большим профессионализмом и внимательно относились к студентам. С большой теплотой вспоминал Вадим Анатольевич в дальнейшем заместителя декана, доцента Н. И. Фадеева, который в тяжелые годы помогал ему, устраивал на подработку на разные кафедры.

Во время учебы Вадим Анатольевич активно занимался спортом, участвовал в межинститутской спартакиаде по легкой атлетике, занимался альпинизмом (покорил пик Электра на Памире, 4050 м). Принимал участие в работе студенческого театра, даже участвовал в съемках фильма «Война и мир».

На последнем курсе, когда встал вопрос о преддипломной практике, заведующий кафедрой, профессор Б. В. Анисимов помог Вадиму Анатольевичу устроиться в Зеленоград к профессору Д. И. Юдицкому и профессору И. Я. Акушскому. Сразу окончившись в работу, Вадим Анатольевич принял участие в разработке основ архитектуры ЭВМ, работающих в остаточных классах. Практика оказалась крайне полезной: в июне 1966 г. Вадим Анатольевич первым в МВТУ представил на защиту дипломный проект, в ко-



тором подробно рассматривалась технология и применение микросхем типа «Тропа». Дипломный проект был защищен на отлично, и Вадим Анатольевич заканчивает МВТУ с красным дипломом.

В сентябре 1966 г., закончив МВТУ имени Н. Э. Баумана и получив диплом инженера по специальности «Математические и счетно-решающие приборы и устройства», В. А. Шахнов приступает к работе в Зеленоградском НПО «Научный центр», где начал заниматься исследованиями быстропротекающих процессов в тонких магнитных пленках и проблемами разработки быстродействующих запоминающих устройств ЭВМ.

В этом же году он поступил в заочную аспирантуру Московского института электронной техники (МИЭТ), обучение в которой завершил в 1970 г. защитой кандидатской диссертации под руководством замечательного ученого и педагога, доктора технических наук, профессора Л. Н. Преснухина. Начиная с этого времени Вадим Анатольевич работает по совместительству в МИЭТ, где преподает курс «Конструирование ЭВМ и систем».

С 1970 г. В. А. Шахнов участвует в разработках мини- и микроЭВМ, микропроцессоров и микропроцессорных средств вычислительной техники в Специализированном вычислительном центре (СВЦ), руководимом доктором технических наук, профессором Д. И. Юдицким. В это время в СВЦ была создана первая в стране мини-ЭВМ, были разработаны первые в мире 16-разрядные КМОП-микропроцессоры с оригинальной архитектурой и микроЭВМ на их основе. Итоги исследований этих лет нашли отражение в книге, подготовленной совместно с Л. Н. Преснухиным, «Конструирование ЭВМ и систем», которая на много лет стала настольной книгой инженеров-разработчиков вычислительных систем.

С 1976 г. В. А. Шахнов руководит работой отраслевого отдела микропроцессоров и микропроцессорных средств вычислительной техники Минэлектронпрома СССР, координируя работы всех предприятий отрасли в этом важнейшем направлении развития науки и техники. Основные направления научных исследований в то время были связаны с созданием и развитием функционально и технологически сложных больших интегральных схем и средств вычислительной техники на их основе, внедрением этих схем и средств в серийное производство. На основе анализа уровня развития отечественных предприятий были сформулированы комплексные межотраслевые программы создания и применения микропроцессоров и микроЭВМ. В их основу заложены системные принципы и экономические целесообразные подходы к созданию микропроцессоров и микроЭВМ нового поколения, что нашло отражение в первых отечественных монографиях, стандартах и учебных пособиях [3].

В 1983 г. Вадиму Анатольевичу Шахнову была присуждена премия Совета министров СССР в области науки и техники [4], в 1985 г. – Государственная премия СССР в области науки и техники за разработку и внедрение специальной техники на базе микропроцессоров [5].

С 1970 г. Вадим Анатольевич Шахнов занимался преподавательской деятельностью, работая по совместительству доцентом на кафедре «Электронно-вычислительные машины» Московского института электронной техники.

В 1989 г. за успешную работу по внедрению микропроцессоров в космическую аппаратуру Федерация космонавтики СССР наградила Вадима Анатольевича Шахнова медалью имени академика М. В. Келдыша.

В 1991 г. В. А. Шахнов был приглашен в МГТУ имени Н. Э. Баумана, где возглавил кафедру «Проектирование и технология производства электронной аппаратуры» (ИУ4) [6]. В этом же году он защитил докторскую диссертацию на тему «Системное конструирование ЭВМ на больших интегральных схемах».

В области создания новых видов электронной аппаратуры и методов их проектирования под руководством В. А. Шахнова разработана ресурсосберегающая методология проектирования несущих конструкций электронной аппаратуры, работающей в условиях квазистатического и динамического нагружения. На кафедре проведены исследования и разработка активных методов управления волновыми полями. Вадим Анатольевич всегда уделял огромное внимание подготовке молодых научных кадров, постановке научно-исследовательской работы по прорывным, новым направлениям науки и техники. В 1995 г. четверо молодых исследователей кафедры (В. А. Соловьев, П. В. Горюнов, А. И. Ельников, И. В. Кормушин) стали лауреатами Государственной премии РФ в области науки и техники для молодых ученых за разработку ресурсосберегающей методологии проектирования несущих конструкций электронной аппаратуры [7]. В 2000 г. за разработку теории и создание

экспериментальной установки активного противодействия акустическим шумам сотрудник кафедры А. И. Власов был удостоен звания лауреата Государственной премии РФ в области науки и техники для молодых ученых [8].

В 1996 г. Вадиму Анатольевичу за новаторскую деятельность в области образования и подготовки научных кадров Международным обществом инженерной педагогики присвоено почетное звание «Европейский инженер-педагог».

За вклад в развитие электронной техники в 1999 г. В. А. Шахнову был вручен Памятный знак «90 лет со дня рождения Александра Ивановича Шокина» Российским Агентством по системам управления.

Дальнейшее развитие исследований было сконцентрировано на создании новых видов высокоточной электромагнитной измерительной аппаратуры, за разработку которой В. А. Шахнову в 2001 г. присвоено звание Лауреата премии Правительства РФ в области науки и техники [9].

Общие принципы разработки конструкции и технологии производства современных видов электронной аппаратуры легли в основу изданного в 2002 г. и переизданного в 2005 г. базового учебника для вузов «Конструкторско-технологическое проектирование электронной аппаратуры». В 2009 г. В. А. Шахнов принял активное участие в создании научно-практического и методического инновационного комплекса персонифицированной профессиональной подготовки высококвалифицированных специалистов в области информационно-телекоммуникационных технологий для образовательных учреждений высшего профессионального образования, за разработку которого коллективу ученых МГТУ имени Н. Э. Баумана присуждена премия Правительства РФ в области образования 2009 г. [10].

Возглавляемая В. А. Шахновым научная школа «Конструкторско-технологическая информатика в радиоэлектронике» отмечена грантами Президента РФ в 2006, 2008, 2010, 2012 и 2014 гг.

В 2004 г. на кафедре организована первая в университете лаборатория по изучению нанотехнологий. Разработан учебно-методический комплекс подготовки специалистов «Библиотека Наноинженерии» в 17 томах. Вадим Анатольевич стоял у истоков издания периодического журнала «Наноинженерия», проведения ежегодной школы-семинара «Наноинженерия». В 2009 г. при кафедре создан Научно-образовательный центр «Нанотехнологические системы и наноэлектроника», результаты разработки которого в области МЭМС сенсоров нашли широкое применение в специальной и космической технике.

Полученные В. А. Шахновым и сотрудниками кафедры результаты исследований неоднократно докладывались на Российских и международных конференциях и симпозиумах. При непосредственном участии Вадима Анатольевича ежегодно, начиная с 2000 г., проводится международная молодежная научно-техническая конференция «Наукоемкие технологии и интеллектуальные системы».

На базе этих результатов под научным руководством В. А. Шахнова подготовлены и защищены 16 кандидатских и 2 докторских диссертации сотрудниками кафедры, докторантами и аспирантами. В. А. Шахнов является автором более 250 научных и учебно-методических работ (в том числе 16 учебников, учебных пособий и 7 монографий) и 12 изобретений.

Вадим Анатольевич Шахнов является членом редакционных коллегий шести научно-технических журналов и трех диссертационных советов.

Его заслуги были отмечены рядом государственных наград, в том числе и медалью ордена «За заслуги перед Отечеством» II степени (2005) [11] и медалями «Ветеран труда» (1987), «В память 800-летия Москвы» (1997). В 2001 г. ему было присвоено почетное звание «Заслуженный деятель науки Российской Федерации» [12]. 29 мая 2008 г. Вадим Анатольевич Шахнов был избран членом-корреспондентом РАН [13]. С 2010 г. он является ученым секретарем Российского фонда фундаментальных исследований [14].

В октябре 2012 г. награжден медалью ЮНЕСКО «За вклад в развитие нанонауки и нанотехнологий» [15]. Награждение происходило в торжественной, праздничной обстановке в штаб-квартире ЮНЕСКО в Париже. Медаль вручала генеральный директор ЮНЕСКО Ирина Бокова. На вручении присутствовали представители посольств России, Германии и США.

14 мая 2016 г. за заслуги в развитии науки, образования, подготовке квалифицированных специалистов и многолетнюю плодотворную работу Вадим Анатольевич награжден орденом Дружбы.

Коллектив редколлегий журнала поздравляет Вадима Анатольевича с юбилеем. Желает ему многих лет жизни и творческих успехов!

**Основные работы В. А. Шахнова в области
конструкторско-технологической информатики и наноинформатики**

1. Библиотека наноинженерии : учеб. пособие : в 17 кн. / под ред. В. А. Шахнова. М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2011.
2. Парфенов Е. М., Костиков В. Г., Шахнов В. А. Источники электропитания электронных средств: схемотехника и конструирование. М., 2009. 364 с.
3. Парфенов Е. М., Костиков В. Г., Шахнов В. А. Проектирование источников электропитания электронной аппаратуры. М., 2008. 284 с.
4. Билибин К. И., Власов А. И., Журавлева Л. В. [и др.]. Конструкторско-технологическое проектирование электронных средств / под общ. ред. В. А. Шахнова. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. 500 с.
5. Шахнов В. А., Власов А. И., Кузнецов А. С., Поляков Ю. А. Нейрокомпьютеры: архитектура и схемотехника. М. : Машиностроение, 2000. 64 с.
6. Березин О. К., Костиков В. Г., Шахнов В. А. Источники электропитания радиоэлектронной аппаратуры : справочник. М. : Радио и Связь, 2000. 264 с.
7. Микропроцессоры и микропроцессорные комплекты интегральных схем : справочник : в 2 т. / под ред. В. А. Шахнова. М. : Радио и связь, 1998.
8. Комплекты интегральных микросхем / под ред. В. А. Шахнова. М. : Радио и связь, 1987.
9. Преснухин А. Н., Шахнов В. А. Конструирование электронно-вычислительных машин и систем. М. : Высш. шк., 1986.
10. Шахнов В. А., Виноградов Б. Н. Отечественные микроЭВМ. М. : Машиностроение, 1983.

Список литературы

1. Наш отчий дом. М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2011. С. 278.
2. Медведь Н. Т. Бауманцы. М. : Рекламно-полиграфический центр, 1998. С. 76.
3. Наука и Образование : научно-техническое издание: 29 января 2016 год Шахнов В. А., член-корреспондент РАН, д.т.н., профессор МГТУ им. Н. Э. Баумана. URL: technomag.edu.ru (дата обращения: 06.03.2016).
4. Постановление Совета Министров СССР от 16 апреля 1983 г.
5. Постановление Центрального комитета КПСС и Совета Министров СССР от 2 ноября 1985 г. (уд. № 17734).
6. Указ Президента Российской Федерации от 20 июня 1995 г.
7. Указ Президента Российской Федерации № 1730 от 6 октября 2000 г.
8. Постановление Правительства Российской Федерации от 19 марта 2001 г.
9. Распоряжение Правительства России № 1246-р от 28 августа 2009 г.
10. О награждении государственными наградами Российской Федерации : указ Президента РФ № 894 от 19.07.2001.
11. Указ Президента Российской Федерации № 225 от 14.05.2016.
12. Научные школы Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. История развития / под ред. И. Б. Федорова, К. С. Колесникова. 2-е изд. доп. М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2005. 464 с.
13. Павлихин Г. П., Базанчук Г. А. Выдающиеся выпускники МГТУ им. Н. Э. Баумана. 1868–1930. М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2010. 445 с.
14. Основатели научных школ Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Краткие очерки / под ред. Е. Г. Юдина, К. Е. Демихова. М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2005. 632 с.

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ ПРОБЛЕМ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА

FUNDAMENTALS OF RELIABILITY AND QUALITY ISSUES

УДК 004.838.2

doi:10.21685/2307-4205-2021-1-1

СИЛЬНЫЙ ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ: ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА НЕЙРОСЕТЕВЫХ РЕШЕНИЙ С ПЕРЕХОДОМ К ОБРАБОТКЕ ВХОДНЫХ ДАННЫХ БОЛЬШОГО ОБЪЕМА

А. И. Иванов¹, И. А. Кубасов²

¹ Пензенский научно-исследовательский электротехнический институт, Пенза, Россия

² Академия управления МВД России, Москва, Россия

¹ ivan@pniei.penza.ru, ² igorak@list.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Исследованы пути решения актуальной задачи перевода приложений «слабого» искусственного интеллекта в приложения «сильного» искусственного интеллекта, применяемые в интересах повышения надежности и качества сложных технических систем. Обоснована возможность повышения качества нейросетевых решений с переходом к обработке входных данных большого объема. *Материалы и методы.* Выполнена оценка влияния количества входных и выходных размерностей искусственной нейросети на качество принимаемых решений. Предложено решение задачи нейросетевого анализа путем симметризации по коэффициентам корреляции входных данных. *Результаты.* При планировании сочетания применения естественного и искусственного интеллектов, позволяющих повысить надежность и качество сложных технических систем, предложена количественная оценка корреляционной связи категорий «большие данные» и «сильный» искусственный интеллект. Высказана простая гипотеза связывания этих двух значимых категорий. *Вывод.* Представлена оценка уровня вероятности ошибок, характерных для «сильного» эксперта-человека при его доступе к реальным данным ограниченной размерности n . Даны рекомендации по достижению желаемого уровня снижения вероятностей ошибок или заданию желаемого уровня увеличения объема принимаемых во внимание исходных данных. В итоге получен прогноз того, как связаны между собой эти два параметра, подлежащих регулированию (планированию).

Ключевые слова: искусственный интеллект, нейронные сети, качество нейросетевых решений, большие данные

Для цитирования: Иванов А. И., Кубасов И. А. Сильный искусственный интеллект: повышение качества нейросетевых решений с переходом к обработке входных данных большого объема // Надежность и качество сложных систем. 2021. № 1. С. 9–16. doi:10.21685/2307-4205-2021-1-1

STRONG ARTIFICIAL INTELLIGENCE: IMPROVING THE QUALITY OF NEURAL NETWORK SOLUTIONS WITH THE TRANSITION TO PROCESSING INPUT DATA OF A LARGE VOLUME

A.I. Ivanov¹, I.A. Kubasov²

¹ Penza Research Electrotechnical Institute, Penza, Russia

² Academy of Management of the Ministry of Internal Affairs of Russia, Moscow, Russia

¹ ivan@pniei.penza.ru, ² igorak@list.ru

Abstract. *Background.* The article examines the ways to solve the actual problem of translating applications of "weak" artificial intelligence into applications of "strong" artificial intelligence, used in the interests of improving the reliability and quality of complex technical systems. The possibility of improving the quality of neural network solutions with the transition to processing large-volume input data is justified. *Materials and methods.* The influence of the number of input and output dimensions of an artificial neural network on the quality of decisions made is estimated. The solution of the problem of neural network analysis by means of symmetrization by correlation coefficients of input data is proposed. *Results.* When planning a combination of the use of natural and artificial intelligence to improve the reliability and quality of complex technical systems, a quantitative assessment of the correlation between the categories of "big data" and "strong" artificial intelligence is proposed. The article presents a simple hypothesis of linking these two significant categories. *Conclusion.* An estimate of the probability level of errors characteristic of a "strong" human expert when accessing real data of bounded dimension n is presented. Recommendations are given for achieving the desired level of reducing the probability of errors or setting the desired level of increasing the volume of input data taken into account. As a result, a forecast of how these two parameters that are subject to regulation (planning) are related to each other is obtained.

Keywords: artificial intelligence, neural networks, quality of neural network solutions, big data

For citation: Ivanov A.I., Kubasov I.A. Strong artificial intelligence: improving the quality of neural network solutions with the transition to processing input data of a large volume. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2021;1:9–16. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2021-1-1

Введение

«Сильным» искусственным интеллектом предлагается признавать искусственный интеллект, качество решений которого сопоставимо или выше качества решений, принимаемых «сильным» специалистом. Очевидно, что «сильных» специалистов в любой области не так много. В этом контексте мобилизационный ресурс всегда ограничен. Замещение одного или нескольких «сильных» специалистов временно или постоянно приложениями «сильного» искусственного интеллекта рассматривается как желательная мера. Горячий резерв всегда выгоден, поэтому при планировании маневров применения естественного и искусственного интеллектов в каждом конкретном случае целесообразно уметь количественно определить связь категорий «большие данные» и «сильный» искусственный интеллект.

Входные и выходные размерности нейросетевых решающих правил

Нейронные сети (естественные и искусственные) отличаются от решающих правил линейной алгебры высокой входной размерностью. В головах людей есть естественные нейроны, имеющие до 10 000 входов [1]. Это означает, что обычный человек на уровне подсознания теоретически способен решать 10 000-мерные задачи довольно быстро (за 0,05 с). Это при том, что если записать некоторую функцию $F(x_1, x_2, \dots, x_{10\,000})$ с простым перечислением всех переменных (без многоточия), то потребуется примерно 10 страниц рукописного текста!

Чем выше входная размерность искусственной нейросети, тем искусственный интеллект «сильнее». «Слабый» искусственный интеллект имеет низкую входную размерность и принимает решения по качеству хуже решений «сильных» специалистов. Как пример, можно рассматривать графологический анализ рукописных текстов. Графологи анализируют данные, используя всего 16 параметров. Нейросетевые приложения искусственного интеллекта, обученные анализировать 16 классических графологических параметров, будут относиться к «слабому» искусственному ин-

теллекту, так как человек, имеющий значительный опыт графологической экспертизы, всегда будет «сильнее» малоразмерных приложений искусственного интеллекта. В условиях, когда человек и искусственный интеллект вынуждены анализировать одни и те же малоразмерные данные (поставлены в одинаковые условия), выигрывает всегда человек, т.е. он «сильнее».

Ситуация кардинально меняется, если искусственный интеллект поставлен в более выгодное положение, чем человек – эксперт. Эта ситуация отражена на рис. 1. Особенность ситуации состоит в том, что эксперты обучались анализировать «мертвые» рукописные надписи, когда-то и кем-то оставленные на бумаге. Фактически речь идет о решении задачи анализа статических данных (некоторой функции $f(x, y)$ – зафиксированной траектории движения пера на бумаге). Однако статическая картинка – это достаточно «бедный» источник информации о почерке человека.



Рис. 1. Малая и большая нейросети, анализирующие соответственно 16 и 416 входных биометрических параметров рукописного почерка

В настоящее время появилась возможность анализа динамики воспроизведения рукописных данных¹, например, вводимых с графического планшета или через чувствительный экран планшетного компьютера². Принципиальным отличием является то, что биометрических данных оказывается много (возникает эффект «больших данных»), вместо 16 классических графологических параметров «мертвой» статической надписи появляются 416 параметров динамики движения пера в двух координатах $x(t)$ и $y(t)$ как функций времени [2, 3].

Рассматриваемая ситуация интересна тем, что «сильные» графологи ошибаются намного чаще приложений искусственного интеллекта, анализирующего динамику рукописного почерка. Приложения искусственного интеллекта оказываются в более выгодных условиях в сравнении с людьми – графологами, обученными ранее распознавать и классифицировать только статические «мертвые» следы пера на бумаге. Скорее всего, если графологов поставить в равные условия с «сильным» искусственным интеллектом, то люди научатся учитывать новые аспекты динамики воспроизведения рукописных слов. Правда, в этом случае переучивать графологов на анализ динамики почерка нет смысла. Сегодня гораздо выгоднее снабдить экспертов-графологов новыми приложениями, преобразующими классическую статику «мертвой» подписи в дополнительную псевдинамику [4–6].

¹ ГОСТ Р ИСО/МЭК 19794-7 2006. Автоматическая идентификация. Идентификация биометрическая. Форматы обмена биометрическими данными. Часть 7. Данные динамики подписи. М., 2006.

² ГОСТ Р 52633.5-2011. Защита информации. Техника защиты информации. Автоматическое обучение нейросетевых преобразователей биометрия-код доступа. М., 2012.

Тогда «сильные» специалисты станут еще сильнее, вооружившись нейросетевым искусственным интеллектом анализа псевдинамики, извлеченной из статического скана «мертвой» подписи бумажного юридически значимого документа.

Также следует отметить, что на рис. 1 отображена характерная для сегодняшних технологий биометрического анализа ситуация, когда программные приложения могут отличаться входной и выходной размерностью. Различия по входной размерности приложений принципиально важны. При одинаковом качестве входных данных приложение искусственного интеллекта будет «более сильным», чем больше входная размерность.

Совершенно иная ситуация возникает при анализе выходной размерности приложений искусственного интеллекта. Количество классов, на которые нейросеть дробит пространство своих выходных кодовых состояний, не имеет значения. Это не более чем технологический момент стыковки теории с уже созданными приложениями защиты информации средствами нейросетевой биометрии [7]. Для того, чтобы огромное число классов (2^{256} классов) большой нейросети в нижней части рис. 1 сократить до малого числа классов малой нейросети в верхней части рисунка, достаточно написать некоторый цифровой логический автомат, объединяющий между собой близкие к друг другу классы. Это тривиальная задача.

Нейросетевой анализ по входным данным

При анализе биометрических данных рукописного почерка хорошо работает гипотеза нормального распределения случайных величин, как это показано на рис. 2 [8].

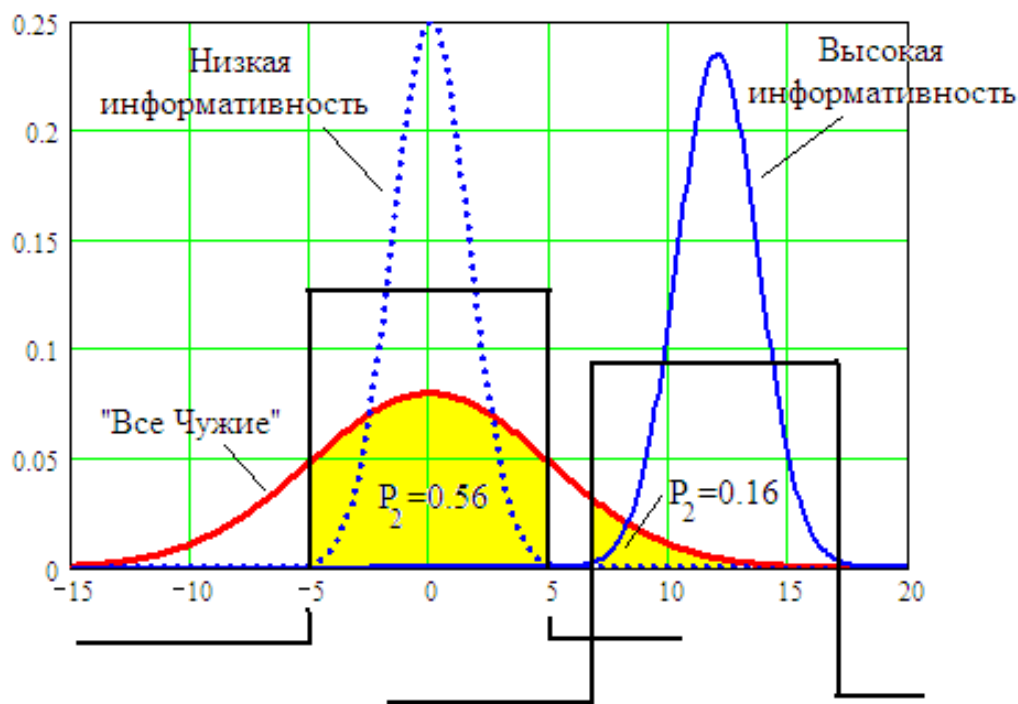


Рис. 2. Разный уровень информативности биометрических параметров

Для любого биометрического параметра с нормальным распределением можно воспользоваться инженерным правилом «трех сигм», т.е. случайные значения любого v_i биометрического параметра с доверительной вероятностью 0,997 будут попадать в определенный интервал:

$$\Delta \approx E(v_i) \pm 3\sigma(v_i), \quad (1)$$

где $E(v_i)$ – математическое ожидание v_i -го биометрического параметра; $\sigma(v_i)$ – стандартное отклонение v_i -го биометрического параметра.

Это означает, что вероятность ошибок первого рода (ложный отказ в распознавании параметра «Свой») составит $P_1 \approx 0,003$. При этом вероятности ошибок второго рода (ложное принятие

«Чужого» за «Своего») для разных биометрических параметров будут разными, как это показано на рис. 2.

Биометрический параметр следует считать более информативным, если он обеспечивает низкую вероятность ошибок второго рода. Чем больше вероятность ошибок второго рода, тем ниже информативность биометрического параметра. Очевидно, что для каждого биометрического параметра v_i можно вычислить вероятности ошибок второго рода, усреднить их, оценив тем самым значение математического ожидания – $E(P_{2,i})$ или среднюю информативность рассматриваемых биометрических параметров. В примере, представленном на рис. 2, по отношению к двум параметрам среднее значение (математическое ожидание) составит $E(P_{2,i}) \approx (0,56 + 0,16)/2 = 0,36$.

В первом приближении можно считать, что все 416 биометрических параметров большой нейросети в нижней части рис. 1 имеют одинаковую информативность, обеспечивая вероятности ошибок второго рода для каждого v_i биометрического параметра $P_2 \approx E(P_{2,i}) \approx 0,36$. Если теперь еще больше упростить задачу и считать все 416 биометрических параметров независимыми, то их использование приведет к снижению вероятностей ошибок до величины $P_2 \approx 0,36/\sqrt{416} \approx 0,018$. При этом вероятность ошибок первого рода становится практически нулевой.

Симметризация задачи нейросетевого анализа по коэффициентам корреляции входных данных

Полное пренебрежение влияния корреляционных связей входных данных на качество принимаемых нейросетью решений ранее являлось вынужденной мерой. Рассматривать влияние матриц корреляционных связей классическими методами имитационного моделирования сложно [9]. Моделирование влияния корреляционных матриц на результат принятия нейросетевых решений не устойчиво из-за больших ошибок оценки самих коэффициентов корреляции на малых выборках [10].

Известно, что классическая формула Пирсона дает относительные значения ошибок до $\pm 70\%$ на малых выборках, в нашем случае в 16 опытах:

$$r(v_1, v_2) = \frac{1}{15} \sum_{i=0}^{15} \frac{(E(v_1) - v_{1,i}) \cdot (E(v_2) - v_{2,i})}{\sigma(v_1) \cdot \sigma(v_2)}, \quad (2)$$

где $r(v_1, v_2)$ – коэффициент корреляции биометрических параметров v_1 и v_2 ; $E(\cdot)$ – математическое ожидание данных малой выборки; $\sigma(\cdot)$ – стандартное отклонение; v_1 – значение первого биометрического параметра; v_2 – значение второго биометрического параметра.

Упростить вычисления и одновременно повысить устойчивость операций с ними удастся в случае симметризации корреляционных матриц [11, 12]. Смысл симметризации состоит в замене реальной асимметричной корреляционной матрицы на ее симметричный аналог:

$$\begin{bmatrix} 1 & r_1 & r_2 & \dots & r_n \\ r_1 & 1 & r_{n+1} & \dots & r_{2n-2} \\ r_2 & r_{n+1} & 1 & \dots & r_{3n-3} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_n & r_{2n-2} & r_{3n-3} & \dots & 1 \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} 1 & \tilde{r} & \tilde{r} & \dots & \tilde{r} \\ \tilde{r} & 1 & \tilde{r} & \dots & \tilde{r} \\ \tilde{r} & \tilde{r} & 1 & \dots & \tilde{r} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \tilde{r} & \tilde{r} & \tilde{r} & \dots & 1 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Такая замена оказывается эквивалентной, если вероятности ошибок первого и второго рода у асимметричной нейросети и симметричной нейросети совпадают. У симметричной корреляционной матрицы все элементы вне диагонали одинаковы и вычисляются усреднением модулей коэффициентов корреляции исходной асимметричной матрицы:

$$\tilde{r} \approx \frac{2}{n^2 - n} \sum_{i=1}^{(n^2-n)/2} |r_i|, \quad (4)$$

где n – размерность обрабатываемых данных.

При росте размерности обрабатываемых данных n квадратично растет число усредняемых при вычислениях (4) коэффициентов корреляции. Как результат, усреднения ошибки оценки коэффициентов корреляции (2) из-за ограниченного объема выборки уменьшаются.

Еще одним важным обстоятельством упрощения и стабилизации вычислений является линейная связь вероятностей ошибок второго рода, показанная на рис. 3.

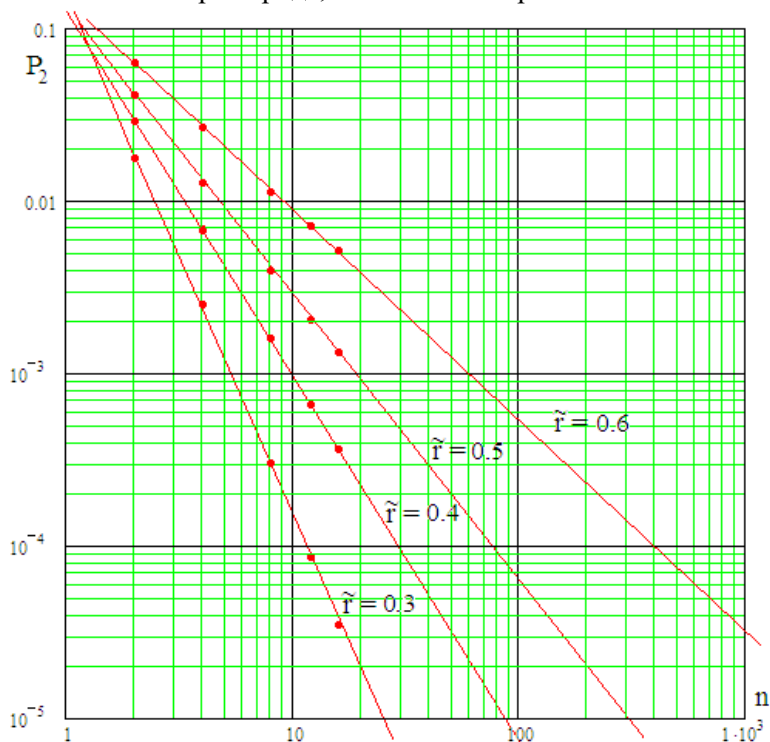


Рис. 3. Линейная связь вероятности ошибок второго рода симметричной нейросети с числом входов n при $P_2 \approx 0,1$ для каждого из симметризованных биометрических параметров

Заключение

Описанные в данной статье количественные соотношения достаточно просты и могут быть использованы при планировании развития приложений искусственного интеллекта. Как правило, возможно заранее количественно оценить корреляционные связи исходных реальных данных и среднюю вероятность ошибок второго рода. Кроме того, всегда можно оценить уровень вероятности ошибок, характерных для «сильного» эксперта-человека при его доступе к реальным данным ограниченной размерности n (см. рис. 3). Далее можно задать желаемый уровень снижения вероятностей ошибок или задать желаемый уровень увеличения объема принимаемых во внимание исходных данных. В итоге получим прогноз того, как связаны между собой эти два параметра, подлежащих регулированию (планированию).

Полученные предварительные оценки показывают, что переход от анализа статических образцов рукописных слов на бумажных носителях информации к анализу динамики их воспроизведения при рукописном заполнении электронных документов кардинально меняет ситуацию. Вполне вероятно, что в ближайшем будущем, приходя в центр предоставления государственных услуг, гражданину придется заполнять различные декларации и ходатайства рукописно в электронной форме. Сейчас граждане вынуждены писать эти документы обычной ручкой на обычной бумаге. Завтра появится возможность писать (формировать) аналогичные электронные документы электронной ручкой на электронном доверенном терминале. Тогда у государства появляется возможность подтвердить (проверить) авторство заполняющего (заполнившего) электронный документ, сравнивая динамику воспроизведения его автографов в электронном документе с эталонной динамикой автографа в электронном паспорте.

Принципиально важно при синтезе и использовании нейронных сетей параллельно использовать анализ биометрических данных, как в динамике, так и в статике. Так, общедоступное приложе-

ние «БиоНейроАвтограф» [4] анализирует только динамику воспроизведения рукописного образа. Можно с уверенностью утверждать, что надежность распознавания рукописных образов возрастет, если усилить анализ еще одной дополнительной сетью искусственных нейронов, обученной анализировать только особенности статического двухмерного образа (следа пера «мертвой» подписи) многослойной сетью искусственных нейронов. При этом к автоматическому анализу 16 параметров классического графологического анализа необходимо будет добавить десятки других дополнительных параметров, извлекаемых из статической «мертвой» подписи достаточно сложными, но устойчивыми в вычислительном отношении алгоритмами [13].

Список литературы

1. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс. М. : Вильямс, 2006. С. 1104.
2. Иванов А. И., Захаров О. С. Среда моделирования «БиоНейроАвтограф». 2009. URL: <http://пниэи.рф/activity/science/noc/bioneuroautograph.zip>
3. Иванов А. И. Автоматическое обучение больших искусственных нейронных сетей в биометрических приложениях : учеб. пособие. Пенза, 2013. 30 с. URL: http://пниэи.рф/activity/science/noc/tm_IvanovAI.pdf
4. Качайкин Е. И., Куликов С. В. Получение биометрических параметров высокого качества из статического изображения рукописной подписи // Инфокоммуникационные технологии. 2015. № 4. С. 45–49.
5. Иванов А. И., Ложников П. С., Качайкин Е. И. Идентификация подлинности рукописных автографов сетями Байеса – Хэмминга и сетями квадратичных форм // Вопросы защиты информации. 2015. № 2. С. 28–34.
6. Иванов А. И., Ложников П. С., Качайкин Е. И., Сулавко А. Е. Биометрическая идентификация рукописных образов с использованием корреляционного аналога правила Байеса // Вопросы защиты информации. 2015. № 3. С. 48–54.
7. Кубасов А. И., Иванов А. И. Условия оперативного тестирования больших нейронных сетей на малых выборках // Академическая мысль. 2020. № 3. С. 102–106.
8. Иванов А. И., Кубасов И. А., Самокутяев А. М. Тестирование больших нейронных сетей на малых выборках // Надежность и качество сложных систем. 2020. № 3. С. 72–79. doi: 10.21685/2307-4205-2020-3-9.
9. Шалыгин А. С., Палагин Ю. И. Прикладные методы статистического моделирования. Л. : Машиностроение, 1986. 320 с.
10. Иванов А. И., Золотарева Т. А. Искусственный интеллект в защищенном исполнении: синтез статистико-нейросетевых автоматов многокритериальной проверки гипотезы независимости малых выборок биометрических данных. Препринт. Пенза : Из-во ПГУ, 2020. 105 с. ISBN 978-5-907364-24-0.
11. Иванов А. И., Банных А. Г., Серикова Ю. И. Учет влияния корреляционных связей через их усреднение по модулю при нейросетевом обобщении статистических критериев для малых выборок // Надежность. 2020. № 20. С. 28–34. URL: <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2020-20-2-28-34>
12. Иванов А. И., Банных А. Г. Быстрая оценка энтропии длинных кодов с зависимыми разрядами на микроконтроллерах с малым потреблением и низкой разрядностью (обзор литературы по снижению размерности задачи) // Инженерные технологии и системы. 2020. Т. 30, № 2. С. 300–312. doi: 10.15507/2658-4123.030.2020.02.300.312.
13. Качайкин Е. И., Куликов С. В. Получение биометрических параметров высокого качества из статического изображения рукописной подписи // Инфокоммуникационные технологии. 2015. № 4. С. 45–49.

References

1. Khaykin S. *Neyronnye seti: polnyy kurs = Neural Networks: a complete course*. Moscow: Vil'yams, 2006:1104. (In Russ.)
2. Ivanov A.I., Zakharov O.S. *Sreda modelirovaniya «BioNeyroAvtograf» = Modeling Environment "BioNeyroAvtograf"*. 2009. (In Russ.). Available at: <http://пниэи.рф/activity/science/noc/bioneuroautograph.zip>
3. Ivanov A.I. *Avtomaticheskoe obuchenie bol'shikh iskusstvennykh neyronnykh setey v biometricheskikh prilozheniyakh: ucheb. posobie = Automatic training of large artificial neural networks in biometric applications: tutorial*. Penza, 2013:30. (In Russ.). Available at: http://пниэи.рф/activity/science/noc/tm_IvanovAI.pdf
4. Kachaykin E.I., Kulikov S.V. Obtaining high-quality biometric parameters from a static image of a handwritten signature. *Infokommunikatsionnye tekhnologii = Infocommunication technologies*. 2015;4:45–49. (In Russ.)
5. Ivanov A.I., Lozhnikov P.S., Kachaykin E.I. Identification of the authenticity of handwritten autographs by Bayes-Hamming networks and networks of quadratic forms. *Voprosy zashchity informatsii = Information security issues*. 2015;2:28–34. (In Russ.)
6. Ivanov A.I., Lozhnikov P.S., Kachaykin E., Sulavko A.E. Biometric identification of handwritten images using the correlation analogue of the Bayes rule. *Voprosy zashchity informatsii = Information security issues*. 2015;3:48–54. (In Russ.)

7. Kubasov A.I., Ivanov A.I. Conditions for rapid testing of large neural networks on small samples. *Akademicheskaya mys'* = *Academic thought*. 2020;3:102–106. (In Russ.)
8. Ivanov A.I., Kubasov I.A., Samokutyayev A.M. Testing large neural networks on small samples. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system* = *Reliability and quality of complex systems*. 2020;3:72–79. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2020-3-9
9. Shalygin A.S., Palagin Yu.I. *Prikladnyye metody statisticheskogo modelirovaniya* = *Applied methods of statistical modeling*. Leningrad: Mashinostroenie, 1986:320. (In Russ.)
10. Ivanov A.I., Zolotareva T.A. *Iskusstvennyy intellekt v zashchishchennom ispolnenii: sintez statistiko-neyrosetevykh avtomatov mnogokriterial'noy proverki gipotezy nezavisimosti malykh vyborok biometricheskikh dannykh*. Preprint = *Artificial intelligence in a protected version: synthesis of statistical and neural network automata for multi-criteria testing of the hypothesis of independence of small samples of biometric data*. Preprint. Penza: Iz-vo PGU, 2020:105. (In Russ.). ISBN 978-5-907364-24-0.
11. Ivanov A.I., Bannykh A.G., Serikova Yu.I. Taking into account the influence of correlations through their modulo averaging in the neural network generalization of statistical criteria for small samples. *Nadezhnost' = Reliability*. 2020;20:28–34. (In Russ.). Available at: <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2020-20-2-28-34>
12. Ivanov A.I., Bannykh A.G. Fast entropy estimation of long codes with dependent bits on microcontrollers with low consumption and low bit depth (review of the literature on reducing the dimension of the problem). *Inzhenernye tekhnologii i sistemy* = *Engineering technologies and systems*. 2020;30(2):300–312. (In Russ.). doi: 10.15507/2658-4123.030.2020.02.300.312
13. Kachaykin E.I., Kulikov S.V. Obtaining high-quality biometric parameters from a static image of a handwritten signature. *Infokommunikatsionnye tekhnologii* = *Infocommunication technologies*. 2015;4:45–49. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Александр Иванович Иванов

доктор технических наук, доцент, консультант,
Пензенский научно-исследовательский
электротехнический институт
(Россия, г. Пенза, ул. Советская, 9)
E-mail: ivan@pniei.penza.ru

Игорь Анатольевич Кубасов

доктор технических наук, доцент,
главный научный сотрудник
ФКУ НПО «СТиС» МВД РФ,
профессор кафедры информационных технологий,
Академия управления МВД РФ
(Россия, г. Москва, ул. Зои и Александра
Космодемьянских, 8)
E-mail: igorak@list.ru

Alexander I. Ivanov

Doctor of technical sciences, associate professor,
consultant,
Penza Research Electrotechnical Institute
(9 Sovetskaya street, Penza, Russia)

Igor A. Kubasov

Doctor of technical sciences, associate professor,
chief researcher of the FKU NPO "STIS"
of the Ministry of Internal Affairs of Russian Federation,
professor of sub-department of information technologies,
Academy of management of the Ministry
of internal affairs of the Russian Federation
(8 Zoi i Aleksandra Kosmodem'yanskikh street,
Moscow, Russia)

КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ ОБОСНОВАНИЯ ПРИМЕНЕНИЯ ОПЕРАТОРОВ ЭВОЛЮЦИИ МИКРОСКОПИЧЕСКОЙ ЭНТРОПИИ, ПРЕОБРАЗОВАНИЯ И ВНУТРЕННЕГО ВРЕМЕНИ В ТЕОРИИ ДОЛГОВЕЧНОСТИ СТРУКТУРНО И ФУНКЦИОНАЛЬНО СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

В. А. Острейковский¹, С. А. Лысенкова², В. Г. Недорезов³, Н. К. Юрков⁴

^{1,2} Сургутский государственный университет, Сургут, Россия

^{3,4} Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

¹ ova@surgu.ru, ² lsa1108@mail.ru, ³ nedval@yandex.ru, ⁴ yurkov_NK@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Для обеспечения надежности, безопасности, эффективности и качества структурно и функционально сложных и критически важных технических систем с длительными сроками активного существования возникает необходимость использования современных подходов к оценке ресурса и срока службы с учетом асимметрии времени в модусах «прошлое–настоящее–будущее». *Материалы и методы.* С целью реализации этой идеи проанализированы и выполнены научно-методические концептуальные обоснования применения новых методов функционального анализа для оценки показателей долговечности структурно и функционально сложных систем, изготавливаемых часто малыми сериями, а часто и вообще в единичных экземплярах типа систем защиты Земли от космических угроз. *Результаты и выводы.* Сделаны выводы о возможности применения концепций микроскопической формулировки второго начала термодинамики, внутреннего времени как оператора для описания функционирования неустойчивых и необратимых систем, и внутренне случайных и внутренне необратимых систем в задачах оценки долговечности структурно и функционально сложных систем применением современного функционального анализа и учета фактора асимметрии времени.

Ключевые слова: операторы микроскопической энтропии, преобразования и внутреннего времени, «возраст» системы, показатели долговечности

Финансирование: Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 17-01-00244 и № 18-07-00391).

Для цитирования: Острейковский В. А., Лысенкова С. А., Юрков Н. К. Концептуальные основы обоснования применения операторов эволюции микроскопической энтропии, преобразования и внутреннего времени в теории долговечности структурно и функционально сложных систем // Надежность и качество сложных систем. 2021. № 1. С. 17–30. doi:10.21685/2307-4205-2021-1-2

CONCEPTUAL FOUNDATIONS FOR THE JUSTIFICATION OF THE USE OF MICROSCOPIC ENTROPY EVOLUTION OPERATORS, TRANSFORMATIONS AND INTERNAL TIME IN THE THEORY OF DURABILITY STRUCTURALLY AND FUNCTIONALLY COMPLEX SYSTEMS

V.A. Ostreykovskiy¹, S.A. Lysenkova², V.G. Nedorezov³, N.K. Yurkov⁴

^{1,2} Surgut State University, Surgut, Russia

³ Penza State University, Penza, Russia

¹ ova@surgu.ru, ² lsa1108@mail.ru, ³ nedval@yandex.ru, ⁴ yurkov_NK@mail.ru

Abstract. *Background.* To ensure the reliability, safety, efficiency and quality of structurally and functionally complex and critical technical systems with long periods of active existence, it becomes necessary to use modern approaches to assessing the resource and service life, taking into account the asymmetry of time in the "past-present-future" modes. *Materials and methods.* In order to implement this idea, scientific and methodological conceptual justifications for the application of new methods of functional analysis to assess the durability indicators of structurally and functionally complex systems, often manufactured in small batches, and often in general in single copies such as

systems for protecting the Earth from space threats, have been analyzed and performed. *Results and conclusions.* Conclusions are drawn about the possibility of applying the concepts of the microscopic formulation of the second law of thermodynamics, internal time as an operator to describe the functioning of unstable and irreversible systems, and internally random and internally irreversible systems in the problems of assessing the durability of structurally and functionally complex systems using modern functional analysis and taking into account the time asymmetry factor.

Keywords: operators of microscopic entropy, transformation and internal time, "age" of the system, indicators of durability

Acknowledgments: The work was carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research (projects 17-01-00244 and 18-07-00391).

For citation: Ostreykovskiy V.A., Lysenkova S.A., Yurkov N.K. Conceptual foundations for the justification of the use of microscopic entropy evolution operators, transformations and internal time in the theory of durability structurally and functionally complex systems. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2021;1:17–30. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2021-1-2

Введение

Обеспечение высокой долговечности таких сложных систем, как энергоблоки атомных электростанций, атомные подводные лодки и ледоколы, авиационные и космические системы, а в последние десятилетия и проектируемые системы защиты Земли от космических угроз, обычно выполняется на базе теорий длительной прочности. И здесь стоит особо подчеркнуть, что данные расчеты показателей долговечности (ресурса, срока службы и их остаточных значений) обеспечены соответствующими государственными и международными нормативными документами и стандартами с детерминированными и вероятностно-статистическими методами. Вместе с этим по данным ООН число природных аварий и катастроф за 30 лет возросло с 73 в 1975 г. до 440 в 2007 г. А число же техногенных аварий и катастроф за этот период увеличилось в три раза: с 1230 за десятилетний период с 1978 по 1987 г. до 3435 в период с 1998 по 2007 г. Объемы прямого ущерба от техногенных аварий и катастроф, оцениваемые коэффициентом их нарастания, за последние 5–10 лет резко увеличились до 6,0. Темп нарастания техногенных аварий и катастроф увеличивается в 3,5 раза быстрее, чем природных [1, 2]. Достаточно вспомнить многочисленные жертвы людей и многомиллиардные убытки от катастроф на Чернобыльской АЭС и АЭС «Фукусима» (Япония), Саяно-Шушенской ГЭС. Только в России в 2011 г. произошло пять аварий с космическими аппаратами с многомиллиардными потерями [3, 4]. Все это свидетельствует о том, что, вполне возможно, наши знания о природе аварий и катастроф явно не успевают, особенно в обеспечении высоких показателей долговечности сложных систем, за увеличением их структурной и функциональной сложности. Неустойчивость и необратимость процессов приводят к разрушению траектории поведения оборудования структурно и функционально сложных систем (СФСС) и, следовательно, к появлению большого множества структурированных коллективных состояний. А это грозит появлению отказов, аварий и катастроф. Говоря техническим языком, сильно неустойчивые системы с большим числом возможных необратимых процессов являются источником когерентности явлений техногенной безопасности. Если в равновесии или вблизи него состояние оборудования СФСС по крайней мере в течение достаточно долгого периода времени полностью определяется краевыми условиями, то вдали от равновесия возможно появление множества диссипативных структур. Именно поэтому в последние десятилетия XX в. в качестве обобщенного параметра СФСС используются понятия детерминированного хаоса и аттрактора.

Постановка задачи

Середина и конец XX в. характеризуются новым этапом научно-технической революции, который, в частности, обогатил науку новым подходом в теории асимметрии времени. В центре идей были работы научных школ А. М. Ляпунова [5], В. И. Вернадского [6] и И. Р. Пригожина [7, 8]. Многочисленные исследования в приведенных работах [5–8] свидетельствуют, что неустойчивость и необратимые процессы имеют свои особенности на трех уровнях описания систем: субмикроскопическом, микроскопическом и макроскопическом. Установлено, что причинами сложных деградационных процессов, приводящих в итоге к отказам, авариям и катастрофам СФСС, являются коррозия, эрозия, износ, усталость, деформации и другие макроскопические процессы. В указанных и других макропроцессах первопричиной служат необратимые процессы типа химических реакций,

диффузии, распада твердых растворов, адсорбции и т.п. Причем «необратимые процессы обычно развиваются и прогрессируют под действием комплекса внешних и внутренних эксплуатационных факторов внешней среды (температуры, влажности, давления, динамических и статических механических нагрузок, термогидравлических ударов, облучения, воздействия электрических, магнитных и других полей), а также влияния человеческого фактора» [9,10].

Концептуальной научно-методологической основой применения операторов эволюции энтропии, преобразования и внутреннего времени следует принять для цели повышения эффективности исследований в области (оценки и анализа показателей) развития теории долговечности СФСС два утверждения:

– возрастание энтропии объектов во времени в соответствии со вторым началом термодинамики;

– феномен времени не параметр, а оператор.

В силу отмеченных особенностей описания функционирования СФСС целью данной статьи является исследование на концептуальном уровне нового подхода к задачам теории долговечности с применением операторов эволюции микроскопической энтропии, преобразования и внутреннего времени.

Основная часть

1. Концепция макроскопической формулировки второго начала термодинамики

Начиная с 1960 г. в течение последующих сорока лет лауреатом Нобелевской премии И. Р. Пригожиным были опубликованы восемь оригинальных книг (в том числе на русском языке), в которых на фундаментальном уровне доказано, что в сложных системах возрастание энтропии в соответствии со вторым началом термодинамики приводит к асимметрии времени. В этом плане следует также отметить вклад в исследования рассматриваемых моделей неустойчивостей и необратимости процессов Больцмана, И. Р. Пригожина и плеяды отечественных ученых А. М. Ляпунова [5], В. И. Вернадского [6], Н. Н. Боголюбова [11], А. А. Власова [12], М. А. Леонтовича [13], Ю. П. Климонтовича [14] и др.

Для общности рассуждений приведем несколько известных положений:

1) И. Ньютон (1643–1727) в своем основном труде «Математические начала натуральной философии» (1687 г.) сформулировал второй закон классической механики, в котором нет различия между прошлым и будущим, т.е. уравнение

$$m \frac{d^2 r}{dt^2} = F \quad (1)$$

инвариантно относительно обращения времени в прошлое $t \rightarrow -\infty$ и в будущее $t \rightarrow +\infty$;

2) Р. Ю. Клаузиус (1822–1888) в 1835 г. ввел в термодинамику новое понятие «энтропия» [гр. *en* – в, внутрь, а *tropé* – поворот, превращение], характеризующее тепловое состояние тела или системы тел как меру внутренней неупорядоченности системы. Р. Клаузиусом были введены в рассмотрение основные понятия энтропии S , которые получили название второго начала термодинамики

$$\frac{dS}{dt} \geq 0, \quad dS = d_e S + d_i S, \quad d_i S \geq 0, \quad (2)$$

где $d_e S$ определяет перенос энтропии через границы системы, а $d_i S$ описывает количество энтропии, производимой внутри системы.

Второе начало гласит: при любых граничных условиях производство энтропии положительно. И, как правило, создают энтропию необратимые процессы (химические реакции, диффузия и другие субмикроскопические процессы).

В соответствии с первым началом термодинамики для замкнутой системы, которая не обменивается с внешним миром ни веществом, ни энергией и находится в состоянии равновесия, производство энтропии равно нулю. Если же система обменивается теплом с внешним миром (открытая система), то макроскопическая энтропия

$$d_e S = \frac{dE}{T^0}, \quad d_i S = 0. \quad (3)$$

Полный дифференциал энтропии равен

$$dS = \frac{dE}{T^0} + P \frac{dV}{T^0}, \quad (4)$$

где E – энергия; V – объем; T^0 – абсолютная температура; P – давление.

3) Дж. У. Гиббс (1839–1903) в развитии формулы (4) предложил зависимость, учитывающую неоднородность состава тела

$$dS = \frac{dE}{T^0} + P \frac{dV}{T^0} - \sum \frac{\mu_\gamma}{T^0} dn_\gamma, \quad (5)$$

где μ_γ – химические потенциалы, а n_1, n_2, \dots – число молей различных компонент системы.

Для необратимых процессов в линейной термодинамике допускается обобщение формулы Гиббса (5) вида

$$\frac{dS}{dt} = \sum X_i J_i, \quad (6)$$

где J_i – скорости необратимых процессов, протекающих в системе; X_i – соответствующие им обобщающие силы (градиенты температур, химических потенциалов и т.д.). Значения обобщающих сил и химических потенциалов для конкретных необратимых процессов известны в литературе по физике отказов [9–15]. Выражение (6) является одной из основных зависимостей микроскопической термодинамики необратимых процессов.

2. Концепция внутреннего времени как оператора для описания функционирования неустойчивых и необратимых сложных систем

Концептуальные основы описания оператора внутреннего времени (возраста) содержат следующие положения: причины нарушения симметрии времени в структуре и функционировании: диссипативные силы, неустойчивости, флуктуации и бифуркации в сложных системах; время – это не параметр или метка, а оператор, тесно связанный с оператором микроскопической энтропии; существование асимметрии времени во внутренне случайных и внутренне необратимых системах.

2.1. Причины нарушения симметрии времени в структуре и функционировании: диссипативные силы, неустойчивости, флуктуации и бифуркации в сложных системах

Со времен Евклида и Галилея концепция описания поведения систем в пространстве и времени базировалась на принципе их однородности: сдвиги времени не влияют на физические свойства системы. Пространство также однородно и изотропно. Однако возникновение диссипативных структур, химических реакций, диффузии, неустойчивости по мере удаления от состояния равновесия внешних и внутренних воздействий, флуктуаций и других явлений приводит к нарушению однородности пространства и времени и требует применения для описания поведения таких систем дифференциальных уравнений в частных производных. Поэтому вдали от равновесного расстояния системы могут возникать последовательности неустойчивостей, которые приводят к бифуркациям. «Бифуркации являются проявлением внутренней дифференциации между элементами и подсистемами самой системы и системой с окружающей средой. При этом нарушается однородность времени и пространства. Удивительным фактом появления бифуркации является то, что между двумя точками бифуркаций в системе выполняются детерминистические закономерности, а в окрестностях точек бифуркации существенную роль играют флуктуации» [7], которые требуют вероятностного описания (рис. 1), и в соответствии со вторым законом термодинамики появляется эволюция направления вращения.

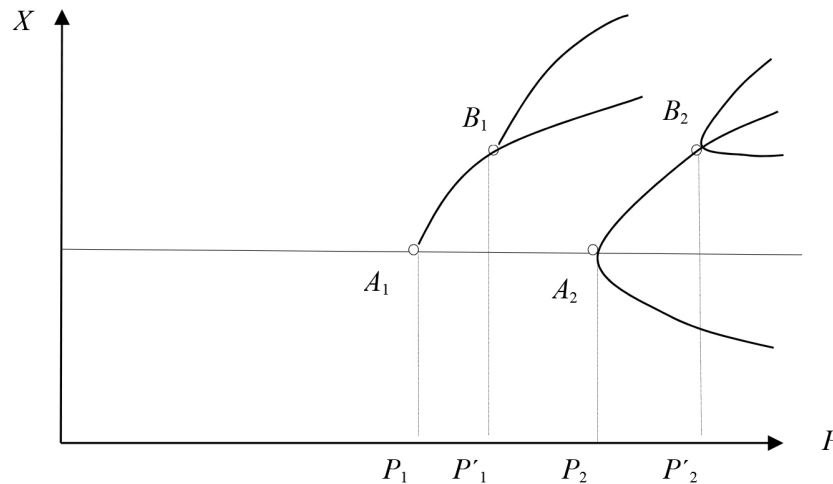


Рис.1. Последовательные бифуркации в сложных системах:
 A_1 и A_2 – точки первичных бифуркаций, B_1 и B_2 – точки вторичных бифуркаций

Поведение систем в окрестности точек бифуркации показывает, что обычно первая ветвь устойчива, а остальные ветви, как правило, неустойчивы. В целом классификация бифуркаций свидетельствует о возможности их изучения с помощью теории катастроф. Существует мнение, что вблизи бифуркаций возникают большие неустойчивости, из-за которых появляются большие трудности применения традиционных вероятностных методов поведения подобных систем [7].

2.2. *Время – это не параметр или метка, а оператор, тесно связанный с оператором микроскопической энтропии и функциями Ляпунова*

Традиционное представление.

Не вызывает сомнений утверждение: для устойчивых систем небольшое изменение точности начальных условий не имеет существенного значения. В то же время неустойчивая система даже при незначительном изменении начальных условий и флуктуаций внешних и внутренних факторов имеет большие изменения: траектории поведения становятся идеализациями из-за изменения структуры фазового пространства. Напомним, что предложенная Л. Больцманом (1844–1906) концепция необратимости постулирует: «необратимость есть проявление в макроскопическом масштабе стохастичности, существующей в микроскопическом масштабе» [7].

Если к этому еще добавить влияние необратимости, то больцмановский подход к описанию систем (опуская все подробности) сводится к следующему: динамика \rightarrow марковский процесс (вероятности) \rightarrow энтропия.

Обратимся сначала к оператору микроскопической энтропии M через оператора Лиувилля L .

Основным недостатком классической механики является принцип описания природы перехода из одного состояния в другое с применением траекторий в фазовом пространстве. В то же время более прогрессивным считается применение методов современного функционального анализа – операторного исчисления. И далее, задолго до достижений в исследовании асимметрии времени Нобелевского лауреата И. Р. Пригожина [7, 8, 22], в начале XX в. А. М. Ляпунов (1906) [5] предложил для решения задач неравновесной термодинамики ввести функции изменчивости временной симметрии, получившие позднее название «функции Ляпунова». В работах [7, 8, 22] было доказано, что с величиной микроскопической энтропии M существуют дополнительные свойства, не включаемые в динамическое описание функционала Ляпунова, зависящего от координат и импульсов:

$$\Omega = \int \rho^2 dpdq > 0 \quad (7)$$

и более общего вида

$$\Omega = \int \rho(t) M \rho(t) dpdq \geq 0, \quad (8)$$

где $M \geq 0$, $\frac{dM}{dt} = D \leq 0$; p и q – координаты и импульсы; $\rho(t)$ – их функции плотности.

Так как целью настоящей статьи является поиск возможностей использования операторного языка для оценки показателей долговечности, то одним из подходов для решения этой задачи является использование для описания систем одновременно и динамики (оператор Лиувилля L), и термодинамики (оператор микроскопической энтропии M), а также функционала Ляпунова (7) с помощью коммутатора

$$-i(LM - ML) = D \leq 0. \quad (9)$$

При этом учитывается, что собственных функций операторов L и M не существует и необходимы свойства дополнительности того или другого типа стохастичности движения.

Именно поэтому далее в п. 2.3 статьи будет рассмотрено решение следующей важной задачи: предложена более «тонкая» классификация структурно и функционально сложных систем на «внутренне случайные» и «внутренне необратимые». Внутренне случайные системы должны обладать возможностью описания повышенной сложности, т.е., например, допускать отображение на цепи Маркова. Внутренне необратимые системы должны иметь отображение, которое приводит к внутреннему различию времени между «прошлым» и «будущим». Поэтому в добавление к изложенному выше в п. 3 настоящей статьи будет рассмотрена еще одна концепция: для описания динамики связи между операторами M и L вводится новый тип времени, оператор «внутреннего» времени T .

И тогда с включением еще и функции Ляпунова замыкается связь между динамикой и термодинамикой, и в итоге четко может быть дано новое понятие времени: оно не «метка», связанная с траекториями, а определяющий фактор эволюции вообще. И только тогда появляется возможность строго математического толкования понятию «возраста» системы в теории долговечности структурно и функционально сложных систем.

2.3. Концепция асимметрии времени во внутренне случайных и внутренне необратимых системах

Нетрадиционное представление.

К внутренне случайным системам относятся системы, имеющие: а) стохастичность независимо от других переменных и б) оператор преобразования Λ . У другого класса систем, называемых внутренне необратимыми, кроме оператора преобразования Λ , в соответствии со вторым началом термодинамики выполняется еще и принцип отбора. Причем обе эти разновидности систем имеют строгое аналитическое обоснование [7].

И еще одно важное замечание: такое двухступенчатое описание эволюции систем определяется в фазовом пространстве функциями распределения состояния ρ , а не описанием точек состояния траекториями фазового пространства. Эволюция функций распределения состояния систем $\rho(t)$ описывается унитарным оператором эволюции U_t

$$U_t = e^{-iLt}, \quad (10)$$

где L – оператор Лиувилля $i \frac{\partial \rho}{\partial t} = L\rho$ и

$$\rho(\omega) = U_t \rho(\omega), \quad (11)$$

а ω – точка на кривой траектории зависимости исследуемой физической величины $Y(t)$ в фазовом пространстве.

Здесь необходимо подчеркнуть следующее:

1) если унитарность классического оператора эволюции U_t определяется, как и в квантовой механике, физическим величинам $Y(t)$ соответствуют операторы, которые в фазовом пространстве сводятся к точечным преобразованиям, лишь «кажутся» операторами, и тогда соотношение (11) можно записать в виде

$$\rho(\omega) = U_t \rho(\omega) = \rho(Y, \omega), \quad (12)$$

2) в подходе, разработанном в работе [7], унитарный оператор должен порождать группу

$$U_t U_s = U_{t+s} \quad (13)$$

при любых вещественных t и s .

Далее, опуская промежуточные рассуждения и выкладки, которые известны по книге И. Р. Пригожина [7], можно для включения вероятностного описания принять

$$\tilde{\rho}_t(\omega) = W_t \tilde{\rho}_0(\omega), \quad (14)$$

и тогда вместо (13) возможно иметь полугруппу операторов

$$W_t W_s = W_{t+s}, \quad (15)$$

где $t, s \geq 0$.

Таким образом, если динамический процесс, отображаемый зависимостью (13), не позволяет различать будущее от прошлого, то учет стохастических особенностей является способом, учитывающим эволюцию времени при анализе состояния сложных систем. И как вывод: операторы полугруппы W , ориентированные в прошлое $t, s \leq 0$, удовлетворяют соотношению

$$W_t W'_s = W'_{t+s}. \quad (16)$$

Тогда оператор преобразования Λ , учитывающий как динамическое описание системы, так и вероятностное, имеет вид

$$\tilde{\rho} = \Lambda \rho. \quad (17)$$

И тогда если для преобразования Λ существует обратное преобразование Λ^{-1} , то оно не унитарно

$$W_t = \Lambda \cup \Lambda^{-1}. \quad (18)$$

Таким образом, установлено чрезвычайно важное утверждение: «вместе с преобразованием Λ , порождающим полугруппу эволюции W_t с возрастанием энтропии, при $t \geq 0$, существует другое преобразование Λ' , порождающее другую полугруппу эволюции

$$W'_t = \Lambda' \cup \Lambda^{-1}, \quad (19)$$

в которой W'_t соответствует возрастанию энтропии в противоположном направлении времени $t < 0$ [7].

Теперь предлагается новая концепция асимметрии времени для внутренне случайных и внутренне необратимых структурно и функционально сложных систем, в которой доказано, что:

- 1) необходимым условием существования оператора преобразования Λ с двумя свойствами является случай, когда а) движение (динамика) сильно неустойчиво, б) обладает высокой чувствительностью к начальным условиям, т.е. наличие фактора перемешивания;
- 2) достаточным условием является существование K -поток (А. Н. Колмогоров, В. И. Арнольд и Ю. К. Мозер [16–18]);
- 3) для внутренне необратимых систем кроме существования нового преобразования Λ должно также выполняться требование наличия принципа отбора в соответствии со вторым началом термодинамики.

3. Концепция применения оператора внутреннего времени для определения показателей долговечности структурно и функционально сложных систем

Исходя из выводов концепций, описанных в пп. 2.2 и 2.3, представляется возможным сформулировать следующий подход к содержанию постулатов внутреннего времени. Необходимое и достаточное условие новой концепции для перехода от оператора M к оператору внутреннего времени T и на его основе к формулированию «возраста» СФСС, с учетом а) функций Ляпунова вида (7) и (8), б) соотношения теоремы Пуанкаре – Мисры [7], в) условия 1) – 3) в п. 2.3 данной статьи: для случая K -поток оператору L сопоставляется такой сопряженный оператор T , что их коммутатор (9) равен

$$-i[L, T] = -i(LT - TL) = 1, \quad (20)$$

где 1 – единичный оператор. В этом случае классификация динамических систем основывается на спектральных свойствах оператора Лиувилля, где оператору L соответствует число λ . Затем находим оператор T , который в том же представлении определяется производной $i(\partial/\partial\lambda)$.

А это означает: сопряженный оператор T соответствует «времени» в том смысле, что представление

$$L \rightarrow i \frac{\partial}{\partial t}, T \rightarrow t \quad (21)$$

удовлетворяет коммутационному уравнению (20).

Выражение (20) позволяет получить соотношение для среднего внутреннего времени. Средние значения $\langle T \rangle$ и $\langle T^2 \rangle$ определяются с помощью билинейных форм

$$\langle T \rangle = \text{tr} \rho^T, \langle T^2 \rangle = \text{tr} \rho^T T^2 \rho. \quad (22)$$

И тогда «обычное» время как динамический параметр есть новое соотношение неопределенности с оператором Лиувилля:

$$\frac{d}{dt} \langle T \rangle = \frac{d}{dt} \text{tr} \left[(e^{-iLt} \rho)^T T e^{-iLt} \rho \right] = i \text{tr} \left[\rho^T e^{iLt} (LT - TL) e^{-iLt} \rho \right] = \text{tr} \rho^T \rho = \text{const}. \quad (23)$$

Если найти подходящую нормировку константе правой части (22), равной единице, то

$$dt = dT. \quad (24)$$

Из выражений (22) – (24) следует: 1) внутреннее время T совпадает с астрономическим временем t , 2) внутреннее время совершенно отличается от времени, нумеруемого в классической или квантовой механике. Эти выводы получаются из анализа нового соотношения неопределенности с оператором Лиувилля (23).

Совпадение текущего времени t и среднего внутреннего $\langle T \rangle$ возможно только в том случае, когда собственные значения оператора T , то самое время, которое считывается с циферблата обычных часов:

$$T\rho(x, v, t) = t\rho(x, v, t), \quad (25)$$

где x – точка фазового пространства X ; v – функция скорости изменения точки x в X во времени t .

Во всех остальных случаях из выражений (20) – (24) следуют чрезвычайно важные принципиально новые выводы:

- 1) макроскопическое время есть среднее от оператора внутреннего времени системы;
- 2) «возраст» системы зависит от самого распределения системы в фазовом пространстве и не является внешним параметром;
- 3) «возраст» системы является средним значением от «индивидуальных» времен ансамбля.

После сделанных выводов можно пойти еще дальше.

Если выражения (9) и (20) справедливы, то вместо (20) можно, как это сделано в работах [7, 8], для перехода к вероятностному описанию сильно неустойчивых систем, использовать следующее соотношение между унитарным оператором U_i (10) и оператором T вида

$$U_i^T T U_i = T \cdot t \cdot 1, \quad (26)$$

где

$$T \chi = n \chi_n, \quad (27)$$

χ_n – собственная функция оператора T , соответствующая «возрасту» n .

Для количественного описания значений показателей долговечности, таких как ресурс, срок службы и их остаточные значения, в данный момент времени применения по назначению объектов СФСС необходимо получить аналитические зависимости показателей долговечности от функции распределения состояний объектов ρ и значений оператора внутреннего времени T . С этой целью рассмотрим полную систему собственных функций оператора T выражения (27).

Известно, что любая функция распределения состояний системы ρ может иметь разложение по собственным функциям

$$\rho = 1 + \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n Y_n. \quad (28)$$

Аналогичным образом можно получить и полную систему собственных функций оператора T по всем возможным конечным произведениям функций χ_n . Если известна точная локализация системы, то функция ρ имеет вид δ -функции:

$$\rho = \delta_{m_0}(x, y) = \delta(x - x_0)\delta(y - y_0) = 1 + \sum_{n=-\infty}^{\infty} Y_n(x_0, y_0)Y_n(x, y), \quad (29)$$

где x и y – оси координат.

Тогда можно утверждать:

- 1) в выражение (29) входят все «возрасты» системы с равными весами;
- 2) существует новая дополнительность между описанием системы на языке точек в фазовом пространстве и «разбиений», которые соответствуют различным внутренним «возрастам» системы;
- 3) внутренний возраст свидетельствует о новом нелокальном описании систем.

Приняв еще два предположения, если функция распределения ρ имеет нулевой возраст при $\chi = \chi_0$ и если по сравнению с равномерным равновесным распределением возможен избыток $\bar{\rho}$, равный

$$\bar{\rho} = \rho - 1 = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n Y_n, \quad (30)$$

то каждому состоянию системы ρ возможно сопоставить средний возраст $\langle T \rangle_\rho$, равный

$$\langle T \rangle_\rho = \frac{\langle \bar{\rho}, T\bar{\rho} \rangle}{\langle \bar{\rho}, \bar{\rho} \rangle}. \quad (31)$$

Учитывая ортонормированность функции Y_n и (29), можно формулу (31) преобразовать к виду

$$\langle T \rangle_\rho = \frac{\sum n c_n}{\sum c_n^2} = \langle n \rangle. \quad (32)$$

Тогда в соответствии с выражением (26) получаем чрезвычайно важное выражение для среднего возраста состояния системы ρ :

$$\langle T_{\rho_t} \rangle = \langle T \rangle_{\rho_0} + t, \quad (33)$$

а именно, средний возраст состояния системы изменяется адекватно с внутренним временем или с обычным внешним временем. Более того, если

$$\langle \delta T^2 \rangle = \langle T^2 \rangle = \langle T \rangle^2, \quad (34)$$

то

$$d\langle \delta T^2 \rangle = 0, \quad (35)$$

т.е. дисперсия внутреннего времени постоянна.

Отсюда появляется возможность сформулировать важные следствия.

Следствие 1. Феномен «внутреннее время» функционирования СФСС любого сложного объекта принципиально не похож на внешнее время.

Следствие 2. Возраст системы зависит не от срока службы какой-либо подсистемы или группы ее элементов, хотя и кажущихся наиболее важными, определяющими систему, а равен средней обобщенной оценке, относящейся ко всем частям системы.

Это противоречит принятой точке зрения в теории надежности и вероятности о «слабом звене».

Следствие 3. Неустойчивость процессов, протекающих в системе, является одним из «главных факторов появления внутреннего времени», и приводит к следующему источнику не локальности, но уже в классической механике.

Следствие 4. Суть следствия 3 приводит к возможности построения преобразования Λ , которое в свою очередь позволяет нарушить симметрию времени, т.е. осуществить переход от классической механики к термодинамике в модусах времени «прошлое–настоящее–будущее» [6–8, 19, 20].

Заключение

Рассмотрены концептуальные основы научно-методологического обоснования асимметрии времени в модусах «прошлое–настоящее–будущее» для полной оценки и анализа показателей долговечности СФСС. Приведенный концептуальный анализ позволил сделать следующие выводы:

1. Неустойчивые и необратимые процессы в СФСС имеют свои закономерности на всех трех взаимосвязанных уровнях описания СФСС: субмикроскопическом, микроскопическом и макроскопическом. В конечном итоге такие микроскопические процессы, как химические реакции, диффузия, адсорбция, распад твердых растворов и другие, а также изменение механических, электрических и магнитных свойств твердых тел являются причиной более сложных деградиационных макроскопических процессов, как коррозия, эрозия, износ, ползучесть, усталость, деформации и др. Причем такого рода необратимые процессы развиваются под действием комплекса внешних и внутренних эксплуатационных факторов в СФСС (динамические и статические механические нагрузки, температура, влажность, давление, термогидравлические удары, облучение, перенос и осаждение продуктов коррозии, примесей и другие) и могут приводить в конечном итоге к возникновению отказов, аварий и катастроф.

2. В теории неустойчивых и необратимых процессов СФСС появляется «второе» (внутреннее) время, связанное с флуктуациями как на микроскопическом, так и макроскопическом уровнях описания. Внутреннее время отличается от астрономического времени, поскольку появляется из-за случайного поведения траекторий в оборудовании динамических систем. Внутреннее время – это оператор, подобный операторам, соответствующий величинам в квантовой механике.

3. Необратимые процессы и асимметрия внутреннего времени по мнению многих исследователей теории детерминистического хаоса приводят к глубоким изменениям на самом фундаментальном уровне описания природы – на уровне пространственно-временного континуума.

4. Исходя из выводов 1–3 в данной работе принята концептуальная основа, опирающаяся на два фундаментальных положения: возрастание энтропии в соответствии со вторым началом термодинамики, которое в конечном итоге и приводит к асимметрии времени, и время не параметр, а оператор, тесно связанный с операторами микроскопической энтропии, преобразования и функциями Ляпунова.

5. Если в классической механике Евклида, Галилея и Ньютона описывалось поведение системы вблизи точки равновесия, когда время и пространство однородно и изотропно, то вдали от равновесного состояния СФСС картина резко изменяется: возникновение диссипативных структур, флуктуаций и неустойчивостей приводит к нарушению пространственно-временной однородности парадигмы, т.е. вдали от равновесного состояния систем могут возникать последовательности неустойчивостей, которые могут приводить в конечном итоге к бифуркациям. При этом между двумя точками бифуркаций в системе выполняются детерминистические закономерности, а в окрестностях точек бифуркаций существенную роль играют флуктуации, требующие вероятностного описания поведения сложных систем с использованием понятий детерминистического хаоса и аттракторов. Именно в силу указанных причин в задачах теории долговечности СФСС необходим новый подход с учетом операторов микроскопической энтропии, преобразования и внутреннего времени.

6. Переход от методов классической механики к операторному языку означает, что классическая механика, занимающаяся изучением траекторий, должна сосредотачивать свое внимание на исследовании эволюции во времени функций распределения состояния сложных систем.

7. В течение длительного времени (вторая половина XIX в. – первая половина XX в.) существовала концепция описания эволюции динамических систем, включающая в себя два вида: первая – прослеживание точек состояния систем по траекториям в фазовом пространстве, вторая (Гиббса – Эйнштейна) – введение в фазовом пространстве функций распределения состояний системы ρ . Причем поток точек состояния систем в фазовом пространстве должен сохранять свой объем (или меру).

8. Во второй половине XX в. появилась новая концепция включения эволюции состояния систем во времени, в которой рассматривается связь оператора микроскопической эволюции M с оператором Лиувилля L , задающей пространство энтропии и появление новой формы дополнительности между динамикой и термодинамикой. А так как общих собственных функций у операторов M и L не существует, то приходится решать дилемму: либо исследовать собственные функции оператора M , либо оператора L в отдельности. А это, по сути, является необходимостью нахождения дополнительных свойств того или иного типа стохастичности движения. В конечном итоге была предложена более «тонкая» классификация структурно и функционально сложных систем: внутренне случайные и внутренне необратимые системы.

9. Для внутренне случайных систем вводятся 1) специальный оператор преобразования Λ ; 2) стохастичность приобретает внутренний смысл независимо от каких-либо скрытых переменных; 3) такие системы должны обладать возможностью описания повышенной сложности, например, допускать отображение на цепи Маркова; 4) новый тип времени – «оператор внутреннего времени» системы T для описания динамики связи между операторами M и L . А с включением в описание динамики внутренне случайных систем еще и функций Ляпунова замыкается связь между динамикой и термодинамикой, и в итоге время является определяющим фактором эволюции вообще. Таким образом, с введением нового понятия внутреннего времени появляется возможность строгого математического толкования конкретного «возраста» системы и вычисления показателей долговечности СФСС типа «ресурс», «срок службы» и их остаточных значений в данный календарный момент времени.

10. Внутренне необратимые системы должны иметь отображения, для которых 1) существует оператор преобразования Λ ; 2) выполняется принцип отбора в соответствии со вторым началом термодинамики и 3) существует отображение, позволяющее различать время между «прошлым» и «будущим».

11. В концепции асимметрии времени для систем, которые в комплексе являются и внутренне случайными, и внутренне необратимыми (т.е. конструктивно и функционально сложными системами) доказано, что их описания должны удовлетворять следующим условиям: 1) необходимыми условиями существования являются: а) наличие оператора преобразования Λ , б) движение (динамика) сильно неустойчиво или обладает высокой чувствительностью по отношению к начальным условиям, т.е. наличие фактора перемешивания; 2) достаточным условием – существование K -потоков (А. Н. Колмогоров, В. И. Арнольд и Ю. К. Мозер); 3) для внутренне необратимых систем, кроме существования нового преобразования Λ , должно выполняться требование наличия принципа отбора в соответствии со вторым началом термодинамики.

12. Математически строго доказано, что если для систем, являющихся внутренне случайными и внутренне необратимыми, выполняются условия вывода 11, то: 1) макроскопическое время СФСС равно среднему значению от оператора внутреннего времени системы; 2) «возраст» системы зависит от самого распределения системы в фазовом пространстве и не является внешним параметром; 3) «возраст» системы является средним значением от «индивидуальных» времен ансамбля.

13. В теории эволюции внутреннего времени систем для перехода к вероятностному описанию предлагается использовать следующее соотношение между унитарным оператором U_t (см. вывод 7) и оператором T вида $U_t^T T U_t = T + t \cdot I$, где $T \chi = n \chi_n$, и χ_n – собственная функция оператора T , соответствующая «возрасту» системы n .

14. Однако для количественного описания значений показателей долговечности СФСС необходимо знание аналитических зависимостей состояния системы ρ от значения оператора внутреннего времени T , т.е. знание полной системы собственных функций оператора T по всем возможным конечным произведениям функций χ_n . Доказано, что если это становится возможным, тогда функция ρ имеет вид δ -функции (29). Это позволяет утверждать следующее: 1) в выражении для δ -функции описания ρ входят все «возрасты» системы с равными весами; 2) существует новая дополнительность между описанием системы на языке точек в фазовом пространстве и разбиениями, которые соответствуют различным внутренним «возрастам» системы; 3) «внутренний возраст» свидетельствует о новом нелокальном описании системы. Если при этом принять два предположения: а) функция распределения состояния системы ρ имеет нулевой возраст при $\chi = \chi_0$ и б) по сравнению с равномерным и равновесным распределением возможны избытки $\bar{\rho} = \rho - 1$, то каждому состоянию $\bar{\rho}$ возможно сопоставить средний возраст $\langle T \rangle_{\bar{\rho}} = \langle n \rangle$.

15. В конечном итоге получаем выражение для «среднего возраста» состояния системы ρ $\langle T_\rho \rangle = \langle T \rangle_{\rho_0} + t$, это свидетельствует о том, что средний возраст состояния системы изменяется адекватно внутреннему времени или с обычным внешним временем t . И даже более того, если $\langle \delta T^2 \rangle = \langle T^2 \rangle = \langle T \rangle^2$, то $d\langle \delta T^2 \rangle = 0$, т.е. дисперсия внутреннего времени постоянна. Проанализировав выводы 13–15, появляется возможность сформулировать вывод 16 в виде четырех следствий, которые звучат как постулаты содержания всей статьи.

16. Следствие 1. Феномен «внутреннее время» любого сложного объекта принципиально отличается от времени функционирования СФСС.

Следствие 2. Возраст системы зависит не от срока службы (ресурса) какой-либо ее подсистемы или группы элементов, хотя и кажущихся наиболее важными, определяющими систему, а равен средней обобщенной оценке, относящейся ко всем частям системы. Это противоречит часто принимаемой точке зрения в теориях надежности и безопасности, положениях о «слабом звене», на которое должно быть обращено главное внимание при оценке долговечности.

Следствие 3. Неустойчивость процессов (особенно сильная) является одним из главных факторов появления «внутреннего времени» как источника нелокальности.

Следствие 4. Суть следствия 3 состоим в том, что оно приводит к возможности построения нарушающего симметрию времени оператора преобразования Λ и осуществления перехода от классической механики к термодинамике в модусах «прошлое–настоящее–будущее».

Список литературы

1. Острейковский В. А. Анализ устойчивости и управляемости динамических систем методами теории катастроф : монография. – М. : Высш. шк., 2005. 326 с.
2. Острейковский В. А. Математические модели теории техногенного риска : монография. Сургут : Изд. центр СурГУ, 2012. 252 с.
3. Острейковский В. А., Швыряев Ю. В. Безопасность атомных станций. Вероятностный анализ : монография. М. : Физматлит, 2008. 349 с.
4. Острейковский В. А., Шевченко Е. Н., Мишкина В. С. Количественная оценка риска в теории техногенной безопасности сложных динамических систем // Итоги науки. Т.1. Избранные труды международного симпозиума по фундаментальным и прикладным проблемам науки. М. : РАН, 2013. Гл. 2. С. 12–31.
5. Ляпунов А. М. Общая задача об устойчивости движения. Череповец : Меркурий-ИПРЕСС, 2000. 386 с.
6. Вернадский В. И. Философские мысли натуралиста. М. : Наука, 1988. 520 с.
7. Prigogine I. From Being to Becoming: Time and Complexity in the Physical Sciences. San Francisco : W.H. Freeman&Co., 1980. 278 p.
8. Пригожин И. Р. Конец определенности. Время, хаос и новые законы природы. Ижевск : Ижевская республиканская типография, 1999. 216 с.
9. Антонов А. В., Острейковский В. А. Ресурс и срок службы оборудования энергоблоков атомных станций (на примере энергоблоков Смоленской АЭС). М. : Инновационное машиностроение, 2017. 535 с.
10. Острейковский В. А., Шевченко Е. Н. Математическое моделирование эффекта асимметрии внутреннего времени в теории долговечности структурно и функционально сложных критически важных систем // Итоги науки. Вып. 37. Избран. тр. Междунар. симпозиума по фундамент. и приклад. проблемам науки. М. : РАН, 2018. С. 69–111.
11. Боголюбов Н. Н. Проблемы динамической теории в статистической физике. М. : Гостехиздат, 1946. 120 с.
12. Власов А. А. Теория вибрационных свойств электронного газа и ее приложения. М. : ЛЕНАНД, 2017. 232 с.
13. Леонтович М. А. Основные уравнения кинетической теории газов с точки зрения теории случайных процессов // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 1935. Т. 5. С. 211.
14. Климонтович Ю. Л. Статическая теория неравновесных процессов в плазме. М. : ЛЕНАНД, 2019. 280 с.
15. Острейковский В. А. Старение и прогнозирование ресурса оборудования атомных станций. М. : Энергоатомиздат, 1994. 286 с.
16. Колмогоров А. Н. Об аналитических методах в теории вероятностей // Успехи математических наук. 1932. Вып. 5. С. 5–41.
17. Арнольд В. И. Особенности, бифуркации и катастрофы // Успехи математических наук. 1983. Т. 141. С. 569–590.
18. Мозер Ю. Заметки о динамических системах. М. : Регулярная и хаотическая динамика, Ижевский институт компьютерных исследований, 2011. 356 с.
19. Денисова Т. Ю. Онтология феномена времени в теории прогнозирования техногенного риска сложных динамических систем / Т. Ю. Денисова, В. А. Острейковский. – Сургут : Печатный мир, 2017. 253 с.

20. Острейковский В. А., Денисова Т. Ю., Шевченко Е. Н. Асимметрия времени в теории прогнозирования состояния сложных динамических систем : монография. Сургут : Печатный мир, 2018. 574 с.
21. Острейковский В. А., Лысенкова С. А., Шевченко Е. Н. О возможности использования эффекта асимметрии времени в задачах оценки долговечности сложных систем // Надежность и качества сложных систем. 2019. № 1. С. 21–34.
22. Острейковский В. А., Шевченко Е. Н. Перспективы применения феномена асимметрии времени в задачах оценки остаточного ресурса сложных критически важных систем // Фундаментальные и прикладные проблемы науки : материалы XIII Междунар. симп. М. : РАН, 2018. С. 29–44.
23. Муравьев И. И., Острейковский В. А., Шевченко Е. Н. Моделирование асимметрии внутреннего времени с позиций второго начала термодинамики в задачах оценивания долговечности сложных систем // Перспективные направления развития отечественных информационных технологий : материалы межрегион. практ. конф. (Севастополь 18–22 сентября 2018 г.). Севастополь : СевГУ, 2018. С. 79–81.

References

1. Ostreykovskiy V.A. *Analiz ustoychivosti i upravlyaemosti dinameskikh sistem metodami teorii katastrof: monografiya = Analysis of stability and controllability of dynamic systems by methods of the theory of catastrophes: monograph*. Moscow: Vyssh. shk., 2005:326. (In Russ.)
2. Ostreykovskiy V.A. *Matematicheskie modeli teorii tekhnogenogo riska: monografiya = Mathematical models of the technogenic risk theory: monograph*. Surgut: Izd. tsentr SurGU, 2012:252. (In Russ.)
3. Ostreykovskiy V.A., Shvyryaev Yu.V. *Bezopasnost' atomnykh stantsiy. Veroyatnostnyy analiz: monografiya = Safety of nuclear power plants. Probabilistic analysis: monograph*. Moscow: Fizmatlit, 2008:349. (In Russ.)
4. Ostreykovskiy V.A., Shevchenko E.N., Mishkina V.S. Quantitative risk assessment in the theory of technogenic safety of complex dynamic systems. *Itogi nauki. T.1. Izbrannye trudy mezhdunarodnogo simpoziuma po fundamental'nym i prikladnym problemam nauki = Results of science. Vol. 1. Selected works of the International Symposium on Fundamental and Applied Problems of Science*. Moscow: RAN, 2013;2:12–31. (In Russ.)
5. Lyapunov A.M. *Obshchaya zadacha ob ustoychivosti dvizheniya = General problem of traffic stability*. Cherepovets: Merkurii-PRESS, 2000:386. (In Russ.)
6. Vernadskiy V.I. *Filosofskie mysli naturalista = Philosophical thoughts of a naturalist*. Moscow: Nauka, 1988:520. (In Russ.)
7. Prigogine I. *From Being to Becoming: Time and Complexity in the Physical Sciences*. SanFrancisco: W.H. Freeman&Co., 1980:278.
8. Prigozhin I.R. *Konets opredelennosti. Vremya, khaos i novye zakony prirody = The end of certainty. Time, chaos, and the new laws of nature*. Izhevsk: Izhevskaya respublikanskaya tipografiya, 1999:216. (In Russ.)
9. Antonov A.V., Ostreykovskiy V.A. *Resurs i srok sluzhby oborudovaniya energoblokov atomnykh stantsiy (na primere energoblokov Smolenskoj AES) = Resource and service life of the equipment of nuclear power units (on the example of the power units of the Smolensk NPP)*. Moscow: Innovatsionnoe mashinostroenie, 2017:535. (In Russ.)
10. Ostreykovskiy V.A., Shevchenko E.N. Mathematical modeling of the effect of internal time asymmetry in the theory of durability of structurally and functionally complex critical systems. *Itogi nauki. Vyp. 37. Izbran. tr. Mezhdunar. simpoziuma po fundament. i priklad. problemam nauki = Results of science. Issue 37. Elected. tr. International. the foundation symposium. and the butt. problems of science*. Moscow: RAN, 2018: 69–111. (In Russ.)
11. Bogolyubov N.N. *Problemy dinamicheskoy teorii v statisticheskoy fizike = Problems of dynamical theory in statistical physics*. Moscow: Gostekhizdat, 1946:120. (In Russ.)
12. Vlasov A.A. *Teoriya vibratsionnykh svoystv elektronnoy gaza i ee prilozheniya = Theory of vibrational properties of an electron gas and its applications*. Moscow: LENAND, 2017:232. (In Russ.)
13. Leontovich M.A. Basic equations of the kinetic theory of gases from the point of view of the theory of random processes. *Zhurnal eksperimental'noy i teoreticheskoy fiziki = Journal of Experimental and Theoretical Physics*. 1935;5:211. (In Russ.)
14. Klimontovich Yu.L. *Sticheseskaya teoriya neravnovesnykh protsessov v plazme = Static theory of nonequilibrium processes in plasma*. Moscow: LENAND, 2019:280. (In Russ.)
15. Ostreykovskiy V.A. *Starenie i prognozirovaniye resursa oborudovaniya atomnykh stantsiy = Aging and forecasting of the service life of nuclear power plant equipment*. Moscow: Energoatomizdat, 1994:286. (In Russ.)
16. Kolmogorov A.N. On analytical methods in probability theory. *Uspekhi matematicheskikh nauk = Advances in mathematical sciences*. 1932;5:5–41. (In Russ.)
17. Arnol'd V.I. Features, bifurcations, and catastrophes. *Uspekhi matematicheskikh nauk = Advances in mathematical sciences*. 1983;141:569–590. (In Russ.)
18. Mozer Yu. *Zametki o dinamicheskikh sistemakh = Notes on dynamic systems*. Moscow: Regulyarnaya i khaoticheskaya dinamika, Izhevskiy institut komp'yuternykh issledovaniy, 2011:356. (In Russ.)

19. Denisova T.Yu., Ostreykovskiy V.A. *Ontologiya fenomena vremeni v teorii prognozirovaniya tekhnogenogo riska slozhnykh dinamicheskikh sistem = Ontology of the time phenomenon in the theory of forecasting technogenic risk of complex dynamic systems*. Surgut: Pechatnyy mir, 2017:253. (In Russ.)
20. Ostreykovskiy V.A., Denisova T.Yu., Shevchenko E.N. *Asimetriya vremeni v teorii prognozirovaniya sostoyaniya slozhnykh dinamicheskikh sistem: monografiya = Time asymmetry in the theory of predicting the state of complex dynamical systems: monograph*. Surgut: Pechatnyy mir, 2018:574. (In Russ.)
21. Ostreykovskiy V.A., Lysenkova S.A., Shevchenko E.N. On the possibility of using the effect of time asymmetry in the problems of assessing the durability of complex systems. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2019;1:21–34. (In Russ.)
22. Ostreykovskiy V.A., Shevchenko E.N. Prospects for the application of the time asymmetry phenomenon in the problems of estimating the residual resource of complex critical systems. *Fundamental'nye i prikladnye problemy nauki: materialy XIII Mezhdunar. simp. = Fundamental and applied problems of science: materials of the XIII International simp.* Moscow: RAN, 2018:29–44. (In Russ.)
23. Murav'ev I.I., Ostreykovskiy V.A., Shevchenko E.N. Modeling of internal time asymmetry from the standpoint of the second principle of thermodynamics in the problems of estimating the durability of complex systems. *Perspektivnye napravleniya razvitiya otechestvennykh informatsionnykh tekhnologiy: materialy mezhtregion. prakt. konf. (Sevastopol' 18–22 sentyabrya 2018 g.) = Perspective directions of development of domestic information technologies: materials of interregional practical conference*. Sevastopol: SevGU, 2018:79–81. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Владислав Алексеевич Острейковский

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры информатики и вычислительной
техники, Сургутский государственный университет
(Россия, г. Сургут, ул. Ленина, 1)
E-mail: ova@ivi.surgu.ru

Светлана Александровна Лысенкова

кандидат физико-математических наук, доцент
кафедры информатики и вычислительной техники,
Сургутский государственный университет
(Россия, г. Сургут, ул. Ленина, 1)
E-mail: lsa1108@mail.ru

Валерий Григорьевич Недорезов

доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры сварочного, литейного
производства и материаловедения,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: nedval@yandex.ru

Николай Кондратьевич Юрков

доктор технических наук, профессор,
заслуженный деятель науки РФ,
заведующий кафедрой конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: yurkov_NK@mail.ru

Vladislav A. Ostreykovsky

Doctor of technical sciences, professor,
professor of sub-department of informatics
and computer science,
Surgut State University
(1 Lenin street, Surgut, Russia)

Svetlana A. Lysenkova

Candidate of physical and mathematical sciences,
associate professor of sub-department of informatics
and computer science, Surgut State University
(1 Lenin street, Surgut, Russia)

Valeriy G. Nedorezov

Doctor of technical sciences, associate professor,
professor of sub-department of welding,
founding manufacture and materials science,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Nikolay K. Yurkov

Doctor of technical sciences, professor,
the honoured worker of science
of the Russian Federation,
head of sub-department
of radio equipment design and production,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ БЕСПИЛОТНОГО АВИАЦИОННОГО КОМПЛЕКСА С ЦЕЛЬЮ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ТЕХНИЧЕСКОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ

В. А. Никулин¹, А. И. Лоскутов², В. А. Клыков³, Е. А. Ряхова⁴, А. В. Столяров⁵

^{1,2,3,4,5} Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Россия
^{1,2,3,4,5} vka@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Неуклонный рост сложности бортовой аппаратуры беспилотных комплексов, а также объема выполняемых задач создает предпосылки к развитию систем диагностирования в данной области, с разработкой соответствующего специального математического и программно-алгоритмического обеспечения. Следовательно, возникает необходимость разработки методики формализации процесса функционирования беспилотных комплексов с целью создания специального математического обеспечения систем диагностирования. *Материалы и методы.* Для решения задачи технического диагностирования используется модифицированная временная сеть Петри и сформированный на ее основе статистический граф разметок. В работе предлагается использовать характеристику запрещенными графами для выделения разрешенных переходов при формализации различных режимов работы беспилотных авиационных комплексов. В качестве решения вопроса адекватности математической модели предлагается на начальном этапе формализации использовать инструмент синтаксически корректных параллельных граф-схем алгоритмов. *Результаты.* Предложенная методика построения математической модели процесса функционирования беспилотных авиационных комплексов позволила получить граф разметок с соответствующим пространством состояний. Характеристика запрещенными графами позволила выделить разрешенные переходы в данном графе исходя из основных режимов работы беспилотного авиационного комплекса. *Вывод.* Формализация процесса функционирования объекта контроля является ключевым элементом создания специального математического обеспечения систем автоматического диагностирования, позволяющим определять скрытые причинно-следственные связи, протекающие внутри любой сложной системы. Применение порождающих грамматик при построении синтаксически корректных параллельных граф-схем алгоритмов позволяет уйти от вопроса оценки адекватности синтезированной математической модели. Полученные результаты подтверждают возможность применения представленного подхода при разработке специального математического обеспечения бортовых систем диагностирования беспилотных авиационных комплексов.

Ключевые слова: математическая модель, алгоритм, беспилотный авиационный комплекс, сеть Петри, параллельная граф-схема алгоритма

Для цитирования: Никулин В. А., Лоскутов А. И., Клыков В. А., Е. А. Ряхова, Столяров А. В. Методика построения математической модели процесса функционирования беспилотного авиационного комплекса с целью решения задачи технического диагностирования // Надежность и качество сложных систем. 2021. № 1. С. 31–40. doi:10.21685/2307-4205-2021-1-3

METHODOLOGY OF CONSTRUCTING A MATHEMATICAL MODEL OF THE OPERATION PROCESS OF AN UNMANNED AVIATION COMPLEX TO SOLVE THE PROBLEM OF TECHNICAL DIAGNOSIS

V.A. Nikulin¹, A.I. Loskutov², V.A. Klykov³, E.A. Ryakhova⁴, A.V. Stolyarov⁵

^{1,2,3,4,5} Military space Academy named after A. F. Mozhaisky, St.-Petersburg, Russia
^{1,2,3,4,5} vka@mail.ru

Abstract. *Background.* The steady increase in the complexity of the on-board equipment of unmanned systems, as well as the volume of tasks performed, creates the preconditions for the development of diagnostic systems in this area, with the development of appropriate special mathematical and software-algorithmic support. Consequently,

there is a need to develop a methodology for formalizing the process of functioning of unmanned systems in order to create special software for diagnostic systems. *Materials and methods.* To solve the problem of technical diagnostics, a modified temporary Petri net and a statistical graph of markings formed on its basis are used. The paper proposes to use the characterization of forbidden graphs to highlight the allowed transitions in the formalization of various modes of operation of unmanned aircraft systems. As a solution to the question of the adequacy of the mathematical model, it is proposed to use the tool of syntactically correct parallel graph-schemes of algorithms at the initial stage of formalization. *Results.* The proposed method for constructing a mathematical model of the process of functioning of unmanned aircraft systems made it possible to obtain a markup graph with the corresponding state space. The characterization of forbidden graphs made it possible to single out the allowed transitions in this graph based on the main modes of operation of the unmanned aircraft complex. *Conclusion.* Formalization of the process of functioning of the controlled object is a key element in the creation of special mathematical support for automatic diagnostics systems, which makes it possible to determine the hidden cause-and-effect relationships that occur inside any complex system. The use of generative grammars in the construction of syntactically correct parallel graph-schemes of algorithms allows avoiding the question of assessing the adequacy of the synthesized mathematical model. The results obtained confirm the possibility of using the presented approach in the development of special software for on-board diagnostic systems for unmanned aircraft systems.

Keywords: mathematical model, algorithm, unmanned aircraft complex, Petri net, parallel graph-scheme of the algorithm

For citation: Nikulin V.A., Loskutov A.I., Klykov V.A., Ryakhova E.A., Stolyarov A.V. Methodology of constructing a mathematical model of the operation process of an unmanned aviation complex to solve the problem of technical diagnosis. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2021;1:31–40. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2021-1-3

Введение

Автоматизация различных сфер деятельности человека инициировала процесс разработки и создания так называемых безэкипажных систем при решении сложных технических задач. Особую актуальность при разработке данных систем занимают вопросы создания беспилотных авиационных комплексов (БАК). Необходимо отметить, что в настоящее время создание БАК занимает одно из главных мест в производственных программах ведущих авиастроителей мира. Вместе с тем неуклонный рост сложности бортовой аппаратуры беспилотных комплексов, а также и объема выполняемых задач создает предпосылки к развитию систем диагностирования в данной области, с разработкой соответствующего специального математического и программно-алгоритмического обеспечения. Из литературы известно¹, что специальное математическое обеспечение – это совокупность моделей, методов и алгоритмов, применяемых в автоматизированных системах. Исходя из этого можно сделать вывод, что создание математических моделей является первичным по отношению к разработке систем массового обслуживания (СМО) систем диагностирования БАК в целом. Необходимо отметить, что при разработке математического обеспечения систем диагностики (СД) важным элементом является формализация процесса функционирования непосредственно объекта диагностирования. Однако данный факт приводит к необходимости выбора математического инструмента (аппарата) для формального описания процессов, происходящих в объекте диагностирования (ОД). В свою очередь сущность задачи технического диагностирования и природа протекающих в ОД процессов могут значительно сузить выбор данных инструментов и представить ОД в виде абстрактной математической конструкции с соответствующим аппаратом формализации.

Постановка задачи разработки методики построения математической модели процесса функционирования беспилотного авиационного комплекса с целью решения задачи технического диагностирования

Как было отмечено ранее, выбор математического аппарата зависит от решаемой задачи и процессов, происходящих в моделируемом объекте. Из литературы известно², что задача технического диагностирования является триединой задачей, включающей в себя контроль технического

¹ ГОСТ 34.003-90. Информационная технология. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Автоматизированные системы. Термины и определения. М. : Изд-во стандартов, 1991. 16 с.

² ГОСТ 20911-89. Техническая диагностика. Термины и определения. М. : Изд-во стандартов, 1990. 12 с.

состояния (ТС), поиск места и причины неисправности (диагностирование), а также прогноз ТС. Таким образом необходимо подобрать математический аппарат, позволяющий решить все три подзадачи с учетом природы процессов, протекающих в объекте моделирования. Другими словами, выбранный математический аппарат должен отвечать требованиям, предъявляемым к синтезируемой математической модели, необходимым для ее практической реализации.

Исходя из обозначенного, постановка задачи разработки методики построения математической модели процесса функционирования беспилотного авиационного комплекса с целью решения задачи технического диагностирования может быть представлена следующим образом.

Дано:

1. Вербальное описание моделируемой системы, позволяющее формализовать процесс функционирования беспилотного авиационного комплекса, в котором отражены наборы базисных множеств $\Omega^{\text{БАК}}$ и отношения $R^{\text{БАК}}$ над данными множествами. Необходимо отметить, что элементы множества $\Omega^{\text{БАК}}$ и $R^{\text{БАК}}$ будут с формальной точки зрения будут определять техническое состояние моделируемой системы при решении задач диагностирования в дальнейшем.

2. Совокупность требований $\Sigma_{\text{треб}}$, предъявляемых к синтезируемой математической модели БАК ($\Xi_{\text{БАК}}$), необходимых для ее практической реализации.

3. Математический аппарат I , применяемый для формализации процесса функционирования БАК. На данном этапе определение конкретного аппарата является несущественным, в связи с этим под I будем понимать «инструмент» для формализации в общем.

Условно обозначим через пару элементов $\langle \omega_f, r_g \rangle, f = \overline{1, m}, g = \overline{1, k}$ техническое состояние моделируемой системы.

Требуется: разработать методику M построения математической структуры $\Xi_{\text{БАК}}$ с целью решения задачи технического диагностирования, включающей в себя элементы множества $\Omega^{\text{БАК}}$ и также учитывающей отношения $R^{\text{БАК}}$ над данными множествами.

Формально постановка задачи разработки методики синтеза математической модели процесса функционирования беспилотного авиационного комплекса с целью решения задачи технического диагностирования может быть представлена следующим образом: необходимо определить оператор F , применение которого к вербальному описанию моделируемой БРЭА обеспечивало бы получение математической модели $\Xi_{\text{БАК}}$, отвечающей требованиям $\Sigma_{\text{треб}}$ и позволяющей найти единственное решение операторного наблюдения [1]:

$$F : \{ \Omega^{\text{БАК}}, R^{\text{БАК}}, \Sigma_{\text{треб}}, I \} \xrightarrow{M} \Xi_{\text{БАК}} \left| k(t_n, v_j) = y_i, y_i \in Y, Y \subset \Omega^{\text{БАК}}, \right. \quad (1)$$

где $k(t_n, v_j) = y_i$ – операторное уравнение наблюдения, решение которого должно происходить относительно элемента $v_j, j = \overline{1, n}$, представляющего собой пару $\langle \omega_f, r_g \rangle, f = \overline{1, m}, g = \overline{1, k}$; $y_i \in Y$ – элементы множества Y , характеризующего выходные процессы и включенного в наборы базисных множеств $Y \subset \Omega^{\text{БАК}}$.

С точки зрения системного представления исследуемой в работе возможности разработки СМО СД БАК, удобно рассматривать обозначенную выше постановку задачи разработки методики в рамках всего подхода к достижению глобальной цели, а именно технического диагностирования БАК в целом. Как было отмечено ранее, на данном этапе выбор определенного математического аппарата является несущественным, так же, как и несущественным является выбор способа определения вида технического состояния (контроля) БАК и выбор способа поиска места и причины неисправности. Исходя из этого, обобщенная схема подхода к техническому диагностированию беспилотного авиационного комплекса может быть представлена следующим образом (рис. 1).

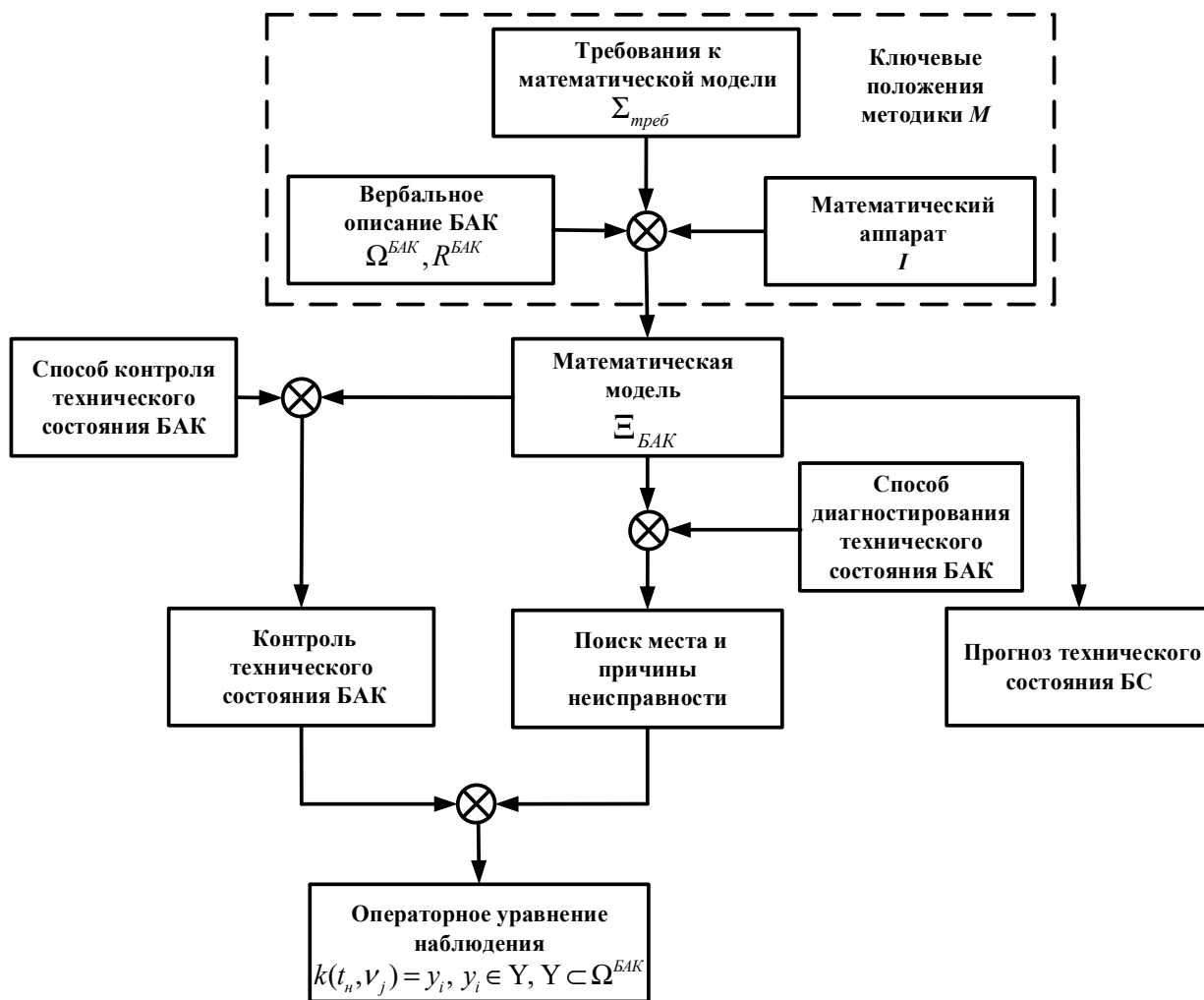


Рис. 1. Обобщенная схема технического диагностирования БАК

Как видно из рис. 1, одним из ключевых элементов при разработке методики построения математической структуры $\Xi_{\text{БАК}}$ (определения оператора F) является выбор математического аппарата для формализации процесса функционирования с целью решения задач технического диагностирования.

Методика построения математической модели процесса функционирования беспилотного авиационного комплекса с целью решения задачи технического диагностирования

В свою очередь известно [2], что для решения задачи технического диагностирования объект моделирования, с формальной точки зрения, удобно представлять в виде стационарной дискретной динамической системы. Класс математических аппаратов для формализации в данном случае остается довольно обширным, однако применительно для моделирования распределенных процессов наиболее предпочтительно с практической точки зрения использовать математический аппарат сетей Петри [3]. Данный математический аппарат является универсальным, на основе которого могут быть построены модельные конструкции, превосходящие по своим моделирующим возможностям различные дискретные модели с конечным или счетным множеством состояний. Однако необходимо отметить, что в общем случае формализация процесса функционирования любой системы на основе различных математических аппаратов подразумевает под собой ряд трудностей, одной из наиболее существенных проблем в данном случае является проблема адекватности синтезируемой математической модели. Для решения данной проблемы в работе предлагается применять аппарат синтаксически корректных параллельных граф-схем алгоритмов (ПГСА) на начальной формализации процесса функционирования БАК. Необходимо отметить, что синтаксическая корректность

алгоритма в данном случае обусловлена применением порождающих грамматик, описанных в литературе [4, 5] при построении ПГСА, что позволяет уйти от вопроса оценки адекватности синтезируемой математической модели. Язык синтаксически корректных ПГСА и процесс формального перехода на их основе к математическому аппарату сетей Петри подробно описан в литературе [6]. В общем виде ПГСА может быть представлена в виде следующей математической конструкции:

$$G = \langle V, E \rangle, \quad (2)$$

в котором:

1) $V = \{u_i\}$ – конечное множество вершин, подразделяющееся на семь подмножеств: O, W, U, L, Δ, H, K , причем O – подмножество операторных вершин, обозначающих действия над данными; остальные вершины – управляющие, среди них выделяются две: H – начало, K – конец;

2) $E = \{e_i\}$ – конечное множество дуг, причем существование дуги e_i обозначает, что действие, соответствующее u_j , может быть выполнено только после завершения действия, отвечающего v_i ;

3) для каждой $v_i \in V$ существует хотя бы один путь от вершины H к v_i и хотя бы один путь от v_i к вершине K .

В свою очередь процесс формального перехода от ПГСА к математическому аппарату сетей Петри происходит на основе подмены вершин параллельной синтаксически корректной граф-схемы алгоритма соответствующими фрагментами сети Петри [8].

Исходя из этого представленная выше постановка задачи разработки методики построения математической модели беспилотного авиационного комплекса с целью решения задачи технической диагностики (1) может быть переписана следующим способом:

$$\begin{cases} F = F_C^{\text{БАК}}(F_G^{\text{БАК}}); \\ F_G^{\text{БАК}} : \{\Omega^{\text{БАК}}, R^{\text{БАК}}, \Sigma_G^{\text{ПГСА}}\} \rightarrow G_{\text{БАК}}; \\ F_C^{\text{БАК}} : G_{\text{БАК}} \rightarrow C_{\text{БАК}}, \end{cases} \quad (3)$$

где $F_G^{\text{БАК}}$ – оператор, применение которого к вербальному описанию процесса функционирования БАК позволяет синтезировать синтаксически корректную параллельную граф-схему алгоритма $G_{\text{БАК}}$ на основе порождающих грамматик $\Sigma_G^{\text{ПГСА}}$; $F_C^{\text{БАК}}$ – оператор, характеризующий формальный переход от синтаксически корректной ПГСА к сети Петри $C_{\text{БАК}}$.

Как видно из выражения (3), оператор F в выражении (1) может быть представлен в виде упорядоченной последовательности операторов преобразования $F_G^{\text{БАК}}$ и $F_C^{\text{БАК}}$.

Необходимо отметить, что задача формализованного представления процесса функционирования БАК на основе применения математического аппарата сетей Петри не является столь очевидной и однозначной, как это может показаться на первый взгляд. Данное утверждение связано с многообразием класса, объединенного понятием математический аппарат сетей Петри. В связи с этим требуется уточнение оператора $F_C^{\text{БАК}}$ при постановке задачи (3). Для этого воспользуемся принципом развиваемости моделей, предполагающего возможность развития формального построения для каждого последующего этапа синтеза математической модели на основе предыдущей модели путем ее развития [5]. Исходя из этого оператор $F_C^{\text{БАК}}$ также может быть представлен как упорядоченная последовательность операторов преобразования:

$$F_C^{\text{БАК}} = F_q^{\text{БАК}}(F_s^{\text{БАК}}(F_{mt}^{\text{БАК}}(F_{cpr}^{\text{БАК}}(F_{fc}^{\text{БАК}}))))), \quad (4)$$

где $F_{fc}^{\text{БАК}}$ – оператор, который преобразует ПГСА в сеть Петри свободного выбора; $F_{cpr}^{\text{БАК}}$ – оператор, который преобразует сеть Петри свободного выбора в управляющую сеть Петри; $F_{mt}^{\text{БАК}}$ – оператор, который преобразует управляющую сеть Петри в модифицированную временную сеть Петри; $F_s^{\text{БАК}}$ – оператор, формирующий статистический граф разметок модифицированной временной сети

Петри; F_q^{BAK} – оператор, формирующий разрешенный граф разметок исходя из особенностей процесса функционирования БАК.

Обобщенная схема технического диагностирования БАК с ключевыми положениями методики M синтеза математической модели процесса функционирования беспилотного авиационного комплекса, представленная на рис. 1, может быть представлена следующим образом (рис. 2).

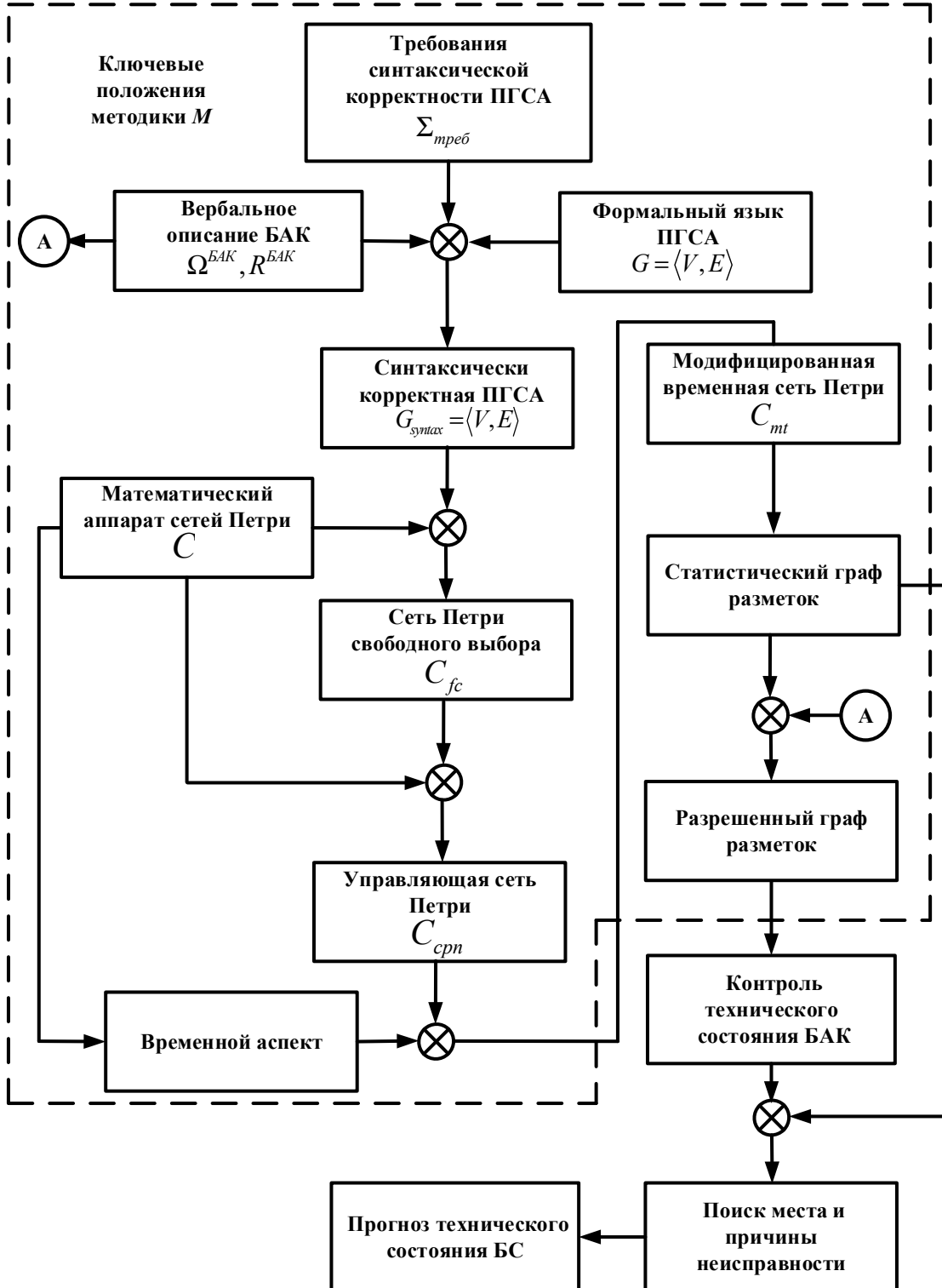


Рис. 2. Системное представление ключевых положений методики синтеза математической модели БАК с целью решения задачи технического диагностирования

На основании вышеизложенного сформулируем методику построения математической модели процесса функционирования БАК с целью решения задач технического диагностирования на основе применения математического аппарата сетей Петри:

1. На основании вербального описания процесса функционирования БАК ($\Omega^{\text{БАК}}$) определяется множество вершин ПГСА V и E .

1.1. Определяется множество вершин H , характеризующих начало алгоритма. Данная операция с математической точки зрения является следующим отображением:

$$f: \omega_j \rightarrow h_i, \omega_j \in \Omega^{\text{БАК}}, h_i \in H. \quad (5)$$

1.2. Определяется множество операторных вершин O , характеризующих действия над данными:

$$g: \omega_j \rightarrow o_k, \omega_j \in \Omega^{\text{БАК}}, o_k \in O. \quad (6)$$

1.3. Определяется множество управляющих вершин W, U, L, Δ , характеризующих переход к параллельному выполнению алгоритмов, объединение параллельных ветвей, выделение по условию (условный переход), выход из цикла и соединение взаимоисключающих ветвей (вход в цикл соответственно):

$$\alpha: \begin{cases} \omega_j \rightarrow w_s, \omega_j \in \Omega^{\text{БАК}}, w_s \in W, \\ \omega_j \rightarrow u_h, \omega_j \in \Omega^{\text{БАК}}, u_h \in U, \\ \omega_j \rightarrow l_p, \omega_j \in \Omega^{\text{БАК}}, l_p \in L, \\ \omega_j \rightarrow \lambda_g, \omega_j \in \Omega^{\text{БАК}}, \lambda_g \in \Delta. \end{cases} \quad (7)$$

1.4. Определяется множество вершин K , определяющих конец алгоритма:

$$\beta: \omega_j \rightarrow k_f, \omega_j \in \Omega^{\text{БАК}}, k_f \in K. \quad (8)$$

2. На основании вербального описания процесса функционирования БАК ($R^{\text{БАК}}$) определяется множество дуг E , характеризующих действия в структуре ПГСА:

$$\beta: r_k \rightarrow e_i, r_k \in R^{\text{БАК}}, e_i \in E. \quad (9)$$

Необходимо отметить, что на данном этапе происходит формирование ПГСА как математической структуры (2) с заданием на множестве G отношений из E . Таким образом, сформированная на данном этапе структура ПГСА будет носить первичный характер, на основе которой будет формироваться структура граф-схемы алгоритма с синтаксически корректной структурой. Однако стоит также отметить, что на практике возможен вариант, когда отображение (9) будет достигаться сразу с учетом рассмотренных ниже свойств синтаксической корректности ПГСА.

3. Проверка структуры ПГСА на наличие свойств корректности [7], а именно:

3.1. Проверка полноты процесса функционирования БАК. Данное свойство означает следующее: в корректной граф-схеме любой оператор $v_i \in V$ входит хотя бы в одну допустимую последовательность выполнения вершин W_j . При этом любому предусмотренному спецификацией процесса функционирования состоянию системы ставится в соответствие определенная вершина граф-схемы v_i .

3.2. Проверка на свойство переопределенности процесса функционирования БАК. Данное свойство предполагает наличие в спецификации протокола избыточных частей, реализация которых не может произойти ни при каких условиях. На языке ПГСА переопределенность представляется фрагментом G' граф-схемы, к входной вершине которого нет пути от начальной v_k вершины ПГСА.

3.3. Проверка на свойство недоопределенности процесса функционирования БАК. В терминах ПГСА данное свойство означает отсутствие в граф-схеме некоторых последовательностей выполнения вершин (или просто вершин), соответствующих недостающим реакциям на входные воздействия в спецификации процессов, протекающих при функционировании БАК. В такой граф-схеме обязательно найдется некоторая вершина в группе обязательных последователей, в которой будет отсутствовать вершина, соответствующая началу не вошедшей в спецификацию части описания.

Следовательно, граф-схема окажется некорректной с точки зрения отсутствия полной совокупности допустимых последовательностей выполнения вершин.

3.4. Проверка на отсутствие тупиков при формализации процесса функционирования БАК. Различают статический и динамический тупики. Для корректной ПГСА в рамках отсутствия статических тупиков должно выполняться условие

$$\exists v_i \in V \mid (v_i) \bullet = \emptyset, \quad (10)$$

где $(v_i) \bullet$ – множество последователей вершины v_i .

Для корректной ПГСА в рамках отсутствия динамических тупиков должно выполняться условие

$$\exists W_i \in W \mid W_i = (v_n, \dots, (v_j, \dots, v_m)_{\infty}), \quad (11)$$

где подпоследовательность $(v_j, \dots, v_m)_{\infty}$ повторяется бесконечное число раз.

3.5. Проверка на отсутствие противоречивости при формализации процесса функционирования БАК. Поясним данное свойство. Отсутствие противоречивости заключается в отсутствии одновременно нескольких взаимоисключающих достижимых состояний при формализации процесса функционирования БАК на одно и то же воздействие.

3.6. Проверка на свойство безопасности при формализации процесса функционирования БАК. Данное свойство должно обеспечиваться в корректной граф-схеме предопределенным заранее набором допустимых последовательностей выполнения вершин, исключающим появление всяких непредвиденных ситуаций попадания в недопустимые состояния. В ПГСА каждая вершина отражает определенное состояние системы. В корректной граф-схеме любая допустимая последовательность выполнения W_j должна завершаться конечной вершиной v_k , а в качестве промежуточных состояний в W_j должны быть все предшественники v_k , которые в свою очередь заранее определены. Поэтому корректная ПГСА гарантирует наличие свойства безопасности при отражении причинно-следственных связей моделируемого БАК.

4. При необходимости происходит коррекция структуры (2) по каждому из свойств до синтаксической корректности ПГСА G_{syntax} в целом. Данная операция с математической точки зрения является следующим отображением:

$$\xi : G \rightarrow G_{syntax}, \quad (12)$$

где ξ – отображение, формализующее переход от обычной ПГСА к синтаксически корректной ПГСА.

5. На данном этапе происходит формальный переход от синтаксически корректной параллельной граф-схемы алгоритма к сети Петри свободного выбора путем замены элементов ПГСА на фрагменты сети:

$$F_{fc} : G_{syntax} \rightarrow C_{fc}, \quad (13)$$

где C_{fc} – сеть Петри свободного выбора.

6. Переход от сети Петри свободного выбора к управляющей сети Петри, предназначенной для синтеза автомата, управляющего последовательностью выполнения различных функций в процессе работы БАК:

$$F_{cpn} : C_{fc} \rightarrow C_{cpn}, \quad (14)$$

где C_{cpn} – управляющая сеть Петри.

Необходимо отметить, что этапы формального перехода по пунктам 5 и 6 данной методики не раскрыты в полной мере вследствие их простоты и известности [8].

7. Преобразование управляющей сети Петри в модифицированную временную сеть Петри. Данное преобразование происходит на основе оператора F_{mt} , являющегося частично неформальным. Неформальное действие этого оператора состоит в дополнении управляющей сети фрагментами, моделирующими появление сигналов, внешних по отношению к управляющим автоматам и форми-

руемых устройствами, работающими под управлением автоматов. Формальное действие оператора F_{mi} состоит в введении временного аспекта в функционирование управляющей сети.

8. Формирование статистического графа разметок на основе модифицированной временной сети Петри.

9. Выделение разрешенных переходов на основе характеристики запрещенными графами. На данном этапе происходит формализация допустимых с точки зрения решения задачи технического диагностирования режимов работы БАК.

Применение данной методики при формализации процесса функционирования одного из существующего БАК позволило получить граф разметок с пространством состояний равным 25. В свою очередь характеристика запрещенными графами позволила выделить разрешенные переходы в данном графе, исходя из основных режимов работы беспилотного авиационного комплекса, что в свою очередь может быть использовано при разработке программно-алгоритмического обеспечения систем диагностирования.

Заключение

Как было отмечено ранее, создание математических моделей является первичным по отношению к разработке СМО систем диагностирования БАК. В работе предложен подход к формализации процесса функционирования беспилотных систем на основе применения математического аппарата сетей Петри. В свою очередь вопросы адекватности синтезированных математических моделей нивелированы применением синтаксически корректных параллельных граф-схем алгоритмов на начальном этапе формализации. Полученные результаты подтверждают возможность применения представленного подхода при разработке специального математического обеспечения бортовых систем диагностирования беспилотных авиационных комплексов.

Список литературы

1. Калинин В. Н. Теоретические основы системных исследований. Краткий авторский курс. СПб. : ВКА им А. Ф. Можайского, 2013. 278 с.
2. Дунаев В. В., Поляков О. М., Фролов В. В. Алгоритмические основы испытаний. М., 1991. 427 с.
3. Котов В. Е. Сети Петри. М. : Наука, 1984. 160 с.
4. Бянкин А. А., Дорошенко В. В. Метод формального описания протоколов функционирования бортовых подсистем обмена информацией объекта // Программирование. 1994. № 5. С. 79–88.
5. Бянкин А. А. Формализация протоколов информационного обмена // Автоматика и вычислительная техника. 1998. № 4. С. 44–53.
6. Ачасова С. М., Бандман О. Л., Пискунов С. В. Методы параллельного микропрограммирования. Новосибирск : Наука, 1981. 177 с.
7. Лоскутов А. И., Бянкин А. А., Семенюк Д. Б., Клыков В. А. Методика синтеза математической модели функционирования бортовой радиоэлектронной аппаратуры объектов ракетно-космической техники на основе полимодельного подхода // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2019. № 9. С. 27–36.

References

1. Kalinin V.N. *Teoreticheskie osnovy sistemnykh issledovaniy. Kratkiy avtorskiy kurs = Theoretical foundations of system research. Short author's course*. Saint-Petersburg: VKA im A. F. Mozhayskogo, 2013:278. (In Russ.)
2. Dunaev V.V., Polyakov O.M., Frolov V.V. *Algoritmicheskie osnovy ispytaniy = Algorithmic basis of tests*. Moscow, 1991:427. (In Russ.)
3. Kotov V.E. *Seti Petri = Petri Nets*. Moscow: Nauka, 1984:160. (In Russ.)
4. Byankin A.A., Doroshenko V.V. Method of formal description of the protocols of functioning of on-board subsystems of object information exchange. *Programmirovaniye = Programming*. 1994;5:79–88. (In Russ.)
5. Byankin A.A. Formalization of information exchange protocols. *Avtomatika i vychislitel'naya tekhnika = Automation and computer engineering*. 1998;4:44–53. (In Russ.)
6. Achasova S.M., Bandman O.L., Piskunov S.V. *Metody parallel'nogo mikroprogramirovaniya = Parallel microprogramming methods*. Novosibirsk: Nauka, 1981:177. (In Russ.)
7. Loskutov A.I., Byankin A.A., Semenyuk D.B., Klykov V.A. Method of synthesis of a mathematical model of functioning of onboard radio-electronic equipment of objects of rocket and space technology on the basis of a poly-model approach. *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika = Devices and systems. Management, control, diagnostics*. 2019;9:27–36. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Владимир Александрович Никулин

соискатель,
Военно-космическая академия
имени А. Ф. Можайского
(Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13)
E-mail: vka@mail.ru

Андрей Иванович Лоскутов

доктор технических наук, профессор,
начальник кафедры телеметрических систем,
комплексной обработки и защиты информации,
Военно-космическая академия
имени А. Ф. Можайского
(Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13)
E-mail: vka@mail.ru

Владимир Алексеевич Клыков

кандидат технических наук,
преподаватель кафедры телеметрических систем,
комплексной обработки и защиты информации,
Военно-космическая академия
имени А. Ф. Можайского
(Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13)
E-mail: vka@mail.ru

Екатерина Александровна Ряхова

адъюнкт кафедры телеметрических систем,
комплексной обработки и защиты информации,
Военно-космическая академия
имени А. Ф. Можайского
(Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13)
E-mail: vka@mail.ru

Андрей Владимирович Столяров

адъюнкт кафедры телеметрических систем,
комплексной обработки и защиты информации,
Военно-космическая академия
имени А. Ф. Можайского
(Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13)
E-mail: vka@mail.ru

Vladimir A. Nikulin

Applicant,
Military space Academy named after A. F. Mozhaisky
(13 Zhdanovskaya street, St.-Petersburg, Russia)

Andrey I. Loskutov

Doctor of technical sciences, professor,
head of sub-department of telemetry systems,
complex processing and protection of information,
Military space Academy named after A. F. Mozhaisky
(13 Zhdanovskaya street, St.-Petersburg, Russia)

Vladimir A. Klykov

Candidate of technical sciences,
teacher of sub-department of telemetry systems,
complex processing and protection of information,
Military space Academy named after A. F. Mozhaisky
(13 Zhdanovskaya street, St.-Petersburg, Russia)

Ekaterina A. Ryakhova

Adjunct of sub-department of telemetry systems,
complex processing and protection of information,
Military space Academy named after A. F. Mozhaisky
(13 Zhdanovskaya street, St.-Petersburg, Russia)

Andrey V. Stolyarov

Adjunct of sub-department of telemetry systems,
complex processing and protection of information,
Military space Academy named after A. F. Mozhaisky
(13 Zhdanovskaya street, St.-Petersburg, Russia)

ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

DIAGNOSTIC METHODS FOR ENSURING RELIABILITY AND THE QUALITY OF COMPLEX SYSTEMS

УДК 681.518.5

doi:10.21685/2307-4205-2021-1-4

СТАТИСТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ СТАБИЛЬНОСТИ ВИБРАЦИЙ ГИДРОАГРЕГАТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА ГЛАВНЫХ КОМПОНЕНТ

В. Н. Клячкин¹, И. Н. Карпунина²

¹ Ульяновский государственный технический университет, Ульяновск, Россия

² Ульяновский институт гражданской авиации, Ульяновск, Россия

¹ v_kl@mail.ru, ² karpunina531@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цель.* Диагностика технического состояния гидроагрегата производится по результатам вибромониторинга. Стабильность функционирования гидроагрегата в значительной мере зависит от уровня его вибраций. Данные по вибрациям поступают на сервер сбора данных через стойку виброконтроля. Далее в режиме реального времени в виде дискретного сигнала они поступают на стойку управления гидроагрегатом, с помощью которой изменяется нагрузка (при слишком больших вибрациях) или происходит останов агрегата (если вибрации достигают критических значений). При вибромониторинге гидроагрегата контролировались десять показателей: вибрации нижнего генераторного подшипника верхнего бьефа, соответствующие вибрации верхнего генераторного подшипника, бой вала гидротурбины и вала гидрогенератора, вибрации крышки гидротурбины. Выход вибраций за допустимые границы, как правило, свидетельствует о нарушении работоспособности гидроагрегата. *Методы.* Для анализа стабильности вибраций могут быть использованы различные подходы. Возможно прогнозирование вибраций на заданный горизонт с использованием систем временных рядов. Еще один метод – использование машинного обучения для бинарной классификации состояния агрегата по результатам обучающей выборки: стабилен он или нестабилен. В настоящей работе для оценки стабильности гидроагрегата используется статистический контроль процессов. Контрольные карты Шухарта для оценки стабильности среднего уровня и рассеяния процесса применяются для независимых показателей. Часть контролируемых показателей вибраций может быть независима от других, однако в общем случае между показателями имеют место значимые корреляционные связи. В такой ситуации применяются многомерные методы, в частности, для контроля стабильности среднего уровня процесса используют карты Хотеллинга. Статистическое управление процессом состоит в выявлении неслучайных нарушений; при этом управляющее воздействие применяется тогда, когда вибрации еще в пределах допуска, но некоторые статистические характеристики дают основание предполагать наличие неслучайной причины, которая приведет к увеличению уровня вибраций. Карта Хотеллинга не всегда адекватно реагирует на возможные нарушения процесса: иногда ее реакция слишком замедленна, а иногда и вообще нарушение процесса проходит незамеченным. Показано, что выходом из этой ситуации может быть применение метода главных компонент с построением карт Шухарта. *Результаты и выводы.* Показано, что в ряде случаев карты

на главных компонентах оказываются эффективнее, чем карты Хотеллинга, обычно применяемые при многомерном статистическом контроле. Это обстоятельство, конечно, не исключает использование карты Хотеллинга, которая во многих ситуациях показывает оперативное выявление нарушений процесса. Например, смещение по двум показателям одновременно было обнаружено картой Хотеллинга и не обнаружено картами на главных компонентах. Представляется целесообразным разработку информационной системы, которая по обучающей выборке результатов вибромониторинга для конкретного гидроагрегата с учетом особенностей его функционирования (т.е. оценки того, какие нарушения опасны именно для этого объекта) в автоматическом режиме обеспечивала бы проведение оперативного контроля стабильности вибраций, а также выдавала бы рекомендации по реагированию на диагностированные контрольными картами нестабильности процесса.

Ключевые слова: гидроагрегат, вибромониторинг, стабильность функционирования, контрольная карта, метод главных компонент

Для цитирования: Клячкин В. Н., Карпунина И. Н. Статистический контроль стабильности вибраций гидроагрегата с использованием метода главных компонент // Надежность и качество сложных систем. 2021. № 1. С. 41–48. doi:10.21685/2307-4205-2021-1-4

STATISTICAL CONTROL OF HYDRO-UNIT VIBRATIONS STABILITY USING THE PRINCIPAL COMPONENTS METHOD

V.N. Klyachkin¹, I.N. Karpunina²

¹ Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, Russia

² Ulyanovsk Institute of Civil Aviation, Ulyanovsk, Russia

¹ v_kl@mail.ru, ² karpunina531@yandex.ru

Abstract. *Background.* Diagnostics of the technical condition of the hydraulic unit is carried out according to the results of vibration monitoring. The stability of the operation of a hydraulic unit largely depends on the level of its vibrations. Vibration data is sent to the data collection server through the vibration monitoring rack. Then, in real time, in the form of a discrete signal, they arrive at the control unit of the hydraulic unit, with which the load changes (with too large vibrations) or the unit stops (if the vibrations reach critical values). During vibration monitoring of the hydraulic unit, ten indicators were controlled: vibration of the lower generator bearing of the upper pool, the corresponding vibration of the upper generator bearing, the battle of the shaft of the turbine and the shaft of the generator, vibration of the cover of the turbine. Exit of vibrations beyond the permissible limits, as a rule, indicates a violation of the operability of the hydraulic unit. *Methods.* Various approaches can be used to analyze vibration stability. It is possible to predict vibrations to a given horizon using time series systems. Another method is the use of machine learning for binary classification of the state of the unit according to the results of the training sample: it is stable or unstable. In the present work, statistical control of processes is used to assess the stability of a hydraulic unit. Shewhart control charts for assessing average level stability and process dispersion are used for independent indicators. Some of the controlled vibration indicators can be independent of others, however, in the general case, significant correlation relationships take place between the indicators. In this situation, multidimensional methods are used, in particular, Hotelling charts are used to control the stability of the average level of the process. Statistical process control is to identify non-random violations; in this case, the control action is applied when the vibrations are still within the tolerance, but some statistical characteristics give reason to assume that there is a nonrandom reason that will lead to an increase in the level of vibrations. The Hotelling chart does not always adequately respond to possible violations of the process: sometimes its reaction is too slow, and sometimes even the violation of the process goes unnoticed. It is shown that the way out of this situation can be the use of the method of principal components with the construction of Shewhart charts. *Results.* It is shown that in some cases the charts on the principal components are more effective than the Hotelling charts, which are usually used in multidimensional statistical control. This circumstance, of course, does not exclude the use of the Hotelling charts, which in many situations shows the prompt detection of process violations. For example, a bias in two indicators was simultaneously detected by the Hotelling charts and not detected by maps on the main components. It seems advisable to develop an information system that, according to the training sample of vibration monitoring results for a particular hydraulic unit, taking into account the features of its functioning (that is, assessing which violations are dangerous for this particular object) in automatic mode, would provide operational monitoring of vibration stability, and would also give recommendations to respond to process instabilities diagnosed with control charts.

Keywords: hydraulic unit, vibromonitoring, stability of operation, control chart, principal components method

For citation: Klyachkin V.N., Karpunina I.N. Statistical control of hydro-unit vibrations stability using the principal components method. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2021;1:41–48. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2021-1-4

Постановка задачи

Диагностика технического состояния гидроагрегата производится по результатам вибромониторинга. Стабильность функционирования гидроагрегата в значительной мере зависит от уровня его вибраций. Данные по вибрациям поступают на сервер сбора данных через стойку виброконтроля. Далее в режиме реального времени в виде дискретного сигнала они поступают на стойку управления гидроагрегатом, с помощью которой изменяется нагрузка (при слишком больших вибрациях) или происходит останов агрегата (если вибрации достигают критических значений)¹.

При вибромониторинге гидроагрегата контролировались десять показателей: вибрации нижнего генераторного подшипника верхнего бьефа и на правом берегу, соответствующие вибрации верхнего генераторного подшипника, бой вала гидротурбины и вала гидрогенератора, вибрации крышки гидротурбины. Выход вибраций за допустимые границы, как правило, свидетельствует о нарушении работоспособности гидроагрегата².

Для анализа стабильности вибраций могут быть использованы различные подходы. Возможно прогнозирование вибраций на заданный горизонт с использованием систем временных рядов [1–3]. Еще один метод – использование машинного обучения для бинарной классификации состояния агрегата по результатам обучающей выборки: стабилен он или не стабилен [4].

В настоящей работе для оценки стабильности гидроагрегата используется статистический контроль процессов [5–9]. Контрольные карты Шухарта для оценки стабильности среднего уровня и рассеяния процесса применяются для независимых показателей. Часть контролируемых показателей вибраций может быть независима от других, однако в общем случае между показателями имеют место значимые корреляционные связи. В такой ситуации применяются многомерные методы, в частности, для контроля стабильности среднего уровня процесса используют карты Хотеллинга. При необходимости контроля стабильности многомерного рассеяния используются карты обобщенной дисперсии: рассеяние контролируется через значения определителя ковариационной матрицы.

Статистическое управление процессом состоит в выявлении неслучайных нарушений; при этом управляющее воздействие применяется тогда, когда вибрации еще в пределах допуска, но некоторые статистические характеристики дают основание предполагать наличие неслучайной причины, которая приведет к увеличению уровня вибраций.

Карта Хотеллинга не всегда адекватно реагирует на возможные нарушения процесса: иногда ее реакция слишком замедленна, а иногда и вообще нарушение процесса проходит незамеченным. В настоящей статье показано, что выходом из этой ситуации может быть применение метода главных компонент с построением карт Шухарта.

Контроль стабильности вибраций с помощью карты Хотеллинга

Применение контрольной карты Хотеллинга для оценки стабильности вибраций предполагает расчет для каждой t -й мгновенной выборки ($t = 1, \dots, m$) статистики [10, 11]

$$T_t^2 = n(\bar{X}_t - \mu_0)^T S^{-1} (\bar{X}_t - \mu_0), \quad (1)$$

где n – объем мгновенной выборки (в данном исследовании принято $n = 5$, количество выборок $m = 20$); \bar{X}_t – вектор средних, $\bar{X}_t = (\bar{x}_{t1}, \bar{x}_{t2}, \dots, \bar{x}_{tp})^T$, \bar{x}_{tj} – среднее значение в t -й мгновенной выборке по j -му показателю ($j = 1, \dots, p$), в нашем случае количество контролируемых показателей $p = 10$; μ_0 – вектор целевых средних, $\mu_0 = (\mu_1 \dots \mu_p)^T$, где

¹ Стандарт организации НП «Инновации в электроэнергетике». Гидроэлектростанции. Методика оценки технического состояния основного оборудования. СТО 70238424.27.140.001-2011.

² Стандарт организации ОАО «РусГидро». Гидроагрегаты вертикальные. Методические указания по проверке и устранению дефектов центровки. СТО РусГидро 02.01.91-2013.

$$\mu_j = \frac{1}{mn} \sum_{t=1}^m \sum_{i=1}^n x_{ijt}, \quad (2)$$

x_{ijt} – результат i -го наблюдения за вибрациями по j -му показателю в выборке t .

Оценки компонент ковариационной матрицы размерности $p \times p$, определяющие рассеяние параметров и степень тесноты их связи, вычисляются по формуле

$$s_{jk} = \frac{1}{m(n-1)} \sum_{t=1}^m \sum_{i=1}^n (x_{ijt} - \mu_j)(x_{ikt} - \mu_k), \quad (3)$$

$j, k = 1, \dots, p$.

На рис. 1 показана карта Хотеллинга, построенная с использованием системы Statistica [12]. Видим, что процесс стабилен по среднему уровню: на карте нет точек, выходящих за контрольную границу 35,66.

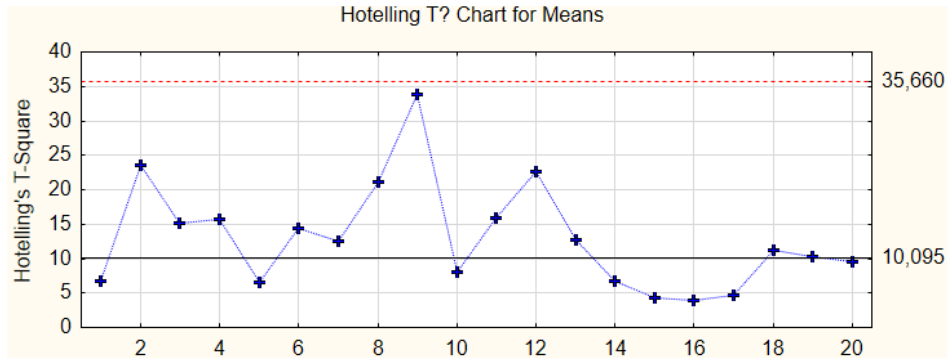


Рис. 1. Карта Хотеллинга по результатам вибромониторинга гидроагрегата

Заметим, что это значение (35,66) определяет границу доверительного интервала, поэтому выход за нее означает нарушение процесса с точки зрения статистики, но при этом выхода за допустимые пределы вибраций, как правило, нет: в этом состоит одно из основных преимуществ статистического контроля процессов – выход за допустимые пределы может быть своевременно предотвращен.

Моделирование нарушений процесса

Представляет интерес проследить, как карта Хотеллинга реагирует на возможные нарушения процесса. Наиболее распространенными нарушениями с точки зрения стабильности среднего уровня вибраций является скачкообразное или постепенное изменение среднего уровня (тренд). Скорость реакции карты на нарушение характеризуется с помощью средней длины серий – количества наблюдений от момента нарушения процесса до момента его обнаружения. При этом возможны нарушения как по одному из показателей вибраций, так и одновременно по нескольким.

Смоделируем скачкообразное нарушение процесса, например, по первому показателю, на одно стандартное отклонение. Значения числовых характеристик всех десяти показателей вибраций показаны на рис. 2 (количество наблюдений, среднее значение, минимум, максимум и стандартное отклонение). Ко всем значениям первого показателя, начиная, например, со второго наблюдения, прибавим по одному стандартному отклонению ($s_1 = 0,47$) и построим соответствующую карту Хотеллинга (рис. 3).

Variable	Valid N	Mean	Minimum	Maximum	Std.Dev.
Var1	100	3,89833	2,86667	5,30000	0,472193
Var2	100	3,76367	2,88333	5,20000	0,427396
Var3	100	4,32317	3,21667	5,65000	0,489450
Var4	100	4,40733	3,50000	5,75000	0,479655
Var5	100	16,15033	15,95000	16,41667	0,096632
Var6	100	17,95850	17,78333	18,08333	0,050391
Var7	100	16,11517	16,00000	16,45000	0,080511
Var8	100	15,98050	15,83333	16,08333	0,039643
Var9	100	2,91817	2,41667	3,91667	0,260213
Var10	100	2,81450	2,03333	4,96667	0,626311

Рис. 2. Числовые характеристики

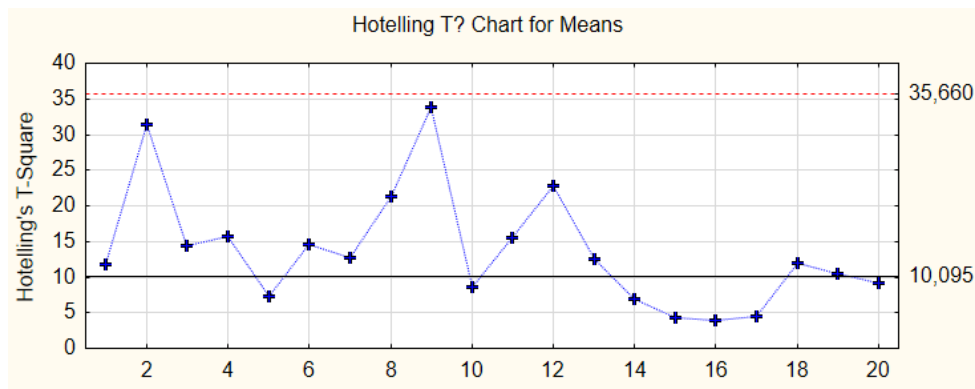


Рис. 3. Карта Хотеллинга после смещения среднего уровня процесса

Видим, что значения статистики Хотеллинга изменились, но нарушение процесса не выявлено: все точки на карте по-прежнему не выходят за контрольную границу. Это, конечно, не означает, что карта не реагирует на нарушения вообще. В этом можно убедиться, увеличив скачок среднего уровня на $1,5s_1$ или смоделировав нарушения по нескольким показателям одновременно.

В то же время проведенное моделирование тренда среднего уровня процесса, когда изменение уровня происходит не скачкообразно, а постепенно, показало, что выявляется он картой Хотеллинга с большим трудом: или при слишком большом тренде, или при тренде по множеству показателей одновременно.

Однако в конкретной ситуации нас может интересовать обнаружение именно такого нарушения, которое было задано в первом опыте: на одно стандартное отклонение по первому показателю. А карта проигнорировала это нарушение.

Можно предложить несколько вариантов для решения этой проблемы [13, 14]. Это использование:

1) карты Хотеллинга с учетом структур специального вида, свидетельствующих о нарушении процесса («неслучайное» расположение точек: несколько точек вблизи контрольной границы, резкие скачки между точками и др.);

2) карты с предупреждающей границей, когда попадание нескольких точек (обычно от двух до четырех) между предупреждающей и контрольной границами свидетельствует о нарушении процесса (расчет предупреждающей границы проводится с использованием аппарата марковских цепей);

3) карты многомерных экспоненциально взвешенных скользящих средних (используется экспоненциальное сглаживание);

4) карты многомерных кумулятивных сумм (значения статистики Хотеллинга накапливаются);

5) карты на главных компонентах.

Рассмотрим последний из перечисленных методов.

Переход к главным компонентам

В методе главных компонент результаты наблюдений за вибрациями X_j ($j = 1 \dots p$) преобразуются в главные компоненты F_j таким образом, чтобы главная компонента F_j представляла линейную комбинацию результатов наблюдений:

$$F = (X - \mu_0)V,$$

где μ_0 , как и ранее, – вектор средних; V – матрица преобразования.

При этом главные компоненты некоррелированы и упорядочены по величине дисперсии: первая главная компонента имеет максимальную дисперсию, последняя – минимальную.

Матрица V определяется решением оптимизационной задачи методом множителей Лагранжа. Каждый ее столбец представляет собой собственный вектор, соответствующий собственному числу λ_j (эти собственные числа являются дисперсиями главных компонент).

На рис. 4 показан график собственных чисел, построенный с использованием системы Statistica [12], называемый графиком каменистой осыпи, и иллюстрирующий вклад каждой из главных компонент: видно, что основную роль играют первые две главные компоненты.

Поскольку главные компоненты некоррелированы, для контроля стабильности вибраций вместо многомерных карт Хотеллинга можно использовать стандартные карты Шухарта [5, 13] по каждой главной компоненте отдельно. При этом часто достаточно рассмотреть карты только на тех главных компонентах, которые вносят основной вклад в процесс (в рассматриваемом примере – первые две компоненты).

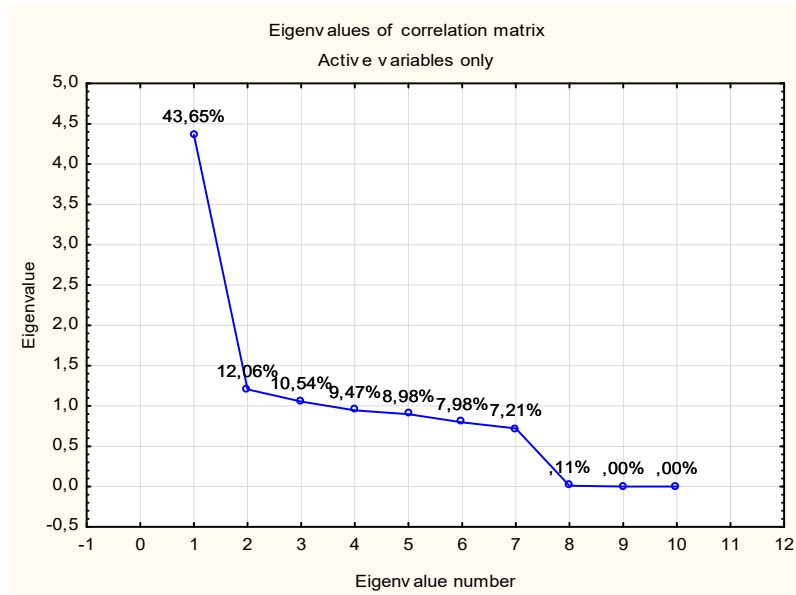


Рис. 4. График каменной осыпи (по вертикальной оси – значения собственных чисел)

На рис. 5 показаны карты Шухарта для средних значений и стандартных отклонений, построенные по первой главной компоненте. Видим, что карта средних обнаружила нарушение процесса в выборке 9 (выход точки за верхнюю контрольную границу, равную 1,25).

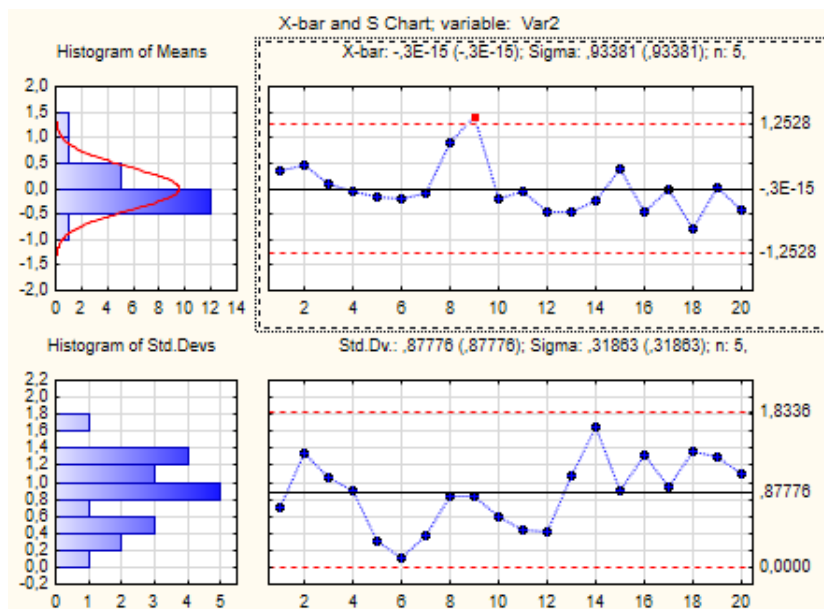


Рис. 5. Контрольные карты Шухарта

Напомним, что нарушение среднего уровня было смоделировано в выборке 2, т.е. длина серии в данном случае равна семи. На карте стандартных отклонений, характеризующей рассеяние процесса, нарушений нет: поскольку нарушения рассеяния не моделировались, этот результат вполне очевиден.

Таким образом, в отличие от карты Хотеллинга, карта Шухарта на главной компоненте не проигнорировала скачкообразное смещение среднего уровня процесса на заданную величину.

С другой стороны, обнаружение нарушения через семь выборок иногда может оказаться недопустимым и привести к аварийной ситуации: необходимы и более эффективные средства контроля.

Заключение

Для выявления нарушений в работе гидроагрегата, связанных с результатами вибромониторинга, предложено использовать контрольные карты на главных компонентах. Показано, что в ряде случаев эти карты оказываются эффективнее, чем карты Хотеллинга, обычно применяемые при многомерном статистическом контроле.

Это обстоятельство, конечно, не исключает использования карты Хотеллинга, которая во многих ситуациях показывает оперативное выявление нарушений процесса. Например, смещение по двум показателям одновременно было обнаружено картой Хотеллинга и не обнаружено картами на главных компонентах.

Задачи дальнейшего исследования можно сформулировать так. Необходимо провести статистические испытания для различных возможных нарушений процесса с тем, чтобы дать рекомендации о том, какими статистическими инструментами следует пользоваться в конкретной ситуации.

Критерием для принятия решения может служить средняя длина серий, оцененная по множеству смоделированных выборок. Проведенное исследование показало, что для разных типов нарушений целесообразно использовать различные подходы: контроль с применением обычной карты Хотеллинга или этой же карты с дополнительными возможностями (поиском структур специального вида или с предупреждающей границей), контроль на главных компонентах, использование экспоненциального сглаживания или других подходов.

Представляется целесообразной разработка информационной системы, которая по обучающей выборке результатов вибромониторинга для конкретного гидроагрегата с учетом особенностей его функционирования (т.е. оценки того, какие нарушения опасны именно для этого объекта) в автоматическом режиме обеспечивала бы проведение оперативного контроля стабильности вибраций, а также выдавала бы рекомендации по реагированию на диагностированные контрольными картами нестабильности процесса.

Список литературы

1. Юрков Н. К. Риски отказов сложных систем // Надежность и качество сложных систем. 2014. № 1. С. 18–24.
2. Герасимов О. Н., Доросинский А. Ю. Методика текущего предупредительного статистического контроля // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2017. Т. 1. С. 30–32.
3. Кувайскова Ю. Е., Клячкин В. Н. Статистические методы прогнозирования. Ульяновск : УлГТУ, 2019. 197 с.
4. Klyachkin V. N., Kuvayskova J. E., Zhukov D. A. Aggregated Classifiers for State Diagnostics of the Technical Object // International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon. IEEE. 2019.
5. Уиллер Д., Чамберс Д. Статистическое управление процессами ; пер. с англ. // Оптимизация бизнеса с использованием контрольных карт Шухарта. М. : Альпина Бизнес Букс, 2009. 409 с.
6. Montgomery D. C. Introduction to statistical quality control. New York : John Wiley and Sons, 2009. 754 p.
7. Клячкин В. Н. Модели и методы статистического контроля многопараметрического технологического процесса. М. : Физматлит, 2011. 196 с.
8. Bersimis S., Psarakis S., Panaretos J. Multivariate Statistical Process Control Charts: An Overview // Quality and reliability Engineering International. 2007. Vol. 23. P. 517–523.
9. Ryan T. P. Statistical methods for quality improvement. New York : John Wiley and Sons, 2011. 687 p.
10. Клячкин В. Н., Карпунина И. Н. Статистические методы оценки стабильности функционирования технических систем // Надежность и качество сложных систем. 2018. № 2. С. 36–42.
11. Клячкин В. Н., Кравцов Ю. А., Святова Т. И. Методы повышения эффективности многомерного статистического контроля // Научные технологии. 2013. Т. 14, № 5. С. 053–058.
12. Боровиков В. STATISTICA: искусство анализа данных. Для профессионалов. СПб. : Питер, 2001. 656 с.
13. Адлер Ю. П., Шпер В. Л. Практическое руководство по статистическому управлению процессами. М. : Альпина Паблишер, 2019. 234 с.
14. Клячкин В. Н., Святова Т. И. Статистический контроль технологического рассеяния в многопараметрическом процессе // Автоматизация и современные технологии. 2013. № 12. С. 22–25.

References

1. Yurkov N.K. Risks of complex system failures. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2014;1:18–24. (In Russ.)
2. Gerasimov O.N., Dorosinskiy A.Yu. Methodology of current preventive statistical control. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2017;1:30–32. (In Russ.)
3. Kuvayskova Yu.E., Klyachkin V.N. *Statisticheskie metody prognozirovaniya = Statistical forecasting methods*. Ulyanovsk: UIGTU, 2019:197. (In Russ.)
4. Klyachkin V.N., Kuvayskova J.E., Zhukov D.A. Aggregated Classifiers for State Diagnostics of the Technical Object. *International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon. IEEE*. 2019.
5. Uiller D., Chambers D. Statistical management of processes; trans. from English. *Optimizatsiya biznesa s ispol'zovaniem kontrol'nykh kart Shukharta = Business Optimization using Shewhart Control Cards*. Moscow: Al'pina Biznes Buks, 2009:409. (In Russ.)
6. Montgomery D.C. *Introduction to statistical quality control*. New York: John Wiley and Sons, 2009:754.
7. Klyachkin V.N. *Modeli i metody statisticheskogo kontrolya mnogoparametricheskogo tekhnologicheskogo protsessa = Models and methods of statistical control of a multiparametric technological process*. Moscow: Fizmatlit, 2011:196. (In Russ.)
8. Bersimis S., Psarakis S., Panaretos J. Multivariate Statistical Process Control Charts: An Overview. *Quality and reliability Engineering International*. 2007;23:517–523.
9. Ryan T.P. *Statistical methods for quality improvement*. New York: John Wiley and Sons, 2011:687.
10. Klyachkin V.N., Karpunina I.N. Statistical methods for assessing the stability of technical systems. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2018;2:36–42. (In Russ.)
11. Klyachkin V.N., Kravtsov Yu.A., Svyatova T.I. Methods for improving the effectiveness of multidimensional statistical control. *Naukoemkie tekhnologii = High-tech technologies*. 2013;14(5):053–058. (In Russ.)
12. Borovikov V. *STATISTICA: iskusstvo analiza dannykh. Dlya professionalov = STATISTICA: The Art of Data analysis. For professionals*. Saint-Petersburg: Piter, 2001:656. (In Russ.)
13. Adler Yu.P., Shper V.L. *Prakticheskoe rukovodstvo po statisticheskomu upravleniyu protsessami = Practical guide to Statistical Process Management*. Moscow: Al'pina Pablisher, 2019:234. (In Russ.)
14. Klyachkin V.N., Svyatova T.I. Statistical control of technological scattering in a multiparameter process. *Avtomatizatsiya i sovremennye tekhnologii = Automation and modern technologies*. 2013;12:22–25. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Владимир Николаевич Клячкин

доктор технических наук, профессор,
 профессор кафедры прикладной математики
 и информатики,
 Ульяновский государственный
 технический университет
 (Россия, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, 32)
 E-mail: v_kl@mail.ru

Vladimir N. Klyachkin

Doctor of technical sciences, professor,
 professor of sub-department of applied mathematics
 and informatics,
 Ulyanovsk State Technical University
 (32 Severny Venec street, Ulyanovsk, Russia)

Ирина Николаевна Карпунина

кандидат технических наук, доцент,
 доцент кафедры общепрофессиональных дисциплин,
 Ульяновский институт гражданской авиации
 (Россия, г. Ульяновск, ул. Можайского, 8/8)
 E-mail: karpunina53l@yandex.ru

Irina N. Karpunina

Candidate of technical sciences, associate professor,
 associate professor of sub-department
 of general professional disciplines,
 Ulyanovsk Institute of Civil Aviation
 (8/8 Mozhaiskiy street, Ulyanovsk, Russia)

ТЕСТИРОВАНИЕ БОЛЬШИХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ НА МАЛЫХ ВЫБОРКАХ

А. И. Иванов¹, И. А. Кубасов², А. М. Самокутяев³

¹ Пензенский научно-исследовательский электротехнический институт, Пенза, Россия

² Академия управления МВД России, Москва, Россия

³ Научно-исследовательский испытательный центр подготовки космонавтов имени Ю. А. Гагарина,
Московская обл., Звездный городок, Россия

¹ ivan@pnici.penza.ru, ² igorak@list.ru, ³ a.samo@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Исследованы проблемы тестирования нейронных сетей, применяемых в интересах повышения надежности и качества сложных технических систем. Выявлены условия, при которых возможно оперативное и корректное тестирование качества принимаемых решений большими нейронными сетями на малых выборках. *Материалы и методы.* Выполнена оценка вероятности ошибок первого рода (ошибочного отказа от признания образа «Свой») на основе тестирования без сокращения тестовой выборки. Показано, что для нейросетевых решений в форме бинарного кода оценка вероятности ошибок второго рода (ошибочное принятие образа «Чужой») может быть осуществлена при значительном сокращении объема тестовой выборки. *Результаты и выводы.* Выявлено логарифмическое снижение объема тестовой выборки при переходе от статистического анализа обычных кодов к статистическому анализу расстояний Хэмминга между кодом образа «Свой» и кодами образов «Чужой». Представлена математическая модель вычисления вероятностей ошибок второго рода доверенного нейросетевого приложения на малых выборках. Обоснована необходимость дальнейшей стандартизации доверенных приложений искусственного интеллекта, позволяющих повысить надежность и качество сложных технических систем.

Ключевые слова: искусственный интеллект, нейронные сети, доверенные нейросетевые приложения, объем тестовой выборки

Для цитирования: Иванов А. И., Кубасов И. А., Самокутяев А. М. Тестирование больших нейронных сетей на малых выборках // Надежность и качество сложных систем. 2021. № 1. С. 49–56. doi:10.21685/2307-4205-2021-1-5

TESTING LARGE NEURAL NETWORKS ON SMALL SAMPLES

A.I. Ivanov¹, I.A. Kubasov², A.M. Samokutyayev³

¹ Penza Research Electrotechnical Institute, Penza, Russia

² Academy of Management of the Ministry of Internal Affairs of Russia, Moscow, Russia

³ Yu. A. Gagarin Cosmonaut Training Research and Test Center, Moscow region, Star City, Russia

¹ ivan@pnici.penza.ru, ² igorak@list.ru, ³ a.samo@mail.ru

Abstract. *Background.* The paper investigated the problems of testing neural networks used to improve the reliability and quality of complex technical systems. The conditions under which rapid and correct testing of the quality of decisions made by large neural networks on small samples is possible have been revealed. *Materials and methods.* The probability of errors of the first kind (erroneous rejection of recognition of the "Own" image) was estimated based on testing without reducing the test sample. It has been shown that for neural network solutions in the form of a binary code, the probability of errors of the second kind (erroneous adoption of the "Alien" image) can be estimated with a significant reduction in the volume of the test sample. *Results and conclusions.* A logarithmic decrease in the volume of the test sample was revealed when moving from statistical analysis of ordinary codes to statistical analysis of Hamming distances between the image code "Own" and the image codes "Alien." The mathematical model of calculation of probabilities of errors of the second kind of trusted neural network application on small samples is presented. The need for further standardization of trusted applications of artificial intelligence is justified, allowing to increase the reliability and quality of complex technical systems.

Keywords: artificial intelligence, neural networks, trusted neural network applications, test sample size

For citation: Ivanov A.I., Kubasov I.A., Samokutyayev A.M. Testing large neural networks on small samples. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2021;1:49–56. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2021-1-5

Введение

В соответствии с Указом Президента РФ В. В. Путина № 480 от 10 октября 2019 г. «О развитии искусственного интеллекта в Российской Федерации» в период с 2020 по 2030 г. выделяются значительные материальные ресурсы на развитие этой технологической ветви. При этом к искусственному интеллекту, применяемому в интересах повышения надежности и качества сложных технических систем, должны предъявляться особые требования. По аналогии с вычислениями, выполняемыми в доверенной вычислительной среде, следует выделять и доверенный искусственный интеллект. Если приложение искусственного интеллекта создано в интересах повышения надежности и качества ведомственных сложных технических систем, то обучать и тестировать достигнутое качество принимаемых решений должны сотрудники данного ведомства. Это коренное отличие ведомственных доверенных приложений искусственного интеллекта.

Еще важнейшими характеристиками являются продолжительность обучения доверенного искусственного интеллекта и продолжительность его тестирования. Скорость обучения, как правило, связана с объемом обучающей выборки. Так, современные алгоритмы глубокого обучения сверточных нейронных сетей требуют миллионы образов, размеченных «вручную», и огромных затрат вычислительных ресурсов [1]. Дополнительно при тестировании сетей глубокого обучения также требуются огромные тестовые базы, сформированные уже без ручной разметки.

Читая зарубежную литературу по искусственному интеллекту, может создаться впечатление, что чем «умнее» и «многослойнее» сеть искусственных нейронов, тем сложнее ее обучение и тестирование. Это действительно было так для нейросетевых решений прошлого века. Глубокие нейронные сети и алгоритм их обучения придумал наш соотечественник А. И. Галушкин, а англичанин Джеффри Хинтон уже в 2006 г. слегка «доработал» обучение первых слов нейронных сетей.

Авторы данной статьи уверены в том, что нейросетевые решения прошлого века не совсем подходят для разработки нейросетевых доверенных вычислений. Для этой цели выгоднее применять архитектуру нейронных сетей, созданную в соответствии с требованиями пакета отечественных национальных стандартов ГОСТ Р 52633.xx-20xx. Причина такой уверенности проста: современные архитектуры нейронных сетей удается быстро и автоматически обучать, а также тестировать качество работы на малых выборках – всего 20 примеров. Следовательно, отпадает необходимость использования миллионов примеров, предварительно размеченных «вручную». Все инструменты управления нейросетевым искусственным интеллектом при использовании современных архитектур оказываются в руках владельца искусственного интеллекта. При этом формирование тестовой и обучающей выборки вполне по силам одному человеку-эксперту.

В данной статье исследованы условия, при которых возможно оперативное и корректное тестирование качества принимаемых решений доверенными нейронными сетями на малых выборках, и представлено математическое описание данной процедуры.

Оценка уровней доверия к человеку-эксперту и нейросетевым решениям искусственного интеллекта

В настоящее время экспертиза надежности и качества сложных технических систем строится, в основном, на выводах людей-экспертов. Доверие к результатам экспертизы опирается на ряд факторов, таких как: уровень образования эксперта, наличие у эксперта аппаратно-программных средств, опыт эксперта, доверие к методике проведения той или иной экспертизы. Люди-эксперты в силу своей природы не могут выполнять большие объемы работ в очень короткие сроки. Все эти проблемы могут быть ослаблены, если создать приложения искусственного интеллекта под решение той или иной конкретной задачи.

Заметим также, что человек-эксперт не может дать достоверную вероятностную оценку ошибок принятого им решения. В этом отношении приложения искусственного интеллекта оказываются в более выгодном положении. Каждое нейросетевое решение, обученное алгоритмом ГОСТ Р 52633.5¹, удается быстро и автоматически тестировать как на больших, так и на малых тестовых выборках.

Для примера рассмотрим частный случай проведения почерковедческой экспертизы. Для тестирования уровня доверия к решениям конкретного эксперта формально можно сформировать,

¹ ГОСТ Р 52633.5-2011. Защита информации. Техника защиты информации. Автоматическое обучение нейросетевых преобразователей биометрия-код доступа. М. : Стандартинформ, 2012.

например, 10 000 тестовых заданий, заранее зная верный результат. Однако на практике столкнемся с проблемой низкой производительности «ручного» сложного труда эксперта. Проведение «ручной» почерковедческой экспертизы нескольких слов записки или одного автографа под документом может занимать десятки часов рабочего времени эксперта, т.е. на выполнение этих заданий может потребоваться несколько лет работы квалифицированного эксперта, что нерационально.

Рациональный путь решения проблемы найден. Для использования в учебном процессе российских учебных заведений создан свободно распространяемый программный продукт «БиоНейро-Автограф» [2], который позволяет видеть 416 биометрических параметров динамики воспроизведения конкретного рукописного слова [3].

Классическое решение задач распознавания образов

Как показывают результаты исследования, стандартное отклонение большинства из 416 биометрических параметров оказывается примерно в три раза меньше, чем стандартное отклонение всех биометрических параметров всего словаря образов «Чужой». Эта ситуация отображена на рис. 1.

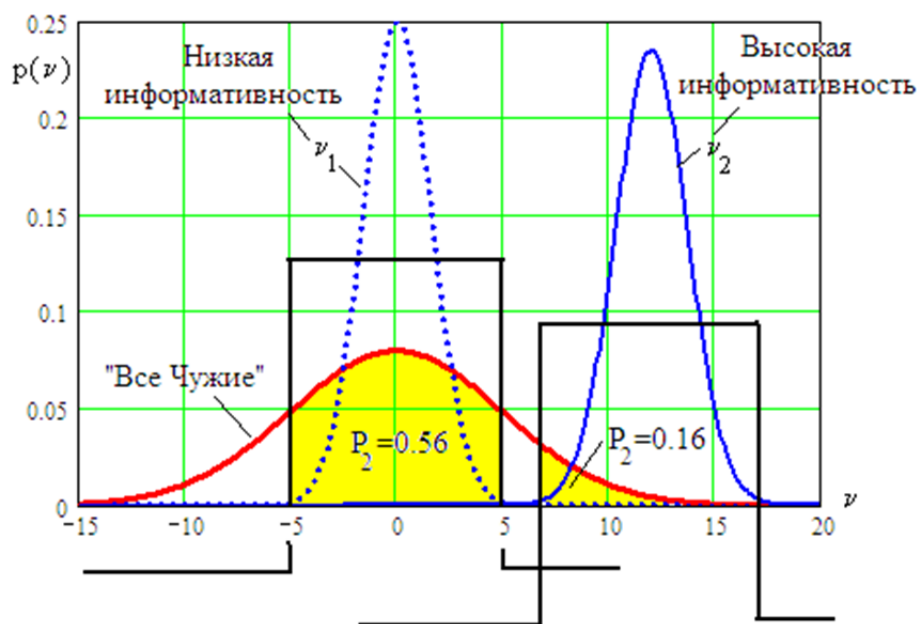


Рис. 1. Функции плотностей распределения значений двух биометрических параметров с низкой и высокой информативностью

Как видно из рис. 1, биометрические параметры могут быть выделены простым решающим правилом. Всегда можно вычислить математическое ожидание i -го биометрического параметра $E(v_i)$ и его стандартное отклонение $\sigma(v_i)$. Если гипотеза нормального распределения биометрических параметров верна, то интервал $\pm 3\sigma(v_i)$ вокруг математического ожидания должен покрывать состояния биометрического параметра с вероятностью 0,997, т.е. попадание 416 параметров образа «Все Чужие» в 416 их допустимые интервалы $\{E(v_i) \pm 3\sigma(v_i)\}$ с высокой вероятностью свидетельствует об обнаружении образа «Все Чужие» (вероятность ошибок второго рода $P_2 \approx 0,003$ для каждого биометрического параметра). При этом вероятность ошибок второго рода P_2 будет зависеть от положения математического ожидания биометрического параметра. Самая высокая вероятность ошибок второго рода будет наблюдаться у биометрических параметров с математическим ожиданием в центре распределения данных «Все Чужие». Чем больше математическое ожидание биометрического параметра удалено от центра данных «Все Чужие», тем меньше оказывается вероятность ошибки второго рода. Учитывая это, можно оценить информативность биометрических параметров, логарифмируя вероятности ошибок второго рода:

$$I(v_i) = -\log_2(P_2(v_i)), \quad (1)$$

где $I(v_i)$ – показатель информативности биометрического параметра v_i , вычисляемый как энтропия по Шеннону для алфавита из двух символов «0» и «1».

Из рис. 2 видно, что из 416 биометрических параметров 336 обладают низкой информативностью (менее одного бита), а только 80 биометрических параметров обладают приемлемой информативностью (более одного бита).

Если пользоваться парадигмой прошлого века, то следует отсеять бритвой Оккама¹ 336 биометрических параметров с низкой информативностью и работать только с 80 биометрическими параметрами приемлемой информативности. Эти 80 информативных биометрических параметров можно преобразовать в 80-битный криптографический ключ. Однако разряды такого ключа будут очень чувствительны к нестабильности примеров биометрического образа. По данным численного эксперимента, проведенного в среде моделирования «БиоНейроАвтограф» [2], каждый пример рукописного образа подписи будет давать примерно 16 % ошибок в разрядах 80-битного ключа.

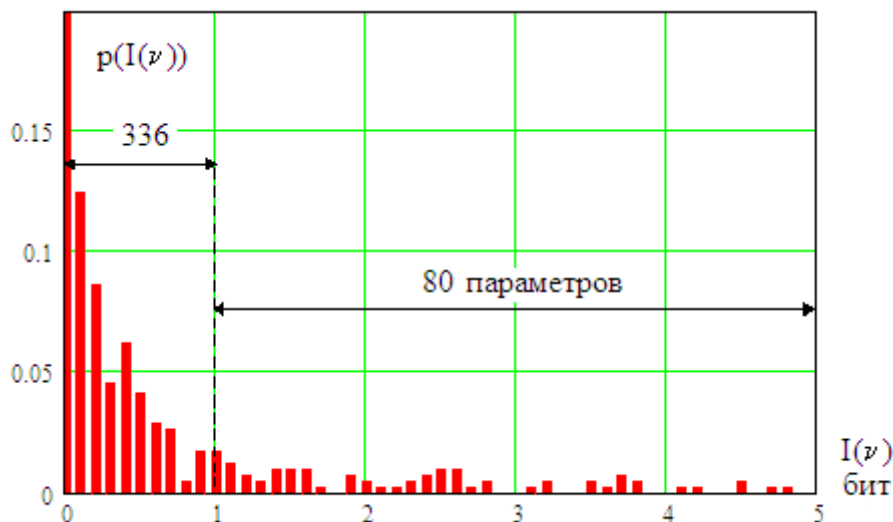


Рис. 2. Пример плотности распределения информативности 416 биометрических параметров динамики воспроизведения рукописного образа подписи

Обнаружить и исправить 16 % ошибок можно за счет применения кодов с 20-кратной избыточностью [4]. В итоге получим криптографический ключ длиной $80/20 = 4$ бита. Усечение криптографического ключа бритвой Оккама с 416 до 80 бит и последующее 20-кратное сжатие его длины до 4 бит представляет собой слабую технологию, так называемую «нечетких экстракторов» [5].

Следует заметить, что использование Россией технологии «нечетких экстракторов» будет означать неспособность защитить персональные биометрические данные своих граждан.

Отказ «нечетких экстракторов» в пользу применения отечественных сетей, состоящих из большого числа искусственных нейронов

Отечественные криптографические стандарты (на шифрование, проверку и формирование цифровой подписи) используют ключи длиной 256 бит (а не 4 бита). В связи с этим в среде моделирования «БиоНейроАвтограф» реализована сеть из 256 искусственных нейронов, каждый из которых обучен преобразовывать 24 входных биометрических параметров образа «Свой» в один бит криптографического ключа. Обучение нейросети выполняется автоматом, реализующим алгоритм ГОСТ Р 52633.5². Во время обучения вычисляются весовые коэффициенты сумматоров нейронов, осуществляющих обогащение «сырых» биометрических данных. Благодаря обучению на 20 приме-

¹ Уильям Оккам – средневековый английский монах-философ, сформулировавший принцип: «Не следует умножать число сущностей сверх необходимого». Этот принцип в XX в. использовался как базовый многочисленными сторонниками поиска малого числа наиболее информативных параметров и «отсечения» всех остальных, менее информативных параметров.

² ГОСТ Р 52633.5-2011. Защита информации. Техника защиты информации. Автоматическое обучение нейросетевых преобразователей биометрия-код доступа. М. : Стандартинформ, 2012.

рах образа «Свой» на выходах сумматоров каждого нейрона, информативность обогащенных данных значительно увеличивается.

Эффект нейросетевого «обогащения» биометрических данных позволяет получать верный 256-битный код криптографического ключа с вероятностью близкой к 0,95 ($P_1 \approx 0,05$) при обучении нейросети на 20 примерах образа «Свой». Чем больше примеров образа «Свой» использовано при обучении нейронной сети, тем ниже оказывается вероятность ошибок первого рода. В первом приближении можно считать связь вероятности ошибок первого рода обратно пропорциональной размеру обучающей выборки, если не выполнялось дополнительное тестирование на выборке, не участвовавшей в обучении.

Если есть возможность выполнить тестирование на ограниченной тестовой выборке примеров образа «Свой», то оценка вероятности ошибок первого рода вычисляется следующим образом:

$$\begin{cases} P_1 \approx \frac{n}{N} \text{ при } n \neq 0; \\ P_1 \approx \frac{1}{N+1} \text{ при } n = 0, \end{cases} \quad (2)$$

где n – число обнаруженных ошибок; N – объем тестовой выборки.

Вторая формула системы (2) построена исходя из предположения, что следующий опыт малой выборки может обнаружить одну ошибку. Для малых выборок такая гипотеза достаточно хорошо работает.

Оценка вероятности ошибок второго рода на больших тестовых выборках

Описанный выше отказ от процедур учета только малого числа наиболее информативных параметров и переход к нейросетевому статистическому анализу большинства контролируемых биометрических параметров позволяет получить выходной код длиной 265 бит.

Так, если создать базу из 100 миллионов уникальных образов подписей граждан РФ, обучить нейросеть на одном образе «Свой» и подавать на ее входы случайные образы, то будем получать случайные отклики нейросети в виде случайных выходных кодов. Обученная на образе «Свой» нейросеть будет выдавать один и тот же код, если подавать на ее входы примеры образа «Свой» из тестовой выборки, несмотря на наличие в них значительных вариаций. Нейросеть обучена учитывать естественные вариации биометрических параметров образа «Свой», представленные 20 примерами обучающей выборки. Далее при последующей эксплуатации обученная нейросеть выполняет функцию, обратную функции хэширования. Она почти устраняет влияние естественной нестабильности примеров рукописного образа «Свой». Для примеров образа «Чужой» нейросеть выполняет хэширование биометрических кодов, значительно усиливая естественную нестабильность непрерывных данных примеров образа «Чужой». Кроме того, выходной код нейросети всегда дискретен, т.е. должен иметь 2^{256} спектральных линий с очень малыми значениями амплитуды вероятности их появления.

Формально можно попытаться оценить вероятность ошибок второго рода обученной нейронной сети, подставляя поочередно на ее входы 10^8 (100 миллионов) образов «Все Чужие». Далее для оценок следует применить формулу, похожую на формулу (2):

$$\begin{cases} P_2 \approx \frac{n}{N} \text{ при } n \neq 0; \\ P_2 \approx \frac{1}{N+1} \text{ при } n = 0. \end{cases} \quad (2a)$$

К сожалению, этот методически понятный подход полного перебора большой базы тестовых образов «Чужой» с достаточно высокой вероятностью дает значительную ошибку. Ее появление обусловлено тем, что число выходных состояний нейросети – 2^{256} много больше, чем размер тестовой базы образов «Чужой» (создать тестовую базу из 2^{256} образов «Чужой» технически невозможно, да и в этом нет необходимости). При высокой стабильности и высокой уникальности автографов будем всегда сталкиваться с ситуацией отсутствия в большой тестовой базе данных, дающих точное повторение кода «Свой».

Оценка вероятности ошибок второго рода на малых тестовых выборках

Решить проблему тестирования на малых выборках удастся, воспользовавшись рекомендациями ГОСТ Р 52633.3¹. Этот национальный стандарт рекомендует отказаться от попыток статистического анализа длинных выходных кодов обученной нейросети. Для упрощения задачи необходимо перейти в пространство расстояний Хэмминга между кодом «Чужой» и кодом «Свой»:

$$h = \sum_{i=1}^{256} x_i \oplus c_i, \tag{3}$$

где \oplus – логическая операция сложения по модулю два; x_i – значение i -го разряда двоичного кода образа «Чужой»; c_i – значение i -го разряда двоичного кода образа «Свой».

Блок-схема тестирования на малых выборках приводится на рис. 3.

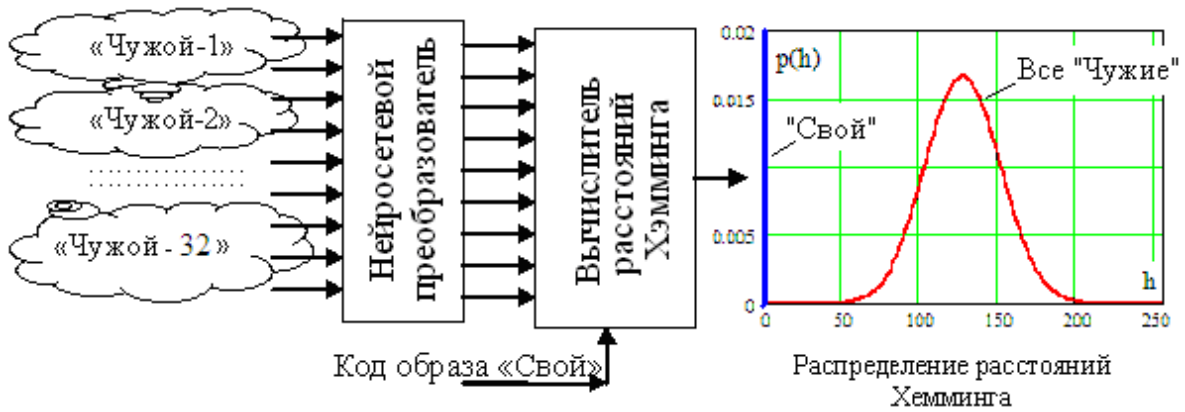


Рис. 3. Блок-схема тестирования на малых выборках в пространстве расстояний Хэмминга

Преимуществом перехода к расстояниям Хэмминга является то, что 2^{256} состояний выходных кодов сжимаются до 257 состояний: $h = \{0, 1, \dots, 256\}$. Кроме того, распределение расстояний Хэмминга нормализуется по основной теореме статистики из-за 256 кратного суммирования случайных величин при вычислении расстояний Хэмминга (3).

Опираясь на эти обстоятельства, национальный стандарт² рекомендует на малой выборке вычислить математическое ожидание расстояний Хэмминга – $E(h)$ и его стандартное отклонение $\sigma(h)$. Далее в рамках гипотезы нормального закона распределения следует выполнить следующие вычисления вероятности ошибок второго рода:

$$P_2 \approx \frac{1}{\sigma(h)\sqrt{2\pi}} \int_0^1 \exp\left\{-\frac{(E(h)-u)^2}{2(\sigma(h))^2}\right\} \cdot du. \tag{4}$$

В итоге имеем корректную математическую модель вычисления вероятностей ошибок второго рода доверенного нейросетевого приложения на малых выборках.

Заключение

Современные информационно-телекоммуникационные технологии развиваются стремительно. Уже сегодня возможна дистанционная надежная биометрическая аутентификация личности человека. Скорее всего, в базе данных уполномоченного органа должны будут храниться образы владельцев паспорта (лицо [1], голос [6], автограф [2, 3], рисунки отпечатков пальцев [7], рисунки радужной оболочки глаз [6]). Под каждую из биометрических технологий придется модифицировать и стандартизировать варианты сетей искусственных нейронов и разную предобработку данных для

¹ ГОСТ Р 52633.3-2011. Защита информации. Техника защиты информации. Тестирование стойкости средств высоконадежной биометрической защиты к атакам подбора. М. : Стандартинформ, 2012.

² Там же.

этих сетей. В этом отношении Россия сегодня является безусловным лидером, так как первой начала создавать национальные стандарты по автоматическому обучению¹ больших нейронных сетей и их автоматическому тестированию².

Эту работу по стандартизации необходимо активно продолжать в интересах развития доверенных приложений искусственного интеллекта, позволяющих повысить надежность и качество сложных технических систем. Наличие общедоступных отечественных стандартов должно породить конкуренцию на российском рынке, что в конечном итоге должно снизить стоимость продуктов искусственного интеллекта при качестве существенно выше мирового уровня.

Список литературы

1. Николенко С., Кадури А., Архангельская Е. Глубокое обучение. СПб. : Питер, 2018. 480 с. ISBN 978-5-496-02536-2.
2. Иванов А. И., Захаров О. С. Среда моделирования «БиоНейроАвтограф». Программный продукт создан лабораторией биометрических и нейросетевых технологий. 2009. URL: <http://пниэи.рф/activity/science/noc/bioneuroautograph.zip>
3. Иванов А. И. Автоматическое обучение больших искусственных нейронных сетей в биометрических приложениях : учеб. пособие. Пенза, 2013. 30 с. URL: http://пниэи.рф/activity/science/noc/tm_IvanovAI.pdf
4. Морелос-Сарагоса Р. Искусство помехоустойчивого кодирования. М. : Техносфера, 2007. 320 с.
5. Juels A., Wattenberg M. A Fuzzy Commitment Scheme // Proc. ACM Conf. Computer and Communications Security. Singapore, 1999. P. 28–36.
6. Болл Р., Коннел Д. Х., Панканти Ш. [и др.]. Руководство по биометрии. М. : Техносфера, 2007. 368 с.
7. Шапкин А. В., Кубасов И. А., Иванов А. И. Развитие отечественного нейросетевого искусственного интеллекта в защищенном исполнении // Вестник Воронежского института ФСИН России. 2019. № 4. С. 132–144.

References

1. Nikolenko S., Kadurin A., Arkhangel'skaya E. *Glubokoe obuchenie = Deep Learning*. Saint-Petersburg: Piter, 2018:480. (In Russ.). ISBN 978-5-496-02536-2.
2. Ivanov A.I., Zakharov O.S. *Sreda modelirovaniya «BioNeyroAvtograf»*. *Programmnyy produkt sozdan laboratoriei biometricheskikh i neyrosetevykh tekhnologiy = BioNeyroAvtograf modeling environment. The software product was created by the laboratory of Biometric and neural network technologies*. 2009. (In Russ.). Available at: <http://пниэи.рф/activity/science/noc/bioneuroautograph.zip>
3. Ivanov A.I. *Avtomaticheskoe obuchenie bol'shikh iskusstvennykh neyronnykh setey v biometricheskikh prilozheniyakh: ucheb. posobie = Automatic training of large artificial neural networks in biometric applications: tutorial*. Penza, 2013:30. (In Russ.). Available at: http://пниэи.рф/activity/science/noc/tm_IvanovAI.pdf
4. Morelos-Saragosa R. *Iskusstvo pomekhoustoychivogo kodirovaniya = The art of noise-proof coding*. Moscow: Tekhnosfera, 2007:320. (In Russ.)
5. Juels A., Wattenberg M. A Fuzzy Commitment Scheme. *Proc. ACM Conf. Computer and Communications Security*. Singapore, 1999:28–36.
6. Boll R., Konnel D.Kh., Pankanti Sh. [et al.]. *Rukovodstvo po biometrii = Biometrics Guide*. Moscow: Tekhnosfera, 2007:368. (In Russ.)
7. Shapkin A.V., Kubasov I.A., Ivanov A.I. Development of domestic neural network artificial intelligence in a secure version. *Vestnik Voronezhskogo instituta FSIN Rossii = Bulletin of the Voronezh Institute of the Federal Penitentiary Service of Russia*. 2019;4:132–144. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Александр Иванович Иванов

доктор технических наук, доцент, консультант,
Пензенский научно-исследовательский
электротехнический институт
(Россия, г. Пенза, ул. Советская, 9)
E-mail: ivan@пниэи.пенза.ру

Alexander I. Ivanov

Doctor of technical sciences, associate professor,
consultant,
Penza Research Electrotechnical Institute
(9 Sovetskaya street, Penza, Russia)

¹ ГОСТ Р 52633.5-2011. Защита информации. Техника защиты информации. Автоматическое обучение нейросетевых преобразователей биометрия-код доступа. М. : Стандартинформ, 2012.

² ГОСТ Р 52633.3-2011. Защита информации. Техника защиты информации. Тестирование стойкости средств высоконадежной биометрической защиты к атакам подбора. М. : Стандартинформ, 2012.

Игорь Анатольевич Кубасов

доктор технических наук, доцент,
главный научный сотрудник
ФКУ НПО «СТиС» МВД России,
профессор кафедры информационных технологий,
Академия управления МВД России
(Россия, г. Москва, ул. Зои и Александра
Космодемьянских, 8)
E-mail: igorak@list.ru

Александр Михайлович Самокутяев

командир отряда,
Научно-исследовательский испытательный центр
подготовки космонавтов имени Ю. А. Гагарина
(Россия, Московская обл., Звездный городок)
E-mail: a.samo@mail.ru

Igor A. Kubasov

Doctor of technical sciences, associate professor,
chief researcher of the FKU NPO "STIS"
of the Ministry of Internal Affairs of Russia,
professor of sub-department of information technologies,
Academy of management of the Ministry
of internal affairs of the Russian Federation
(8 Zoi i Aleksandra Kosmodem'yanskikh street,
Moscow, Russia)

Alexander M. Samokutyaev

Commander,
Yu. A. Gagarin Cosmonaut Research Testing Center
(Star city, Moscow region, Russia)

К ПРОБЛЕМЕ ВЫБОРА МЕТОДА ОЦЕНКИ ДРЕЙФОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОЛНОВЫХ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ ГИРОСКОПОВ GE 006 НА ОСНОВЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ПОДТВЕРЖДЕНИЯ

**А. С. Новоселов¹, С. А. Москалев², А. А. Папко³,
А. В. Поспелов⁴, Н. В. Недопекин⁵, О. Н. Лузгина⁶**

^{1,2,3,4,5,6} Научно-исследовательский институт физических измерений, Пенза, Россия
^{1,3} info@niifi.ru, ² moskalev_sa@niifi.ru, ^{4,5,6} inercial@niifi.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Опыт исследования и разработки волновых твердотельных гироскопов (ВТГ) в РФ в сравнении с аналогичным зарубежным опытом не отличается многообразием приемов, среди которых основное место занимает решение проблем механической балансировки резонаторов, зарекомендовавшей себя непроводительной и непредсказуемой процедурой. Наряду с этим известным фактом является то, что современный ВТГ управляется четырьмя системами автоматического управления энергией колебаний, компенсации угловой скорости, квадратуры и фазы. Обобщенным критерием оценки требуемого качества работы указанных систем является достижение установленных значений дрейфовых характеристик ВТГ. Как правило, в технических заданиях на их разработку устанавливаются требуемые значения случайного блуждания нуля σ_{ARW} [°/√ч] и стабильности нуля b [°/ч] без привязки к методам оценки, несмотря на то, что σ_{ARW} и b входят только в номенклатуру параметров, оцениваемых по вариациям Аллана. *Материалы и методы.* Метод вариаций Аллана признается его разработчиком [1] альтернативой известным методам классического дисперсионного анализа, имеющим определенные ограничения при оценке дрейфов. Наряду с этим при выходе ВТГ GE 006 на рынок пришлось столкнуться со скептическим отношением потребителя к методу Аллана без уточнения каких-либо веских причин подобного недоверия. *Результаты и выводы.* По этой причине обосновывается выбор метода оценки дрейфовых характеристик ВТГ GE 006 на примерах всестороннего анализа выборок, полученных в длинных и коротких запусках с использованием двух моделей дрейфа – вариации Аллана и классического дисперсионного анализа.

Ключевые слова: волновой твердотельный гироскоп, метод вариаций Аллана, нестационарный процесс, шумы, спектры, случайное блуждание нуля, смещения нуля

Для цитирования: Новоселов А. С., Москалев С. А., Папко А. А., Поспелов А. В., Недопекин Н. В., Лузгина О. Н. К проблеме выбора метода оценки дрейфовых характеристик волновых твердотельных гироскопов GE 006 на основе экспериментального подтверждения // Надежность и качество сложных систем. 2021. № 1. С. 57–65. doi:10.21685/2307-4205-2021-1-6

ON THE PROBLEM OF CHOOSING A METHOD FOR ESTIMATING THE DRIFT CHARACTERISTICS OF WAVE SOLID-STATE GYROSCOPES GE 006 BASED ON EXPERIMENTAL CONFIRMATION

**A.S. Novoselov¹, S.A. Moskalev², A.A. Papko³,
A.V. Pospelov⁴, N.V. Nedopekin⁵, O.N. Luzgina⁶**

^{1,2,3,4,5,6} Research Institute of Physical Measurements, Penza, Russia
^{1,3} info@niifi.ru, ² moskalev_sa@niifi.ru, ^{4,5,6} inercial@niifi.ru

Abstract. *Background.* The experience of research and development of wave solid-state gyroscopes (WGG) in the Russian Federation in comparison with similar foreign experience does not differ in a variety of techniques, among which the main place is occupied by the solution of the problems of mechanical balancing of resonators, which has proven to be an unproductive and unpredictable procedure. Along with this, it is a well-known fact that the modern

HHG is controlled by four systems of automatic control of vibration energy, compensation of angular velocity, quadrature and phase. A generalized criterion for assessing the required quality of operation of these systems is the achievement of the established values of the drift characteristics of the HTG. As a rule, the terms of reference for their development set the required values of the random walk of zero σ_{ARW} [$^{\circ} / \sqrt{h}$] and zero stability b [$^{\circ} / h$] without reference to estimation methods, despite the fact that σ_{ARW} and b are included only in the nomenclature parameters estimated by Allan variations. *Materials and methods.* The Allan variation method is recognized by its developer [1] as an alternative to the well-known methods of classical analysis of variance, which have certain limitations in assessing drifts. Along with this, when VTG GE 006 entered the market, it was necessary to face the skeptical attitude of the consumer towards the Allan method without specifying any compelling reasons for such distrust. *Results and conclusions.* For this reason, the purpose of this article is to justify the choice of the method for assessing the drift characteristics of the HTG GE 006 using examples of a comprehensive analysis of samples obtained in long and short runs using two drift models – Allan variation and classical analysis of variance.

Keywords: wave solid-state gyroscope, Allan variation method, non-stationary process, noise, spectra, random walk of zero, zero offsets

For citation: Novoselov A.S., Moskalev S.A., Papko A.A., Pospelov A.V., Nedopekin N.V., Luzgina O.N. On the problem of choosing a method for estimating the drift characteristics of wave solid-state gyroscopes GE 006 based on experimental confirmation. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2021;1:57–65. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2021-1-6

Введение

Волновыми твердотельными гироскопами (ВТГ) называются устройства для измерения углов поворота и угловой скорости, реализованные на взаимодействии эффектов Брайана и Кориолиса, в результате которого в кромке осесимметричного резонатора формируется стоячая волна деформаций, пространственное положение которой относительно заданной системы координат пропорционально измеряемому параметрам.

Рабочие волновые процессы в резонаторе ВТГ, представляющем собой цилиндрическую или полусферическую оболочку из металла, кварца, пьезокерамики и т.д., формируются суперпозицией двух независимых модальных колебаний – первичной моды (возбуждения) и вторичной моды (измерения) вдоль осей жесткости резонатора. Для реализации процесса измерения угла и угловой скорости в резонаторе ВТГ генерируется стоячая волна на частоте, близкой или равной одной из множества мод, чаще всего второй с не менее, чем двумя каналами управления и двумя измерительными каналами так, что пучность стоячей волны расположена рядом с электродом одного из каналов управления, а вращение резонатора вокруг оси симметрии формирует силу Кориолиса, под действием которой пространственное положение стоячей волны изменяется относительно электродов возбуждения пропорционально угловой скорости вращения Ω .

Наличие разночастотности и разнодобротности колебаний резонатора по ортогональным осям приводит к ухудшению дрейфовых характеристик и в этой связи делает актуальными не только решение проблем их улучшения, но и повышение достоверности их оценок.

Классификация и методы оценки ошибок гироскопов

Традиционно ошибки инерциальных компонентов – акселерометров и гироскопов – делятся на детерминированные и случайные. Для обеспечения требуемой точности гироскопа и последующих навигационных решений значимым является понимание стохастической природы этих ошибок.

Способы определения и компенсации детерминированных ошибок гироскопов хорошо исследованы и широко применяются в процессах изготовления.

Случайные шумы гироскопа представляют собой смесь разных шумов. Для понимания способов уменьшения их влияния рассмотрим особенности их проявления и модели описания, позволяющие сформулировать их идентификационные признаки.

В зависимости от методов обработки выходных сигналов гироскопа процесс идентификации шумов имеет различные результаты.

Наиболее распространенными методами оценки шумовых характеристик гироскопов являются:

– классический дисперсионный анализ, который распространяется на получение оценок шумов стационарных случайных процессов. При этом основными оценочными параметрами являются математическое ожидание (МО) и среднеквадратическое отклонение (СКО), определенные по вы-

борке, содержащей N результатов измерений. При эксплуатации инерциальных компонентов отдается предпочтение оценкам дрейфовых характеристик, полученных методом статистического анализа. Ниже будет показано, что полученные при этом результаты являются недостоверными [2].

Для оценки шумовых компонент нестационарных случайных процессов используются два метода: метод оценки спектральной плотности мощности (*PSD*, *Power Spectral Density*) и метод вариаций Аллана (*VA*).

Значимость использования этой пары методов подтверждается целями известной программы *AlaVar* 5.2, предусматривающей сочетание оценок *PSD* и метода Аллана.

Спектральная плотность мощности *PSD* описывает распределение мощности сигнала в зависимости от частоты или мощность, приходящуюся на интервал частот, границы которого различаются на 1 Гц [Дж/Гц].

Связь между *VA* и *PSD* определяется выражением

$$\sigma^2(\tau) = 4 \int_0^{\infty} S_{\Omega}(f) \frac{\sin^4 \pi f \tau}{(\pi f \tau)^2} df, \quad (1)$$

где $S_{\Omega}(f)$ – *PSD* случайного процесса $\Omega(\tau)$.

Согласно этому уравнению дисперсия Аллана пропорциональна общей выходной мощности случайных процессов при пропускании через фильтр с передаточной функцией вида $\sin^4(x)/(x)^2$. Уравнение (1) является центральным элементом метода вариаций Аллана и используется для вычисления его дисперсии из *PSD*. При этом модель *PSD* любого физического процесса, подставленного в формулу (1), позволяет получить для него выражение для дисперсии Аллана $\sigma^2(\tau)$ как функции длины периода усреднения, так как значение $\sigma^2(\tau)$ является фактически измеряемой величиной, полученная кривая Аллана позволяет идентифицировать случайные процессы, существующие в виде смеси в выходных информационных потоках каждого датчика.

При этом из-за отсутствия взаимно однозначных соотношений между $\sigma^2(\tau)$ и *PSD* вычислить спектральную плотность из анализа $\sigma^2(\tau)$ не представляется возможным, так же, как и оценить по *PSD* количественные характеристики шумовых процессов.

Так как полоса пропускания фильтра $\sin^4(x)/(x)^2$ зависит от времени, путем его измерения можно исследовать различные типы случайных процессов. Именно по этой причине дисперсия Аллана представляет собой эффективное средство идентификации и количественной оценки шумовых составляющих, присутствующих в информационных потоках гироскопов в виде смеси.

Для сравнения реальных возможностей интерпретации результатов записи информационных массивов ВТГ ГЕ 006 ниже представлены:

- оценка эффективности использования вариаций Аллана для идентификации шумов с целью определения гипотетических причин их возникновения и разработки алгоритмов фильтрации отдельных составляющих;

- оценка возможностей использования результатов дисперсионного анализа в качестве квалификационного критерия качества образцов гироскопов.

Для обеспечения качественных и количественных оценок шумов рассмотрим более подробно особенности использования программы *AlaVar* 5.2 применительно к полученным экспериментальным данным.

В первую очередь необходимо отметить, что указанные процессы содержат высокочастотные и низкочастотные составляющие.

Высокочастотные составляющие описываются характеристиками белого шума, а низкочастотные представляют собой коррелированные шумы.

Для фильтрации высокочастотного шума в бесплатформенной инерционной навигационной системе (БИНС) или на выходе датчика используются фильтры нижних частот, или вейвлет-шумоподавление.

Коррелированные шумы можно смоделировать с достаточно высокой точностью с использованием метода Аллана в виде представления среднеквадратичной случайной ошибки дрейфа как функции времени осреднения. Отличительной особенностью метода являются возможности идентификации шести видов шумов:

1) шума квантования, характеризующего степень отличия цифровых данных от первичных аналоговых. Физической причиной возникновения подобного шума могут являться округление результата или отбрасывание младших разрядов;

2) основной шумовой компонент гироскопов – случайное блуждание нуля (σ_{ARW}), представляет собой аддитивный белый шум, проявляющийся в случайном отклонении от ожидаемых значений. Параметр σ_{ARW} влияет на результат интегрирования, который равен нулю при стационарном процессе. Под воздействием белого шума результаты измерений колеблются случайным образом, а среднее отклонение изменяется с увеличением времени. Для гироскопов σ_{ARW} имеет единицу измерения $^{\circ}/\sqrt{ч}$ и характеризует дрейф, ограниченный уровнем белого шума. На кривой Аллана σ_{ARW} определяется в точке ее пересечения с интервалом времени 1 с.

Процесс накопления среднеквадратического отклонения угла характеризуется отклонением

$$\sigma_0(t) = \sigma_{ARW} \sqrt{T_0 t}, \quad (2)$$

где T_0 – период дискретизации; t – интервал интегрирования;

3) нестабильность нуля b вызывается релаксационными шумами в конструкциях и электронных компонентах, которую связывают с фликкер-шумом, спектральная мощность которого обратно пропорциональна частоте. При этом предполагается также, что фликкер-шум представляет собой суперпозицию нескольких таких процессов [3], распространяясь на несколько частичных декад. Фликкер-шум оказывает значительное влияние на низких частотах, с увеличением частоты их интенсивность падает. При этом график мощности шума в логарифмическом масштабе медленно убывает, а на высоких частотах перекрывается белым шумом. Фликкер-шум относится к нестационарным случайным процессам. Общей теории для описания фликкер-шума до настоящего времени не существует, что привело к объяснению подхода, обоснованного на детальном интегрировании спектра белого шума с передаточной функцией (ПФ) $1/\sqrt{p}$, хотя фактически показатель степени знаменателя ПФ не может изменяться от 0,5 до 1,5 [3]. Нестабильность нуля определяется по кривой Аллана на участке с нулевым наклоном, соответствующим минимальному значению угловой скорости на кривой;

4) случайное блуждание угловой скорости σ_{RRW} является винеровским случайным процессом, который формируется интегрированием белого шума с передаточной функцией $1/p$. Спектральная плотность случайного блуждания скорости обратно пропорциональна квадрату частоты. На кривой Аллана дрейф σ_{RRW} определяется по участку с наклоном +0,5. СКО случайного блуждания скорости накапливается со временем в соответствии с соотношением

$$\sigma_{RRW}(t) = \sigma_{WN} \sqrt{T_0 t}, \quad (3)$$

где σ_{WN} – СКО порождающего белого шума.

Указанный вид шума реально измеряется гироскопом и относится к шумам неизвестной природы с очень большим временем корреляции. При этом результаты его определения зависят от изменений внешних влияющих факторов, главным образом температуры. Оценочным значением σ_{RRW} считают значение, определенное на прямой с наклоном +0,5, в интервале равном 3 с;

5) экспоненциально-коррелированный марковский шум с корреляцией $K_M(\tau)$ вида

$$K_M(\tau) = D_M e^{-|\tau|}, \quad (4)$$

где D_M – дисперсия шума [$\text{град}^2/\text{с}^2$]; μ – коэффициент затухания функции $K_M(\tau)$ [с^{-1}], связанный со временем корреляции соотношением $T_M = 1/\mu$.

На кривой Аллана марковский шум определяется по локальному минимуму, ограниченному слева и справа асимптотами +0,5 и -0,5 (показан на рис. 1). Указанное отличие является важным признаком идентификации марковского шума;

б) для кориолисовых гироскопов важным является также идентификация синусоидального шума, порождаемого колебаниями кромки резонатора на резонансной частоте, зашумляющего выходной сигнал ВТГ псевдодетерминированной синусоидальной компонентой.

При частоте шума, близкой к частоте дискретизации, синусоидальный шум практически незаметен на кривой Аллана, так как теряется на фоне белого шума.

Суммарная дрейфовая составляющая с учетом значимости влияния отдельных компонент определяется в соответствии с рекомендациями [1, 4].

Анализ результатов экспериментальных исследований

1. Объектом исследования является образец ВТГ GE 006 зав. № 040008, разработки и производства АО «НИИФИ».

2. Объем исследований – записи выходных сигналов ВТГ в четырех длинных запусках длительностью 3; 2; 2 и 19 ч, а также в пяти коротких запусках длительностью 5 мин каждый. Длительность перерыва между запусками 10 мин. Накопление информационного массива проводилось в течение времени каждого запуска.

3. Обработка полученных результатов проводилась по программе AlaVar 5.2 с использованием массива Data Values и вычислением параметров PDS и ADEV и представлена в табл. 1 и на рис. 1.

Таблица 1

Результаты оценки случайного блуждания нуля σ_{ARW} и нестабильности нуля b в длинных и коротких запусках по вариациям Аллана

Время непрерывной работы и номер запуска	Время перерыва, мин	Результаты оценки	
		$\sigma_{ARW}, \text{ } \circ/\sqrt{\text{ч}}$	$b, \text{ } \circ/\text{ч}$
Длинные запуски			
3 ч, запуск 1	10	0,0015	0,018
2 ч, запуск 2	10	0,0006	0,018
2 ч, запуск 3	10	0,00072	0,018
Короткие запуски – 5 мин работы, 10 мин перерыва			
запуск 4	–	0,0006	0,020
запуск 5	–	0,001	0,025
запуск 6	–	0,001	0,025
запуск 7	–	0,001	0,025
запуск 8	–	0,002	0,018

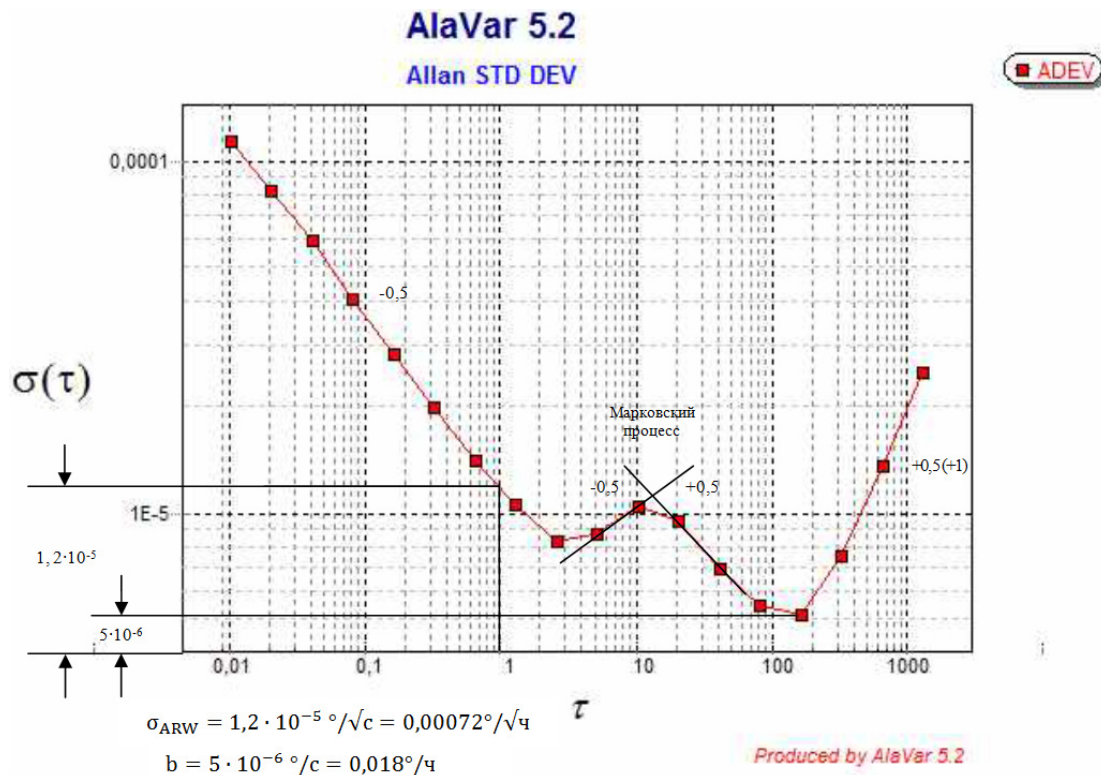


Рис. 1. График вариаций Аллана до фильтрации информационных массивов гироскопов

Представленная в табл. 1 и на рис. 1 информация интерпретируется следующим образом.

На кривой Аллана отчетливо выделяются участки с наклоном $-0,5$ (σ_{ARW}), наклоном 0 (b), марковкий шум в виде пересечения двух линий с наклоном $+0,5$ и $-0,5$, а также участок с наклоном от $+0,5$ до 1 (σ_{RRW}). Синусоидальный шум не идентифицирован при всех временах запуска.

Полученные результаты оценки σ_{ARW} и b (см. табл. 1) соответствуют высоким требованиям к характеристикам разработанного ВТГ ГЕ 006.

Обращает на себя внимание некоторое несоответствие σ_{ARW} и b , что можно объяснить зашумлением $1/f$ -процесса белыми и марковскими процессами.

Результаты оценки дрейфов выходного сигнала с использованием классического дисперсионного анализа с временем осреднения, равным длительности запуска, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Оценка дрейфа выходного сигнала

Длительность запуска	МО, %с	СКО, %с
3 ч	-9,8140E-05	1,83582E-04
2 ч	-6,83214E-05	1,34611E-04
2 ч	-8,55897E-05	1,52900E-04
19 ч	-17,7447E-05	1,33411E-04
5 мин	1,56834E-05	1,23245E-04
5 мин	2,74534E-05	1,21902E-04
5 мин	3,87935E-05	1,24222E-04
5 мин	6,17966E-05	1,25322E-04
5 мин	6,58038E-05	1,23295E-04

Анализ данных, приведенных в табл. 2, позволяет сделать следующие выводы:

- полученные значения математического ожидания (МО) зависят от объемов выборок;
- среднеквадратические отклонения в запуске превышают значения МО примерно вдвое и менее зависимы от объемов выборок.

Ситуацию можно объяснить тем, что указанным методом оценивается вся совокупность шумов – от белого до всех степенных.

Вследствие этого приведенные в табл. 2 оценки не могут быть отнесены к разряду стандартных статистических моделей.

При этом полезно сослаться на группу авторов работы [2], утверждающих, что «стандартными методами статистического анализа невозможно получить никакую оценку шумовых компонент, т.е. данные методы в данном случае совершенно бесполезны».

Различие между оценкой смещения нуля b и математического ожидания (МО), определенного статистической обработкой, достигает порядка. Основанием для возможности их сравнения послужил вывод, приведенный в работе [3], о том, «что $1/f$ -процесс может выглядеть как детерминированный процесс с добавлением белого шума и имитировать инструментальный дрейф с изменяющимся во времени средним».

Это же заключение приводит к важному выводу о необходимости приведения структуры зашумленных детерминированных процессов в реальных образцах гироскопов к детерминированным.

Применение для этой цели адаптивной фильтрации выходного сигнала в образце ГЕ 006 зав. № 040008 улучшило оценочные параметры табл. 2 не менее, чем на порядок для МО, и более, чем на 2 порядка для СКО, обеспечив тем самым сходимость оценок между ними, а также сходимость между МО и b .

Запись вариации Аллана для фильтрованного массива представлена на рис. 2.

Сравнение кривых по рис. 1, 2 подтверждает ожидаемое изменение структуры шумов после фильтрации в виде:

- уменьшения марковских шумов;
- уменьшения наклона участка σ_{RRW} с $+2$ до $+1$;
- увеличения значений σ_{ARW} вдвое, а b – в 1,3 раза.

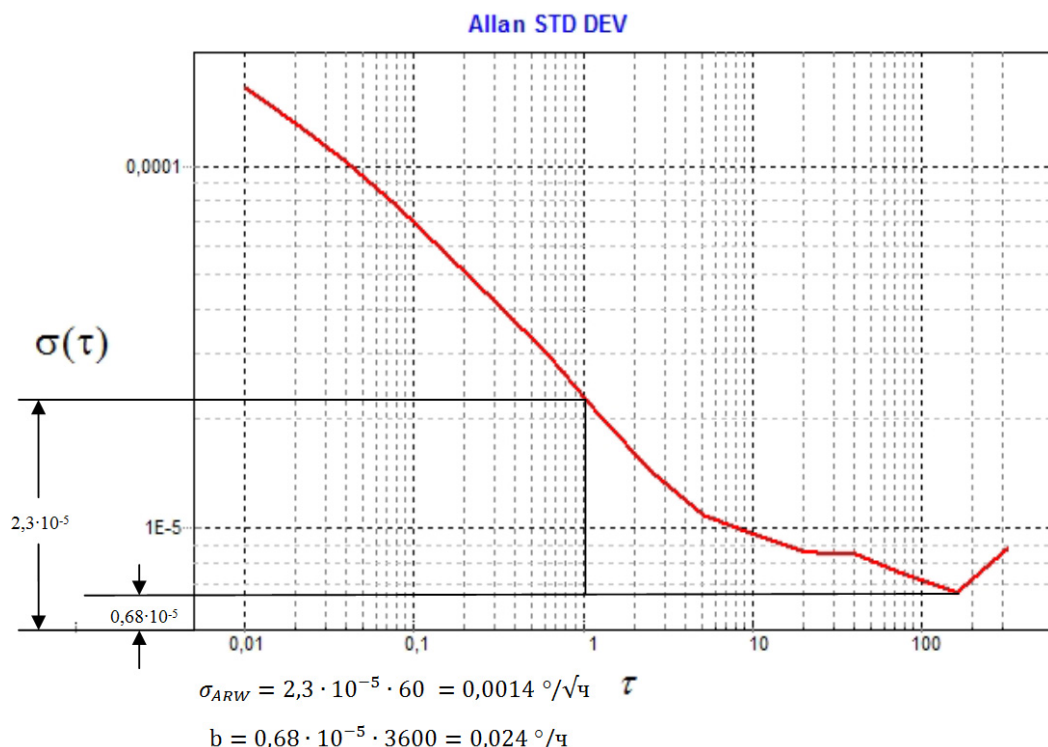


Рис. 2. График вариации Аллана после адаптивной фильтрации информационных массивов гироскопа

Заключение

1. В результате исследований информационных массивов ВТГ ГЕ 006 определено, что их шумовая идентификация соответствует методу вариаций Аллана и позволяет использовать его в качестве основного метода оценки дрейфовых характеристик ВТГ.

2. Статистическая обработка полученных информационных массивов отличается зависимостью математического ожидания от объемов выборки при относительно небольшом разбросе среднеквадратических значений и значительным отличием полученных числовых значений МО от смещения нуля b по Аллану.

Констатации этого факта недостаточно в связи с тем, что независимо от полученных результатов, статистические методы оценивают реальные массивы, поступающие на дальнейшую обработку в БИНС.

При этом причины получения оценок, не соответствующих ожидаемым, следует искать не в особенностях дисперсионного анализа, а в структуре самого процесса и возможностях его физического разделения на дрейфовую и детерминированную составляющие с последующим исключением детерминированной.

В этой связи, а также учитывая результаты предварительных оценок, актуальным можно считать дальнейшие исследования возможностей встроенной адаптивной фильтрации информационных массивов и влияние на структуру шумов и результаты оценок случайных и детерминированных составляющих.

3. Можно считать эффективным совместное использование методов вариаций Аллана и классического дисперсионного анализа для выявления и исключения тех или иных источников дрейфа выходного сигнала гироскопа.

Список литературы

1. Аллан Д. У. Вариации Аллана: история создания, преимущества и недостатки, основные области применения // Гироскопия и навигация. 2015. № 4. С. 3–28.
2. Литвин М. Н., Малюгина А. А., Миллер А. Б. [и др.]. Типы ошибок в инерциальных навигационных системах и методы их аппроксимации // Информационные процессы. 2014. Т. 14, № 4. С. 326–339.

3. Miloti E. 1/f noise: a pedagogical review. Universita di Udine and I.N.F.N., Italy, 2002.
4. Сирая Т. Н. Статистическая интерпретация вариации Аллана как характеристики измерительных и навигационных устройств // Гироскопия и навигация. 2020. Т. 28, № 1. С. 3–18. doi: 10.17285/0869-7035.0027

References

1. Allan D.U. Allan's variations: history of creation, advantages and disadvantages, main areas of application. *Гироскопия и навигация* = *Gyroscopy and navigation*. 2015;4:3–28. (In Russ.)
2. Litvin M.N., Malyugina A.A., Miller A.B. [et al.]. Types of errors in inertial navigation systems and methods of their approximation. *Информационные процессы* = *Information processes*. 2014;14(4):326–339. (In Russ.)
3. Miloti E. 1/f noise: a pedagogical review. Universita di Udine and I.N.F.N., Italy, 2002.
4. Siraya T.N. Statistical interpretation of the Allan variation as a characteristic of measurement and navigation devices. *Гироскопия и навигация* = *Gyroscopy and navigation*. 2020;28(1):3–18. (In Russ.). doi: 10.17285/0869-7035.0027

Информация об авторах / Information about the authors

Алексей Сергеевич Новоселов

генеральный директор,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: info@niifi.ru

Сергей Александрович Москалев

кандидат технических наук,
заместитель генерального директора по развитию,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: moskalev_sa@niifi.ru

Антонина Алексеевна Папко

доктор технических наук,
главный научный сотрудник,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: info@niifi.ru

Алексей Владимирович Поспелов

главный специалист,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: inercial@niifi.ru

Никита Вячеславович Недопекин

начальник отдела,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: inercial@niifi.ru

Alexey S. Novoselov

General director,
Research Institute physical measurements
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

Sergey A. Moskalev

Candidate of technical sciences,
deputy general director for development,
Research Institute physical measurements
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

Antonina A. Papko

Doctor of technical sciences, chief researcher,
Research Institute physical measurements
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

Alexey V. Pospelov

Chief specialist,
Research Institute physical measurements
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

Nikita V. Nedopekin

Head of department,
Research Institute physical measurements
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

Оксана Николаевна Лузгина

ведущий инженер-конструктор,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: inercial@niifi.ru

Oksana N. Luzgina

Leading design engineer,
Research Institute physical measurements
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ

TECHNOLOGICAL BASIS FOR IMPROVING RELIABILITY AND PRODUCT QUALITY

УДК 621.396

doi:10.21685/2307-4205-2021-1-7

АЛГОРИТМ ВЫЧИСЛЕНИЯ ПЕЛЕНГА НА ИСТОЧНИК РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ

В. А. Маклашов¹, Р. М. Мирзоев²

^{1,2} Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева, Самара, Россия
^{1,2} kipres@ssau.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Пассивный метод пеленгации не позволяет измерять дальность до источника радиоизлучения (ИРИ) классическим однопозиционным способом. Одним из путей решения этой проблемы является использование многопозиционных пеленгующих станций. Однако при этом возникают сложности определения координат ИРИ, обусловленные следующими особенностями метода: станции пеленгования размещены на летательных аппаратах, а ИРИ – на земной поверхности; на борту летательного аппарата возможно разместить только линейные антенные решетки, которые позволяют определить фазовым способом пеленг ИРИ только в одной (горизонтальной) плоскости. Разность высот расположения объекта и ИРИ приводит к ошибкам измерения пеленга, что снижает точность определения координат ИРИ. При практическом использовании этого метода и построении соответствующей аппаратуры данные особенности необходимо учитывать. При этом необходимо вводить алгоритмы коррекции, компенсации, маневра для снижения влияния угла места визирования ИРИ на точность пеленгации. Цель данной работы – уменьшение погрешностей определения пеленга и координат ИРИ. *Материалы и методы.* Предложен алгоритм поправки пеленга. Проведено моделирование определения местоположения цели. Оценены погрешности определения пеленга и местоположения ИРИ. Определено влияние высоты на ошибку определения. Для получения координат цели использован алгоритм «Target Location». При этом учитывается дополнительный набег фаз. Разработан алгоритм поправки пеленга, который базируется на методе триангуляции. Проведено моделирование в среде MATLAB. *Результаты.* Моделирование алгоритма поправки на тестовой модели позволило уменьшить погрешность определения пеленга с $4,9^\circ$ до $0,1^\circ$. Ошибка азимута на цель уменьшилась с 15° до $0,3^\circ$. Погрешность определения местоположения уменьшалась с 3 км до нескольких десятков метров. *Выводы.* Путем моделирования доказана состоятельность алгоритма коррекции пеленга. В результате моделирования было установлено, что погрешность определения пеленга и координат ИРИ с использованием алгоритма коррекции уменьшается примерно в 50 раз. Полученные данные дают возможность разработать функциональное программное обеспечение систем радиоэлектронной борьбы.

Ключевые слова: алгоритм, пеленг, источник радиоизлучения, математическое моделирование, вычисление, эффективность

Для цитирования: Маклашов В. А., Мирзоев Р. М. Алгоритм вычисления пеленга на источник радиоизлучения // Надежность и качество сложных систем. 2021. № 1. С. 66–75. doi:10.21685/2307-4205-2021-1-7

ALGORITHM FOR CALCULATING DIRECTIONS TO A RADIO SOURCE**V.A. Maklashov¹, R.M. Mirzoev²**^{1,2}Samara National Research University named after academician S.P. Korolev, Samara, Russia
^{1,2}kipres@ssau.ru

Abstract. *Background.* The passive method of direction finding does not allow measuring the range to a radio emission source (RES) using the classical single-position method. One of the ways to solve this problem is to use multi-position direction finding stations. However, at the same time, difficulties arise in determining the coordinates of the RES, due to the following features of the method: direction finding stations are located on aircraft (AC), and RES – on the earth's surface; on board the aircraft it is possible to place only linear antenna arrays, which make it possible to determine by the phase method the bearing of the RES in only one (horizontal) plane. The difference in the heights of the location of the object and the RES leads to errors direction finding measurements, which reduces the accuracy of determining the coordinates of the RES. With the practical use of this method and the construction of equipment, these features must be met. For this, it is necessary to introduce algorithms for correction, compensation, and maneuver to reduce the influence of the angle of sight of the RES on the accuracy of direction finding. The purpose of this work is to reduce the errors in determining the direction finding and coordinates of the RES. *Materials and methods.* A direction finding correction algorithm is proposed. Simulation of target location is carried out. Estimates of the error in determining the bearing and position of the RES. The influence of altitude on the direction finding error is determined. To obtain the coordinates of the target, the "Target Location" algorithm was used. This takes into account the additional phase incursion. A bearing correction algorithm has been developed, which is based on the triangulation method. Simulation was carried out in the MATLAB environment. *Results.* Modeling the correction algorithm on a test model made it possible to reduce the bearing determination error from 4.9 to 0.1 degrees. The azimuth error to the target has decreased from 15 to 0.3 degrees. The position determination error decreased from 3 km to several tens of meters. *Conclusions.* The consistency of the correction algorithm was proved by modeling. As a result of the simulation, it was found that the error in determining the bearing and coordinates of the RES using the correction algorithm is reduced by about 50 times. The data obtained make it possible to develop functional software for electronic warfare (EW) systems.

Keywords: algorithm, direction finding, radio emission source, mathematical modeling, calculation, efficiency

For citation: Maklashov V.A., Mirzoev R.M. Algorithm for calculating directions to a radio source. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2021;1:66–75. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2021-1-7

Введение

Для определения местоположения ИРИ при проведении радиотехнической разведки во многих случаях используют пассивную радиолокацию. Однако она не позволяет измерять дальность до ИРИ классическим однопозиционным методом. Одним из путей решения этой проблемы является использование многопозиционных пеленгующих станций [1–5]. Однако при этом возникают сложности определения координат ИРИ, обусловленные следующими особенностями метода:

1) станции пеленгования размещены на летательных аппаратах (ЛА);

2) ИРИ расположен на земной поверхности;

3) на борту ЛА возможно разместить только линейные антенные решетки, с помощью которых можно определить фазовым способом пеленг ИРИ только в одной (горизонтальной) плоскости.

В связи с этим разность высот расположения объекта и субъектов пеленгования формирует искажения пеленгационных прямых. Это приводит к ошибкам пеленга (рис. 1, 2). Из данных графиков следует:

– точность местоопределения ИРИ напрямую зависит от величин ошибок пеленгования;

– разность высот расположения объекта и субъекта пеленгования оказывает существенное влияние на систематическую ошибку (отклонение) пеленга;

– рост данных отклонений значителен с ростом угла места визирования ИРИ;

– геометрическое смещение местоопределения ИРИ невозможно компенсировать только приближением к объекту.

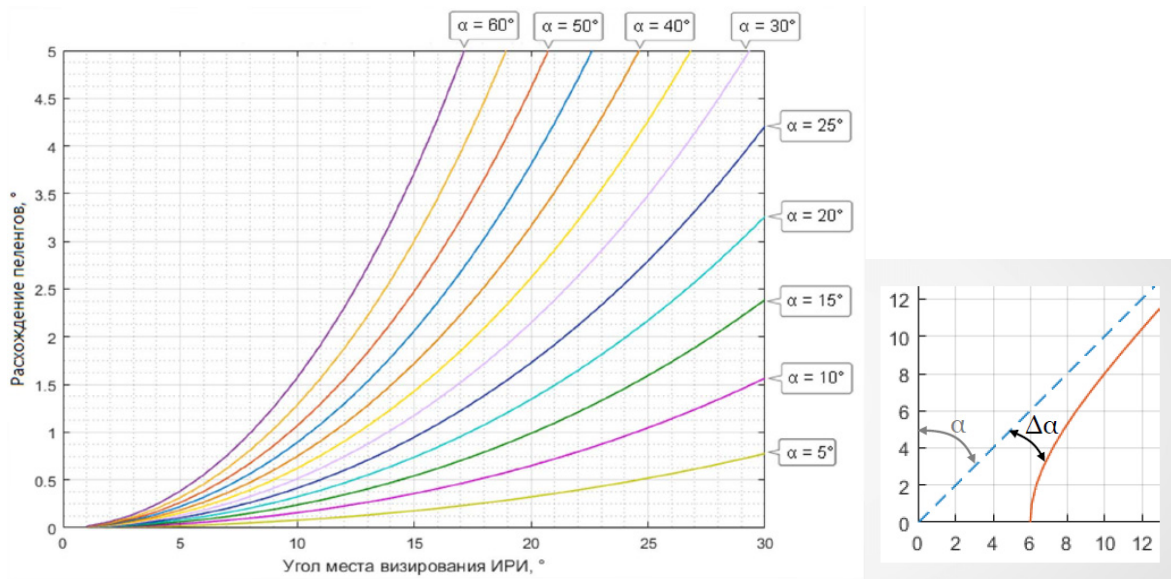


Рис. 1. Ошибка пеленга в зависимости от истинного пеленга и угла визирования по углу места

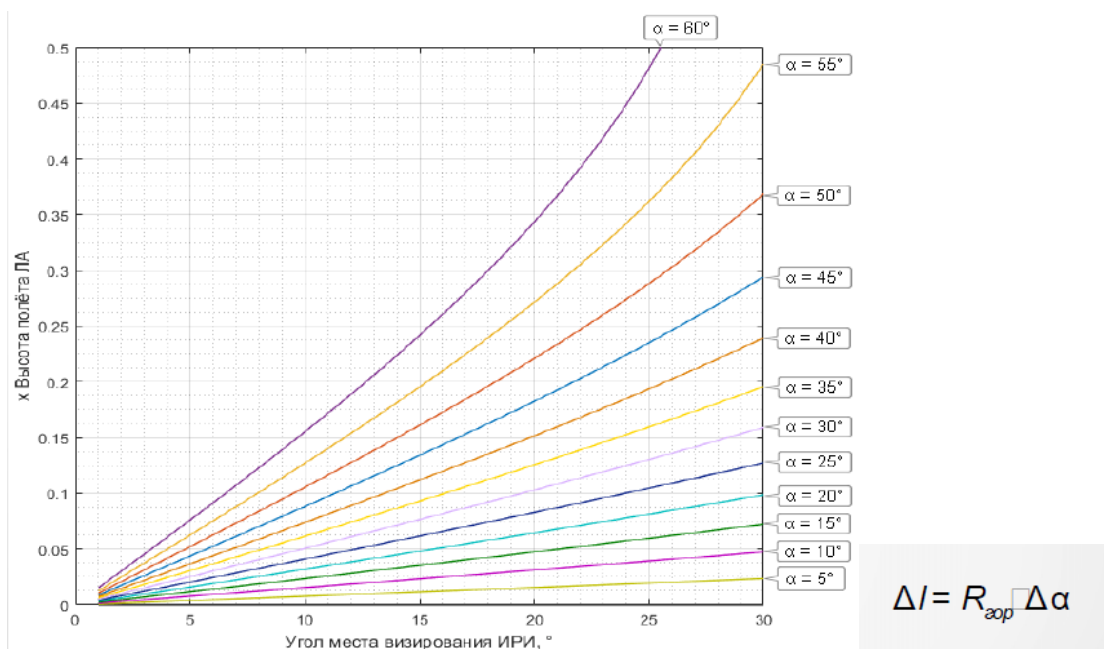


Рис. 2. Зависимость высоты полета от истинного пеленга и угла визирования по углу места

В натурном применении и построении соответствующей аппаратуры необходимо учитывать вышеуказанные особенности. Для этого необходимо вводить алгоритмы коррекции, компенсации, маневра к снижению угла места визирования ИРИ. Это позволит уменьшить погрешность определения пеленга и координат ИРИ. Кроме того, будет сделан следующий шаг в решении проблемы многофакторного обеспечения надежности [6], проведения моделирования катастрофических отказов [7] в системах радиоэлектронной борьбы (РЭБ).

Цель работы – уменьшение погрешности определения пеленга и координат ИРИ.

Разработка алгоритма поправки пеленга

Обычный алгоритм вычисления пеленга на ИРИ (цель) имеет следующий недостаток. Так как этот алгоритм подразумевает нахождение комплекса и источника излучения на одном уровне, то с увеличением высоты расположения комплекса будет возрастать погрешность определения пеленга и, как следствие, погрешность определения местоположения цели.

Авторами были получены результаты моделирования определения местоположения цели на высоте 10 и 0 км, т.е. идеальные случаи нахождения комплекса и цели на одной высоте (рис. 3 и 4). Клетки поля моделирования имеют размеры 10×10 км.

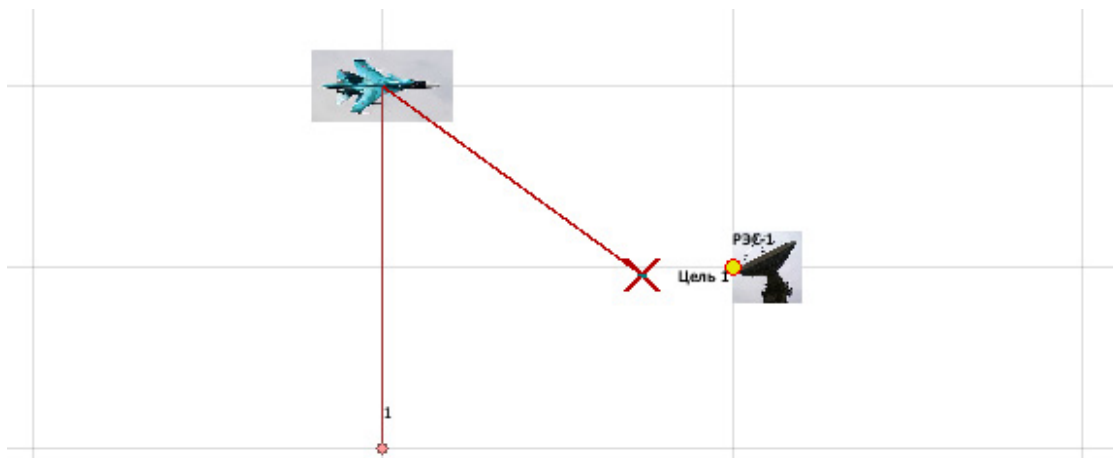


Рис. 3. Конечный результат определения местоположения цели при расположении ЛА на высоте 10 км

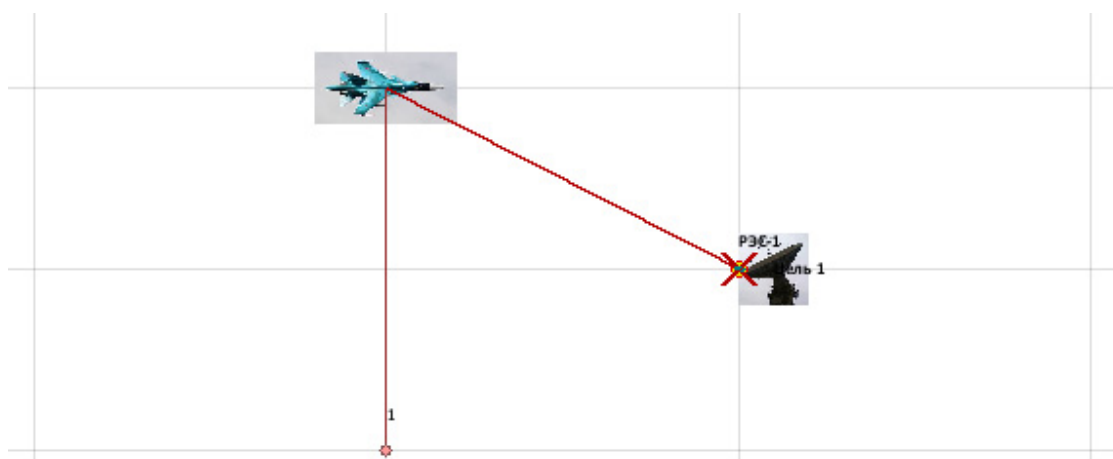


Рис. 4. Конечный результат определения местоположения цели при расположении ЛА на высоте 0 км

На рис. 5 и 6 приведены графики погрешностей определения пеленга и местоположения ИРИ.

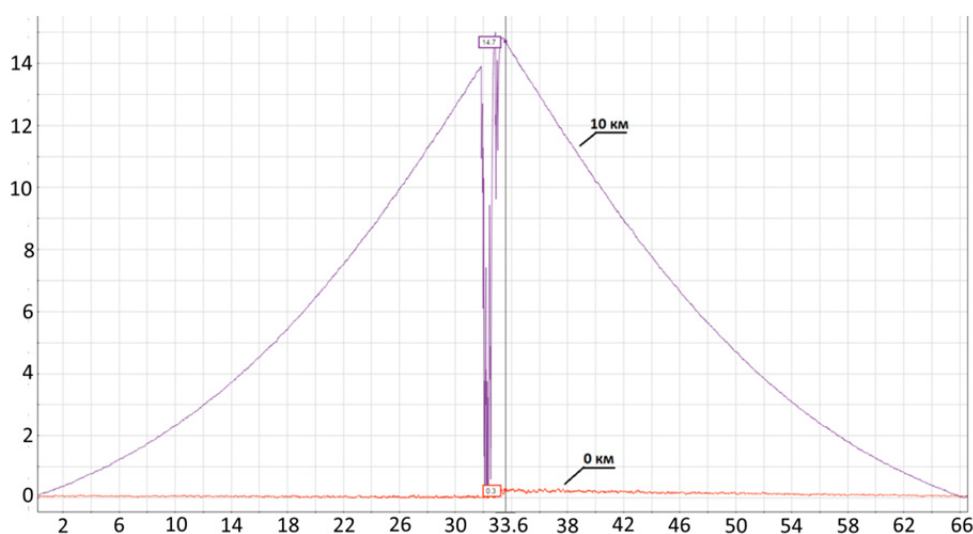


Рис. 5. Графики погрешности определения пеленга

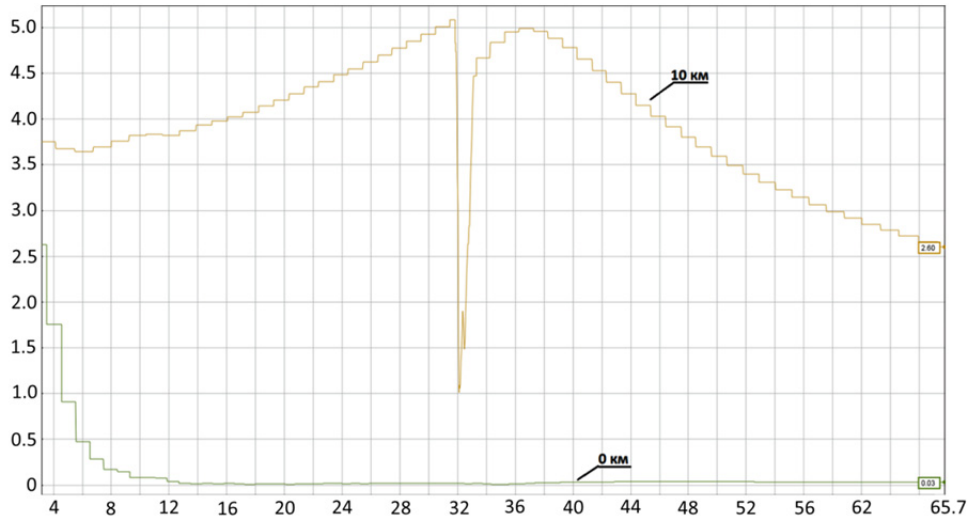


Рис. 6. Графики погрешности определения местоположения

Пиковые значения погрешностей составляют $14,8^\circ$ и $0,3^\circ$ для расположения ЛА на высоте 10 и 0 км соответственно. Данные графики позволяют количественно оценить существенное влияние высоты на ошибку определения пеленга и местоположения ИРИ. Проведенный анализ показывает, что причиной ошибки является увеличение расстояния от цели до ЛА на величину dL (рис. 7), которое тем больше, чем больше высота.

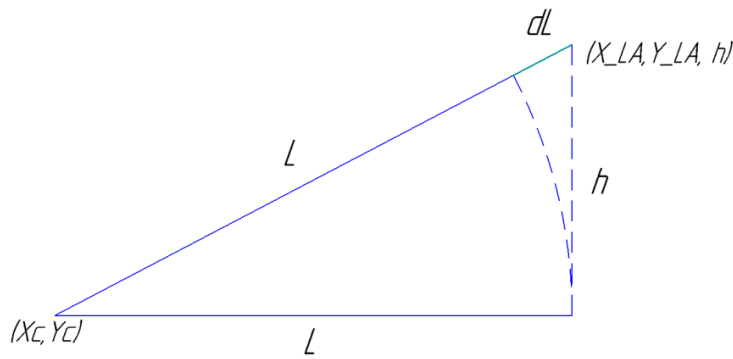


Рис. 7. Схема взаимного расположения цели и ЛА

Соответственно изменяется и фаза приходящего сигнала на величину

$$\Delta\varphi = 360dL / \lambda ,$$

где λ – длина волны приходящего сигнала.

Чтобы уменьшить погрешность был разработан следующий алгоритм компенсирования ошибки:

- 1) получаем примерные координаты цели (X_c, Y_c) после выполнения алгоритма «Target Location»;
- 2) вычисляем приращение расстояния dL для каждой антенны:

$$dL = \sqrt{(x_{ant} - X_c)^2 + (y_{ant} - Y_c)^2 + h^2} - \sqrt{(x_{ant} - X_c)^2 + (y_{ant} - Y_c)^2} ;$$

- 3) вычисляем дополнительный набег фаз:

$$\Delta\varphi = 360dL / \lambda ;$$

- 4) для каждой антенны соответственно вычитаем поправку $\Delta\varphi$ из фазы приходящего сигнала;
- 5) далее вычисляются разности фаз, пеленги и пересчитываются координаты цели. Получив новые координаты цели, повторяем данный алгоритм с первого шага.

Значения координат цели с каждой итерацией будут сходиться к некоторому числу. Ниже на рис. 8 и 9 представлены результаты моделирования алгоритма на тестовой модели.

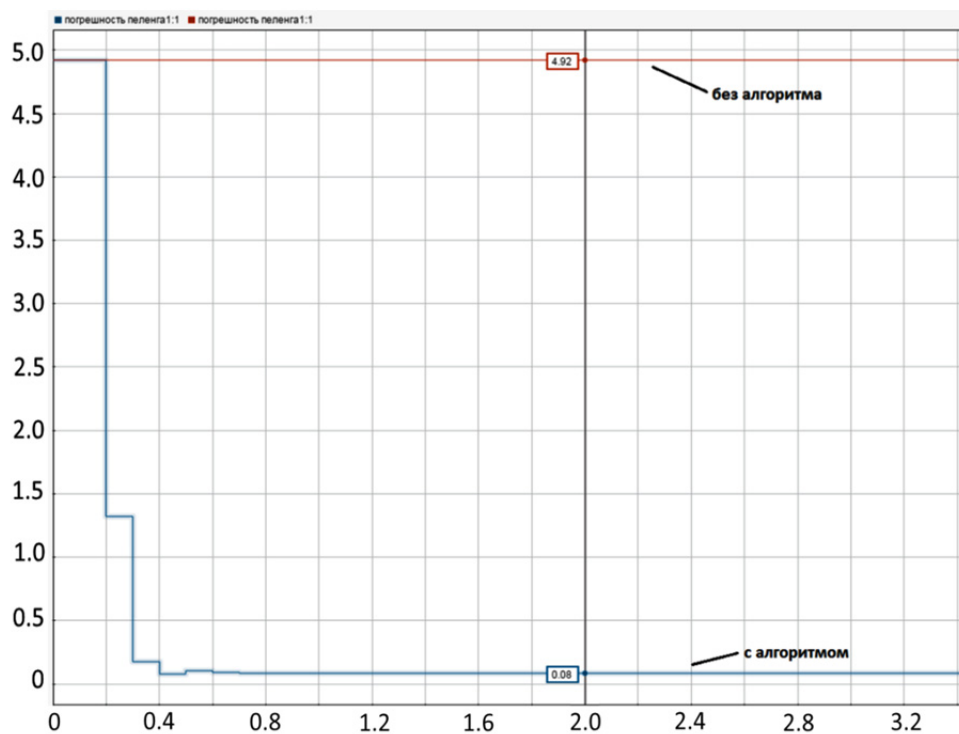


Рис. 8. Погрешности определения пеленга без поправки и с поправкой

В данном примере погрешность определения пеленга уменьшилась с $4,9^\circ$ до $0,1^\circ$.

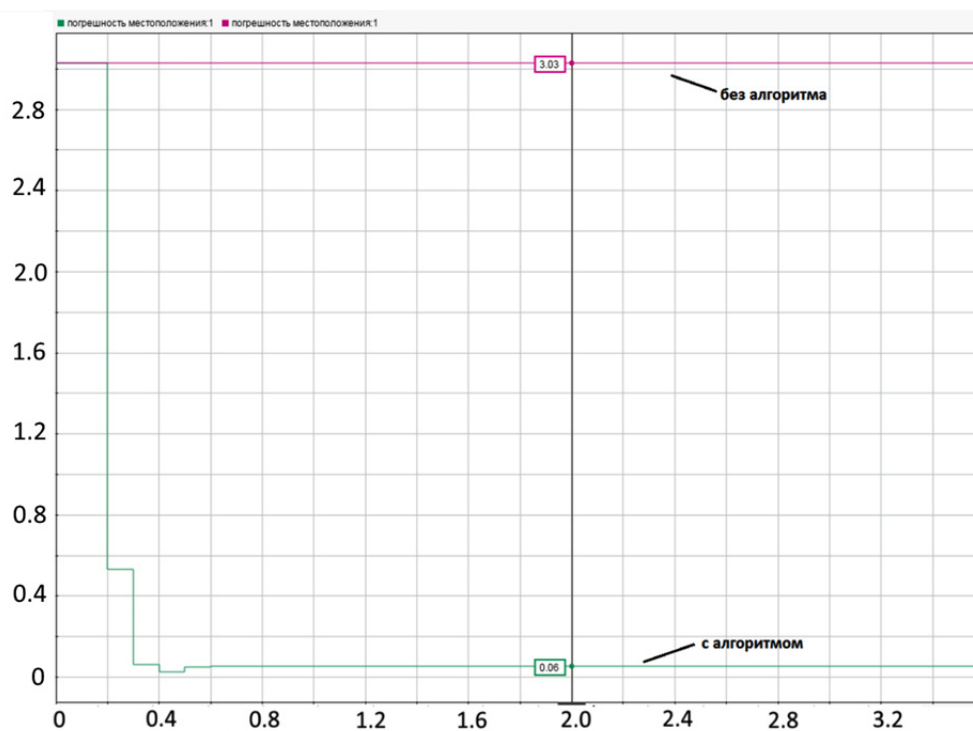


Рис. 9. Погрешности определения местоположения без поправки и с поправкой

Как видно из рис. 9, погрешность сократилась с 3 км до 60 м.

Алгоритм поправки пеленга

Алгоритм поправки пеленга имеет следующую последовательность:

1) после обнаружения цели вычисляется и запоминается пеленг (pel_0) в первой точке триангуляции, а также сохраняются длина волны (λ) и разности фаз (ph_{012_in} , ph_{023_in}) принятого сигнала на всех антенных базах, координаты антенн (x_{0i_ant} , y_{0i_ant} , z_{0i_ant} , $i = 1, 2, 3$), курс ($kurs$) и номер приемного модуля (ПМ) (Num_PM_0) (курс и номер ПМ сохраняются для вычисления азимута);

2) определяется пеленг (pel) во второй точке триангуляции;

3) вычисляются приблизительные координаты местоположения цели (X_c , Y_c) по алгоритму «Target Location»;

4) определяется пеленг в текущем местоположении ЛА:

– вычисляем приращения расстояний dL для каждой антенны:

$$dL_1 = \sqrt{(x_{1_ant} - X_c)^2 + (y_{1_ant} - Y_c)^2 + h^2} - \sqrt{(x_{1_ant} - X_c)^2 + (y_{1_ant} - Y_c)^2};$$

$$dL_2 = \sqrt{(x_{2_ant} - X_c)^2 + (y_{2_ant} - Y_c)^2 + h^2} - \sqrt{(x_{2_ant} - X_c)^2 + (y_{2_ant} - Y_c)^2};$$

$$dL_3 = \sqrt{(x_{3_ant} - X_c)^2 + (y_{3_ant} - Y_c)^2 + h^2} - \sqrt{(x_{3_ant} - X_c)^2 + (y_{3_ant} - Y_c)^2};$$

– вычисляем дополнительный набег фаз:

$$\Delta\phi_1 = 360dL_1 / \lambda; \quad \Delta\phi_2 = 360dL_2 / \lambda; \quad \Delta\phi_3 = 360dL_3 / \lambda;$$

– вычисляем разности набегов:

$$\Delta\phi_{12} = \Delta\phi_1 - \Delta\phi_2; \quad \Delta\phi_{23} = \Delta\phi_2 - \Delta\phi_3;$$

– вычитаем разности набегов из текущих разностей фаз:

$$ph_{12} = ph_{12_in} - \Delta\phi_{12}; \quad ph_{23} = ph_{23_in} - \Delta\phi_{23}.$$

– по разностям фаз ph_{12} , ph_{23} вычисляем пеленг в текущем местоположении ЛА по алгоритму «Target Peleng»;

5) выполняем все подпункты п. 4 для первой точки триангуляции, используя сохраненные входные данные: разности фаз (ph_{012_in} , ph_{023_in}), координаты антенн (x_{0i_ant} , y_{0i_ant} , z_{0i_ant} , $i = 1, 2, 3$). Таким образом получаем скорректированный пеленг в первой точке триангуляции;

6) имея два скорректированных пеленга, повторяем пункты 3–6.

Моделирование в среде MATLAB

Ниже представлены результаты моделирования. В поле моделирования была задана ситуация, показанная на рис. 10.

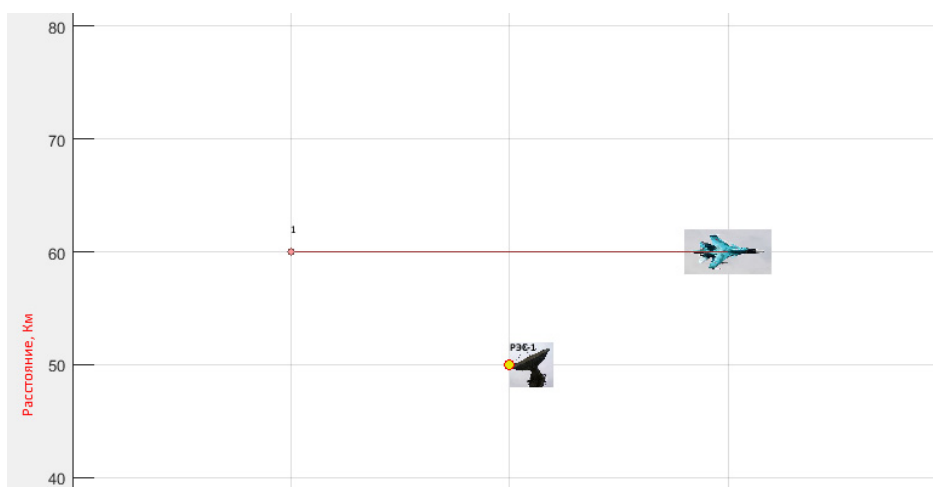


Рис. 10. Поле моделирования

На рис. 11 показаны графики азимутов на цель с использованием алгоритма коррекции и без него.

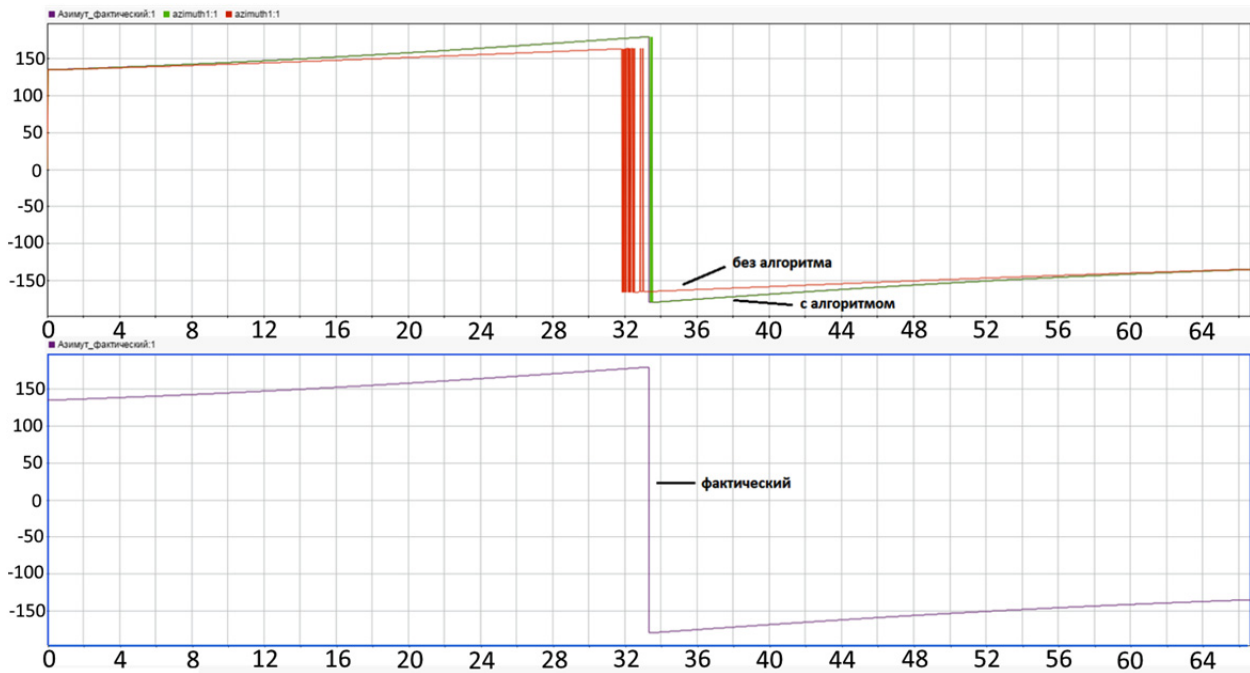


Рис. 11. Графики азимутов на цель без поправки и с поправкой

Из рисунков видно, что графики фактического азимута и азимута, полученного с коррекцией пеленга, практически идентичны.

На рис. 12 показаны графики ошибки азимутов на цель.

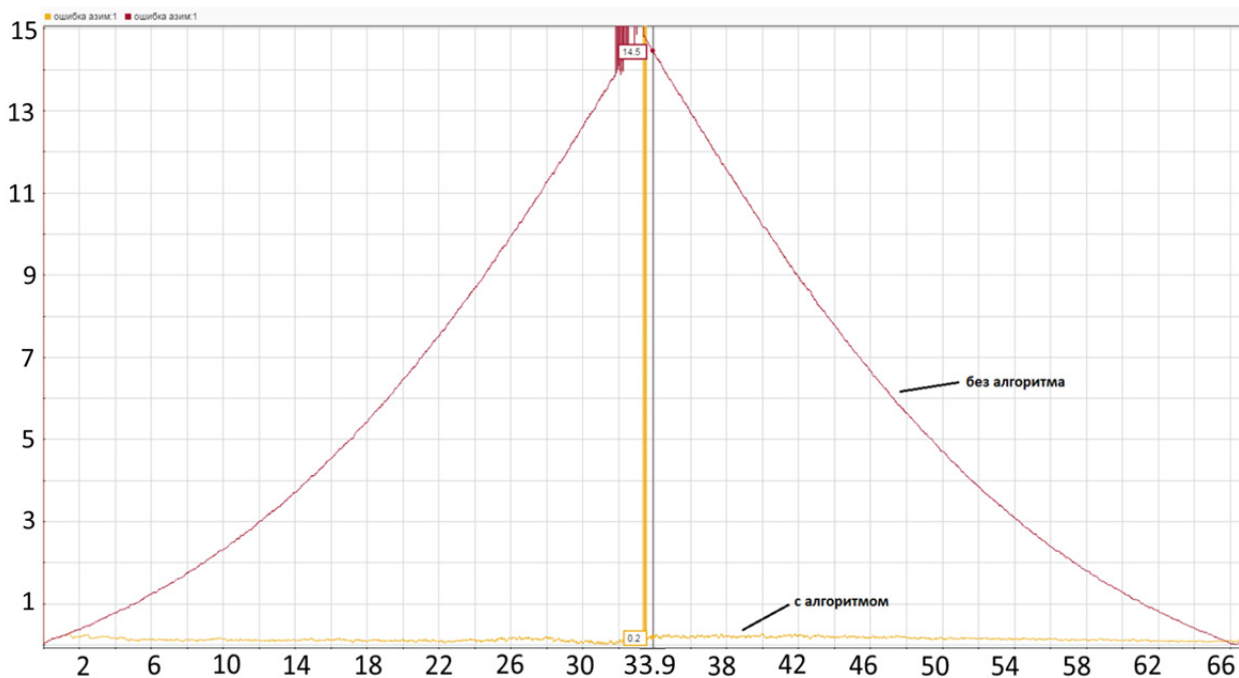


Рис. 12. Графики ошибок азимутов на цель без поправки и с поправкой

Погрешность после использования алгоритма поправки пеленга в данной ситуации не превышает $0,3^\circ$, в то время как без него ошибка доходит до 15° .

На рис. 13 показаны графики погрешностей местоположения.

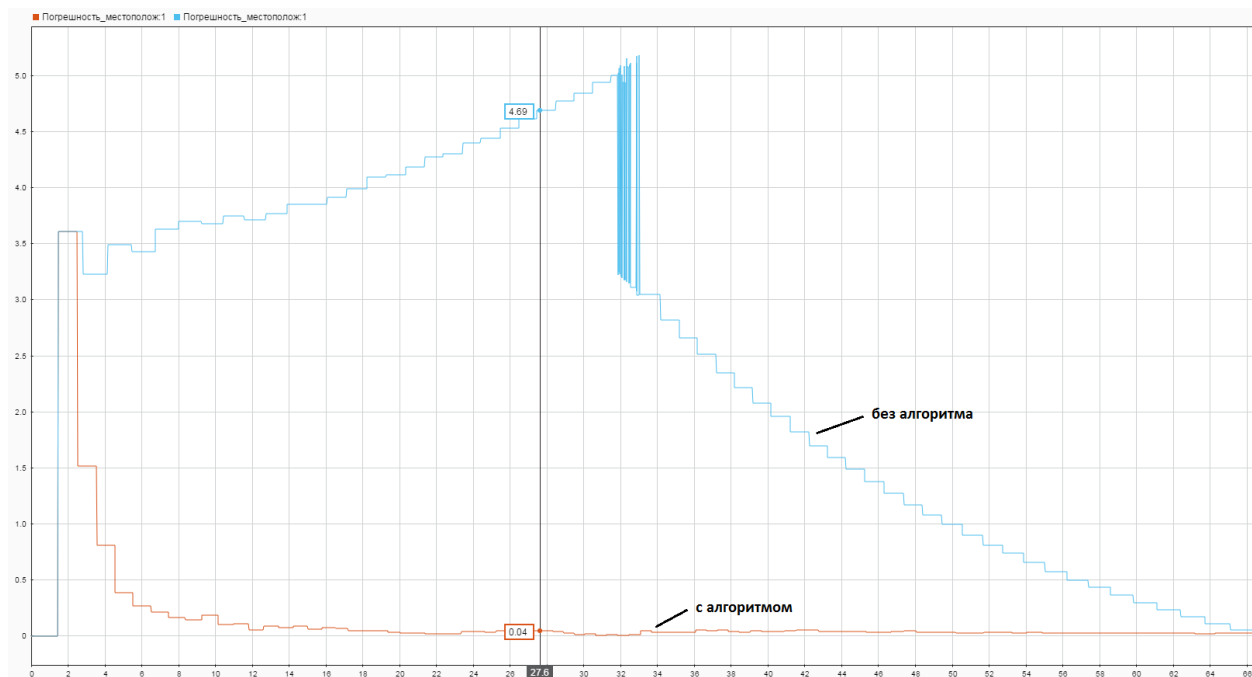


Рис. 13. Графики погрешностей местоположения без поправки и с поправкой

Как и в тестовой модели, погрешность определения местоположения сходится к нескольким десяткам метров. Без использования коррекции погрешность в среднем в данной ситуации составляет 3 км.

Заключение

Путем моделирования доказана состоятельность алгоритма коррекции пеленга. В результате моделирования было установлено, что погрешность определения пеленга и координат ИРИ с использованием алгоритма коррекции уменьшается примерно в 50 раз. Полученные результаты дают возможность разработать функциональное программное обеспечение систем РЭБ [8].

Список литературы

1. Шерстнев Д. В., Маклашов В. А., Мазуров Ю. В., Тезейкин В. К. Малогабаритный модульный комплекс РТР и РЭП индивидуальной защиты летательных аппаратов // Радиоэлектронная борьба в Вооруженных силах Российской Федерации. 2017. № 1. С. 172–173.
2. Справочник по радиолокации : в 4-х т. / под ред. М. Скольника. М. : Сов. радио, 1976. Т. 1. 456 с.
3. Черный Ф. Б. Распространение радиоволн. М. : Сов. радио, 1972. 463 с.
4. Перунов Ю. М., Фомичев К. Н., Юдин Л. Н. Радиоэлектронное подавление информационных каналов систем управления оружием. М. : Радиотехника, 2003. 416 с.
5. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств / под ред. Н. М. Царькова. М. : Радио и связь, 1985. 272 с.
6. Юрков Н. К., Затылкин А. В., Полесский С. Н. [и др.]. Информационная технология многофакторного обеспечения надежности сложных электронных систем // Надежность и качество сложных систем. 2013. № 4. С. 74–79.
7. Юрков Н. К., Горячев Н. В., Кузина Е. А. Физические основы получения катастрофического отказа в электрорадиокомпонентах и системах // Надежность и качество сложных систем. 2018. Т. 1. С. 102–107.
8. Маклашов В. А., Пиганов М. Н. Методика унификации средств радиоэлектронной борьбы // Надежность и качество сложных систем. 2019. № 3. С. 26–32.

References

1. Sherstnev D.V., Maklashov V.A., Mazurov Yu.V., Tezeykin V.K. Small-sized modular complex of RTR and REP individual protection of aircraft. *Radioelektronnaya bor'ba v Vooruzhennykh silakh Rossiyskoy Federatsii = Electronic warfare in the Armed Forces of the Russian Federation*. 2017;1:172–173. (In Russ.)

2. Skolnik M. (ed.) *Spravochnik po radiolokatsii: v 4-kh t.* = . Moscow: Sov. radio, 1976;1:456. (In Russ.)
3. Chernyy F.B. *Rasprostraneniye radiovoln = Handbook of radar: in 4 vols.* Moscow: Sov. radio, 1972:463. (In Russ.)
4. Perunov Yu.M., Fomichev K.N., Yudin L.N. *Radioelektronnoye podavleniye informatsionnykh kanalov sistem upravleniya oruzhiem = Electronic suppression of information channels of weapons control systems.* Moscow: Radiotekhnika, 2003:416. (In Russ.)
5. Tsar'kov N. M. (ed.) *Elektromagnitnaya sovmestimost' radioelektronnykh sredstv = Electromagnetic compatibility of radio-electronic devices.* Moscow: Radio i svyaz', 1985:272. (In Russ.)
6. Yurkov N.K., Zatytkin A.V., Poleskiy S.N. [et al.]. Information technology for multi-factor reliability assurance of complex electronic systems. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems.* 2013;4:74–79. (In Russ.)
7. Yurkov N.K., Goryachev N.V., Kuzina E.A. Physical basis of catastrophic failure in electrical and radio components and systems. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems.* 2018;1:102–107. (In Russ.)
8. Maklashov V.A., Piganov M.N. Methods of unification of electronic warfare equipment. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems.* 2019;3:26–32. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Владимир Анатольевич Маклашов

аспирант,
Самарский национальный исследовательский
университет имени академика С. П. Королева
(Россия, г. Самара, Московское шоссе, 34)
E-mail: kipres@ssau.ru

Рустам Музаффарович Мирзоев

аспирант,
Самарский национальный исследовательский
университет имени академика С. П. Королева
(Россия, г. Самара, Московское шоссе, 34)
E-mail: kipres@ssau.ru

Vladimir A. Maklashov

Postgraduate student,
Samara National Research University
named after academician S. P. Korolev
(34 Moskovskoye highway, Samara, Russia)

Rustam M. Mirzoev

Postgraduate student,
Samara National Research University
named after academician S. P. Korolev
(34 Moskovskoye highway, Samara, Russia)

ДРЕВОВИДНЫЕ КАРТЫ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ПОДДЕРЖКИ РЕШЕНИЙ

М. Ю. Михеев¹, О. В. Прокофьев², И. Ю. Семочкина³

^{1,2,3} Пензенский государственный технологический университет, Пенза, Россия
¹ mix1959@gmail.com, ² prokof_ow@mail.ru, ³ ius1961@gmail.com

Аннотация. *Актуальность и цели.* В процессе эволюции компьютерных систем поддержки принятия решений (*Decision Support System, DSS*) «классические» деревья решений были дополнены новыми способами отображения данных – древовидными картами. Используя иерархическую структуру, древовидные карты обеспечивают осмысленно организованные отображения информации большого объема, что дает преимущества при выработке решения по большим данным. Собирая и обобщая опыт применения обычных деревьев и древовидных карт, авторы поставили цель выработать рекомендации по применению средств визуализации данных в прикладных областях, повышающему качество поддержки решений. *Материалы и методы.* Если обычный подход нашел эффективное применение в машинном обучении, то древовидные карты ориентированы на применение «вручную» лицами, принимающими решения. В отличие от первого подхода, опирающегося на объективные числовые критерии оценки качества, эффект от применения древовидных карт субъективен и менее очевиден. Для второго подхода применены данные опросов пользователей во время решения профессиональных задач, связанных с анализом web-страниц «вручную» в процессе полного факторного эксперимента. *Результаты и выводы.* Среднее время решения задач и экспертные оценки позволили сделать выводы о преимуществах древовидного представления данных и потенциальной возможности повышения качества поддержки принимаемых решений. В заключении обоснован вывод о необходимости комплексного применения средств визуализации данных и ряда других технологий в продуктах второго поколения DSS 2.

Ключевые слова: деревья решений, древовидные карты, качество визуализации, качество решения, экспериментальные данные

Для цитирования: Михеев М. Ю., Прокофьев О. В., Семочкина И. Ю. Древовидные карты для повышения качества поддержки решений // Надежность и качество сложных систем. 2021. № 1. С. 76–86. doi:10.21685/2307-4205-2021-1-8

TREEMAPS TO IMPROVE QUALITY OF SUPPORT OF DECISIONS

M.Yu. Mikheev¹, O.V. Prokofev², I.Yu. Semochkina³

^{1,2,3} Penza State Technological University, Penza, Russia
¹ e-mail: mix1959@gmail.com, ² prokof_ow@mail.ru, ³ ius1961@gmail.com

Abstract. *Background.* In the process of evolution of Decision Support System (DSS) computer systems, the "classic" decision trees were supplemented with new ways of displaying data – tree maps. Using a hierarchical structure, tree maps provide meaningfully organized displays of large amounts of information, which gives advantages in developing solutions for big data. *Materials and methods.* Gathering and summarizing the experience of using ordinary trees and tree maps, the authors set a goal to develop recommendations on the use of data visualization tools in applied areas, which improves the quality of decision support. If the usual approach has found effective application in machine learning, then tree maps are oriented to manual use by decision makers. In contrast to the first approach, which relies on objective numerical criteria for assessing quality, the effect of using tree maps is subjective and less obvious. For the second approach, user survey data were applied during the solution of professional tasks related to the analysis of web pages "manually" in the process of a full factorial experiment. *Results and conclusions.* The average time for solving problems and expert estimates allowed us to draw conclusions about the advantages of a tree-like presentation of data and the potential for improving the quality of support for decisions made. In conclusion, the article substantiates the conclusion about the need for the integrated use of data visualization tools and a number of other technologies in the second generation DSS 2 products.

Keywords: decision trees, treemaps, quality of visualization, quality of solution, experimental data

For citation: Mikheev M.Yu., Prokofev O.V., Semochkina I.Yu. Treemaps to improve quality of support of decisions. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2021;1:76–86. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2021-1-8

Введение

Дерево решений используется в системах поддержки принятия решений как карта возможных результатов ряда связанных вариантов. Это позволяет отдельному лицу или организации сопоставлять возможные действия друг с другом на основе их затрат, вероятностей и выгод. Применение деревьев решений в традиционном смысле неоднократно рассматривалось в литературе по построению DSS [1]. Их можно использовать либо для неформального обсуждения, либо для составления алгоритма, который математически предсказывает лучший выбор [2–9]. Дерево решений обычно начинается с одного узла, который разветвляется на возможные результаты. Каждый из этих результатов приводит к дополнительным узлам, которые переходят в другие возможности, что придает ему древовидную форму. Имея полное дерево решений, можно начать анализ решения в ситуации, с которой столкнулись. Примером современной реализации «классического» подхода являются диаграммы, построенные в среде разработки Lucidchart [10].

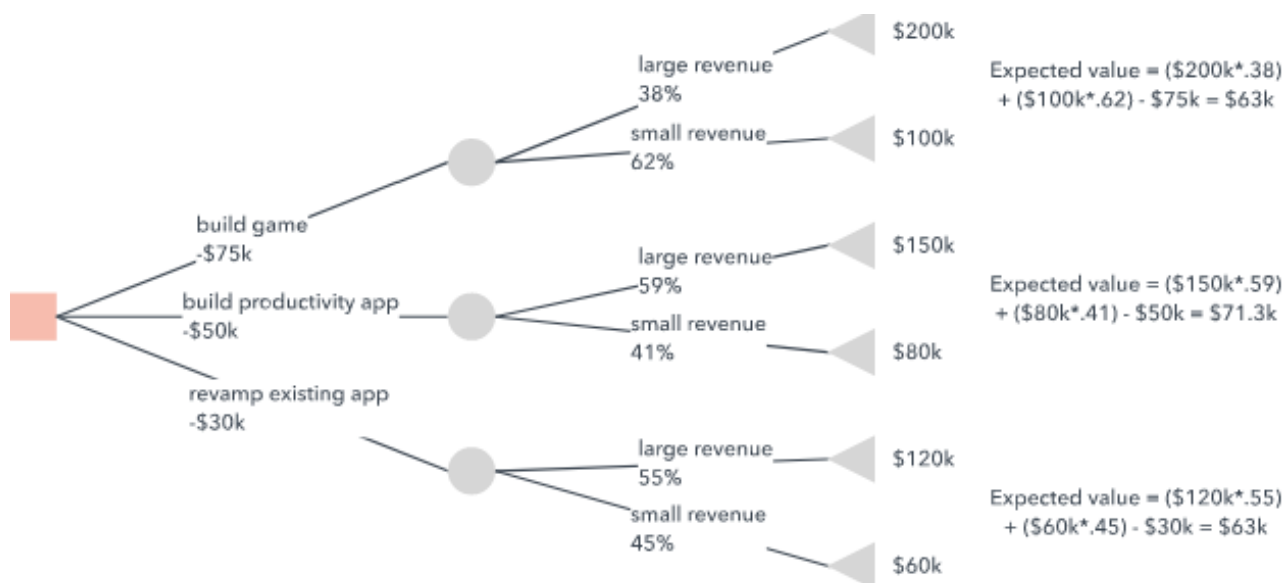


Рис. 1. Пример дерева решений в среде Lucidchart

При определении того, какой результат является наиболее желательным, важно учитывать предпочтения лица, принимающего решения. Например, некоторые могут предпочесть варианты с низким уровнем риска, в то время как другие готовы пойти на риск для большей выгоды. Когда нужно использовать дерево решений с сопутствующей вероятностной моделью, можно применить ее для расчета условной вероятности события или вероятности того, что это произойдет, если произойдет другое событие. Для этого начинают с начального события, затем нужно следовать по пути от этого события к целевому событию, умножая вероятности каждого из этих событий. Таким образом, дерево решений может использоваться как традиционная древовидная диаграмма, которая отображает вероятности определенных событий. Расчет и визуализация в DSS решений с помощью классического вероятностного подхода были только началом для нового этапа, на котором для выработки решений стали применяться неявные данные, полученные в процессе добычи данных, а также данные, выявленные в больших объемах менее информативных данных. Целью работы являлись выявление, систематизация древовидных карт, появившихся в новом поколении продуктов DSS 2 [11], оценка карт в отношении качества визуализации данных для лиц, принимающих решения (ЛПР), выработка рекомендаций по областям применения, ставшими доступными на основе изложенного выше «классического» варианта.

Постановка задачи

Современной разновидностью диаграмм для ЛПР являются древовидные карты, использующие метод визуального представления данных, при котором площадь и цвет прямоугольников представляют две разные метрики. Древовидная карта также может использовать вложенные прямоугольники для представления иерархических отношений. Графическое представление вложенных групп может влиять на понимание пользователями древовидной карты. Существует два распространенных способа представления иерархии в древовидных картах: «простой» подход (рис. 2), который использует плавающий заголовок в центре каждой группы, и подход «заголовки» (рис. 3), использующий отдельный заголовок в прямоугольнике для каждой подгруппы. В обоих случаях при наведении курсора мыши на заголовок группы выделяется граница группы и появляется всплывающая подсказка с общей статистикой группы. Несколько встроенных уровней иерархии приведут к появлению нескольких плавающих заголовков или строк заголовка, что влияет как на видимость, так и на выбор данных. Плавающие заголовки могут скрывать значительную часть нижележащих прямоугольников и другие плавающие заголовки, в то время как подход заголовка использует пространство, которое иначе могло бы показать данные. Количество прямоугольников, представленных в древовидной карте, может влиять на способность пользователей идентифицировать и понять закономерности в данных. Здесь изображены два набора данных различного размера: на рис. 2 показана древовидная карта с 100 ячейками, а на рис. 3 показана одна с 1000 ячейками [12].



Рис. 2. Карта дерева «простой» иерархии с небольшим набором данных (Treemap-Classic)

По сравнению с таблицами древовидные карты должны обеспечивать лучший общий обзор и более тесную интеграцию между измерениями данных. Это преимущество ожидается в задачах, которые требуют некоторой степени грубого сравнения между прямоугольниками и (или) группами. Когда требуется конкретная идентификация, особенно в небольших таблицах, разумно ожидать одинаковой производительности между древовидной картой и табличными представлениями одних и тех же данных. Большие наборы данных потребуют отнимающей много времени прокрутки в таблицах, но, возможно, могут вызвать большее «затенение» данных в древовидных картах. В общем случае, оценка полезности и удобства древовидных карт касается положения узлов в иерархиях, отношений между узлами и группами и идентификации конкретной информации (на основе области,

цвета или того и другого). Дополнительные факторы, которые могут повлиять на сложность задачи для древовидной карты, включают: сложность идентификации и сравнения; количество уровней иерархии, пройденных в задачах сравнения; потребность использовать площадь, цвет или обе метрики для решения задачи. Из этого следует, что оценка качества визуализации данных и принимаемых по ним решений требует применения методов формирования группы экспертов, построения тестовых наборов данных, сбора и обработки экспертных оценок.

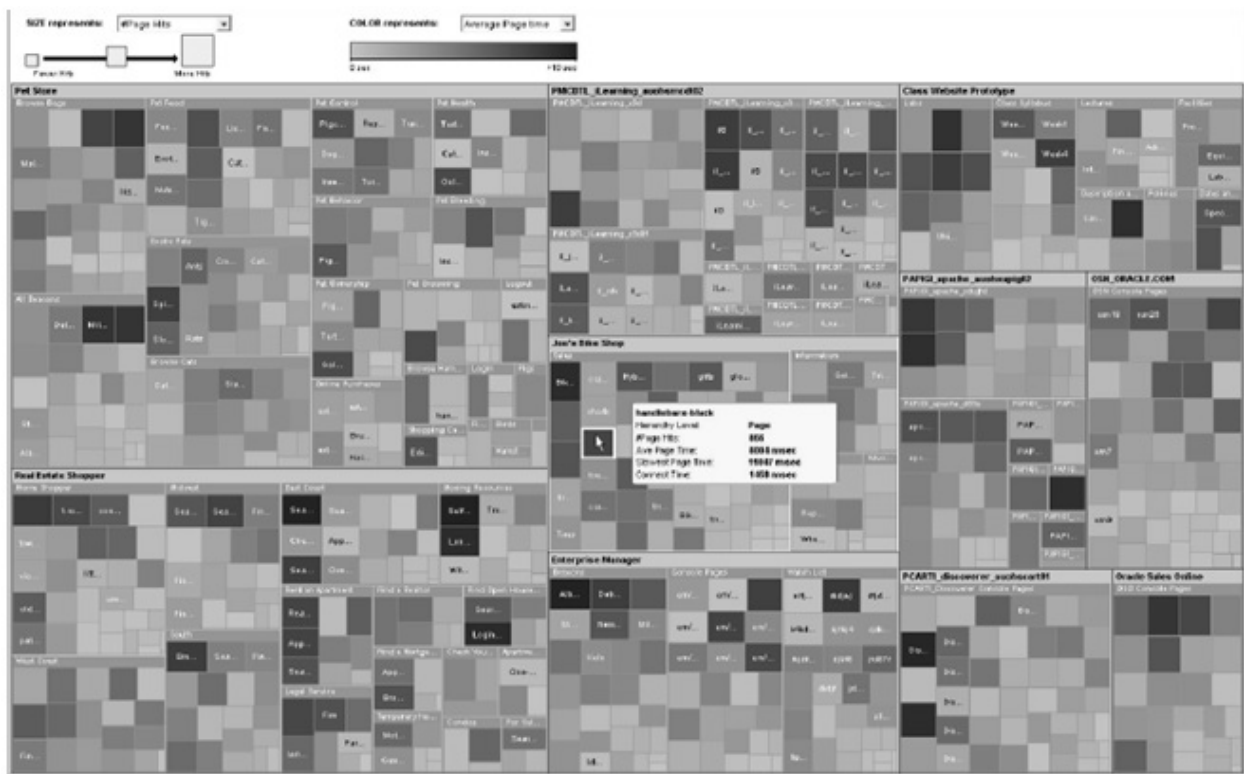


Рис. 3. Карта дерева иерархии «заголовки» с большим набором данных (Treemap-Titlebar)

Эксперименты и обработка результатов

Рассмотрим тестовые данные и организацию эксперимента. Целью экспериментов [12] являлось исследование эффективности и субъективных впечатлений пользователей-ЛПР, использующих древовидные карты и таблицы при идентификации, сравнении и анализе иерархически организованных данных. К управляемым факторам относились древовидная карта и представление данных таблицы, размер набора данных и иерархическое представление древовидной карты (Dataview). Дополнительные факторы включали эффекты обучаемости и эффекты сложности задач. Привлечено 10 экспертов, выдано восемь заданий, в каждом из них имелось шесть условий. Субъективные рейтинговые шкалы были построены после каждого набора из восьми заданий (Task Category), а также проводились собеседования для оценки субъективных впечатлений после выполнения всех заданий. Полный факторный эксперимент использовал факторное пространство 3×2 , соответственно, три способа отображения данных (Treemap-Classic на рис. 2, Treemap-Titlebar на рис. 3) и два различных по размеру набора данных (Large, Small). Восемь задач были заданы для каждого из приведенных выше шести условий (подробности в табл. 1). Они варьировались по сложности от базовых задач идентификации до задач сравнения и анализа. Восемь заданий были представлены в том же порядке в каждом из шести условий, но с разными вопросами. Шесть условий (определяемых представлением данных и размером набора данных) были выровнены по трудоемкости для проведения оценки изучаемости с помощью трех ограничений: каждое условие появлялось примерно одинаковое количество раз, таблицы чередовались с древовидными картами в порядке просмотра и большие наборы данных перемежались с небольшими наборами данных в порядке просмотра.

Категории задач и примеры

Задачи	Тип задачи	Типичные примеры
1, 2, 5	Идентификация или подсчет (Ident)	Каково было среднее время на странице при аренде квартиры?
3, 4	Сравнение, используя один или несколько критериев (Compare)	Какие страницы имели самое медленное среднее время страницы и наименьшее количество хитов?
7	Расширенное сравнение (Compare2)	Какая транзакция содержала больше всего страниц, которые имеют более 900 просмотров страниц?
6, 8	Открытый анализ (Analysis)	Основываясь только на данных перед вами, каковы (если таковые определяются) отношения между временем страницы-хита и средним временем просмотра страницы?

Три вида данных включали в себя древовидную карту с классическим представлением иерархии (Treemap-Classic или ТМ-С, рис. 2), древовидную карту с представлением иерархии заголовков (Treemap-Titlebar или ТМ-Т, рис. 3) и несортированную таблицу с иерархией, представленной отступом и цветом заголовка (TABL). Таблицы были отсортированы, чтобы обеспечить базовую линию для сравнения производительности на древовидных картах. Каждый набор данных содержал три уровня иерархии: веб-приложения (например, «Магазин велосипедов Джо»), транзакции (например, «Продажи») и страницы (например, «Педали»). Как древовидные карты, так и таблицы позволили участникам свободно выбирать из списка две метрики производительности из списка: количество просмотров страницы, среднее время страницы, самое медленное время страницы и время соединения. Они были представлены в двух выпадающих списках как в таблицах, так и в древовидных картах. Результаты эксперимента, выражающие зависимость среднего времени работы над задачей от значений факторов эксперимента, представлены на рис. 4,а–в, рейтинговые оценки способов визуализации данных по критериям качества показаны на рис. 4,г.

Дисперсионный анализ времени завершения задачи включал условия для каждого способа представления данных (ТМ-Т, ТМ-С, Tabl) номера задачи, порядка просмотра (Viewing Order) и размер набора данных (Dataset). Визуальное представление данных сильно повлияло на время выполнения задачи: задачи ТМ-Т выполнялись на 30 % быстрее (78 с), чем представления ТМ-С (108 с) или TABL (111 с) (критерий Фишера $F = 12$, уровень значимости $p < 0,001$). Увеличение времени завершения от малого к большому набору данных для представления TABL было значительно длиннее аналогичного древовидного (рис. 4,а).

Существенные различия во времени выполнения были обнаружены между восемью задачами в условии ($F = 16,5$, $p < 0,001$). Как показано на рис. 4,б, формат ТМ-Т имел явное преимущество во всех этих категориях задач, сгруппированных в три категории: идентификация значений или подсчет листовых узлов (задачи 1, 2, 5); сравнение по всем наборам данных и более открытый анализ, объединяющий два критерия (задачи 3, 4, 6, 8); специальная задача сравнения, требующая сложного сравнения групп на основе критериев более низкого уровня (задача 7).

Схема уравнивания позволила оценить доступность древовидных карт для изучения. Порядок просмотра значительно повлиял на время выполнения задачи (рис. 4,в, где $F = 8,3$, $p < 0,001$), при этом первое ознакомление с данными участников (153 с) значительно медленнее, чем второе (121 с), которое было значительно медленнее, чем остальные представления (73–86 с). В трех представлениях данных асимптотическая производительность обычно достигалась на третьем или четвертом наборе данных. В целом восприятие таблицы и двух древовидных карт было приблизительно одинаковым, хотя у нескольких экспертов возникли некоторые трудности с интерпретацией ТМ-С в первой позиции просмотра.

Всего было выполнено 14 подсказок и 40 ошибок в 480 завершённых испытаниях (10 участников \times 6 просмотров \times 8 задач). Помощь предоставлялась либо для предотвращения выполнения участником действия, которое препятствовало бы завершению задачи, либо для исправления неверного восприятия участником, которое препятствовало бы завершению задачи. Подсказки были равномерно распределены по представлениям данных и задачам, но 86 % подсказок потребовались,

когда участники использовали большой набор данных. Ошибки были в равной степени распределены по трем способам представления данных, причем большинство возникало в задачах 7 и 3 (57 и 25 % ошибок соответственно). Две трети ошибок в этих двух задачах возникли при использовании большего набора данных. Это были также две самые медленные задачи, подтверждающие сложность проведения сравнений между уровнями иерархии.

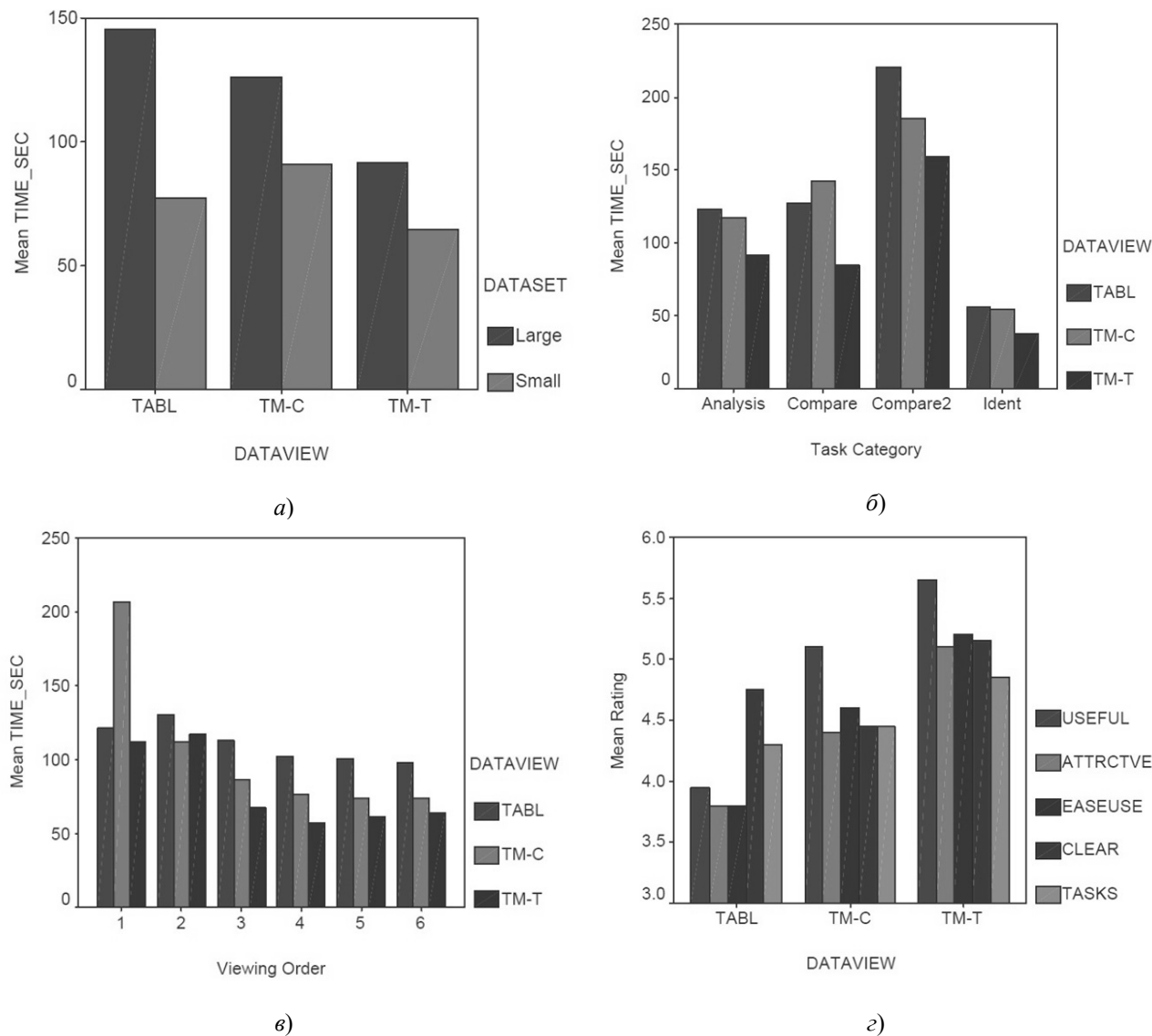


Рис. 4. Результаты экспериментов:

- а* – время выполнения задачи, представление данных и размер набора данных;
- б* – время выполнения задач по категориям задач и видам представления данных;
- в* – время выполнения задачи в порядке просмотра и представления данных;
- г* – средний рейтинг пользователей по данным в диапазоне 1–7

Выполнив восемь заданий в каждом условии, участники заполнили пять 7-балльных рейтинговых шкал, касающихся их опыта с этим условием. В каждом случае оценка 1 была отрицательной (например, «совсем не полезно» или «очень сложно»), тогда как оценка 7 была положительной (например, «очень полезно» или «очень проста»). Средние оценки по конкретным вопросам и видам представления данных показаны на рис. 4,г. Вопросы «Насколько это было привлекательно?» и «Насколько легко это было использовать?» дали очень похожие результаты, с общими оценками для TM-T (в среднем 5,2) выше, чем для TM-C (4,6), что, в свою очередь, было выше, чем представление TABL (3,8). При оценке «Насколько это было полезно?» респонденты считали, что две древовидные карты (5,1–5,6) намного превосходят таблицу (3,9). Вопрос «Насколько ясным и понятным это

было?» произвел аналогичные оценки для трех представлений данных, с 4,5–5,0. На вопрос «Как бы вы оценили вашу способность выполнять сегодняшние задачи?» TABL и TM-C были очень похожи (4,4) и были умеренно ниже, чем для TM-T (4,8).

Оценка качества поддержки решений

Это исследование показало, что пользователи (системные администраторы и сетевые администраторы, привлеченные в качестве экспертов) быстро изучают древовидные карты, которые потенциально превосходят табличные представления для задач идентификации, сравнения и анализа. Формат иерархии заголовков TM-T для древовидных карт был предпочтительнее формата TM-C, который может скрыть основную информацию. Преимущество во времени и в субъективных предпочтениях для древовидных карт заметно как для небольших, так и для больших наборов данных.

Большинство решений для визуализации информации, включая древовидные карты, требуют времени для ознакомления и изучения, прежде чем пользователи смогут эффективно использовать их для решения проблем. Неподготовленные участники проходили обучение в первых опытах, независимо от того, обеспечивали ли представление данных древовидную карту или таблицу. Наиболее быстрое изучение было выявлено по среднему времени завершения в случаях древовидной карты. Следовательно, древовидные карты могут быть быстро изучены теми, кто совершенно не знаком с этой концепцией, и это обучение происходит довольно быстро. Включение четких условных обозначений для размера и цвета, а также обширная информация о подсказках для перемещаемых элементов добавили возможность изучения древовидной карты.

Четыре категории задач были включены в экспериментальные задачи этого исследования. Задачи идентификации были выполнены наиболее быстро при всех трех представлениях данных. Задачи сравнения и открытого анализа выполнялись медленнее, но по времени были похожи друг на друга. Задачи расширенного сравнения на уровне страниц были выполнены медленнее всех из трех представлений данных. Представление TM-T превосходило по времени завершения оба других представления в каждой из этих категорий, в то время как TM-C и TABL обеспечивали аналогичную производительность пользователя в целом. Более высокая производительность TM-T также была отражена в рейтингах пользователей, которым было проще пользоваться, они более привлекательны и понятнее, чем другие представления данных.

Производительность по задачам идентификации была намного более похожа между тремя представлениями данных, чем у более сложных задач сравнения. В задачах идентификации участники либо просматривали строки и заголовки в таблице, либо читали информацию всплывающей подсказки в древовидных картах. Основные различия в производительности задач здесь заключались в том, что: древовидные карты содержали данные, видимые без какой-либо прокрутки; участникам часто приходилось прокручивать верхнюю часть таблицы, чтобы определить свои параметры метрики столбца. Представления древовидной карты позволили проводить более точные сравнения между страницами и группами.

Однако ошибки все еще были очевидны, потому что: некоторые пользователи древовидной карты оценивали размер групп по количеству содержащихся прямоугольников, а не по метрике, которая была отображена в области прямоугольника. Таким образом, области группы (веб-приложения и транзакции) отражают количество прямоугольников, а не выбранную метрику. Другая ошибка: пользователи не всегда искали данные до самых краев древовидной карты, пропуская некоторые важные данные.

Различная плотность данных между большими и маленькими по количеству данных древовидными картами влияла на полезное поле зрения участников (Useful field of view, UFOV), то есть на круговую область, в которой указано, из какого источника извлекается информация. UFOV может быть оценен по расстоянию между двумя последовательными фиксациями глаза в задаче поиска; эти расстояния фиксации уменьшаются с увеличением визуальной плотности фоновой информации. Следовательно, более плотные древовидные карты, вероятно, вызывают меньшее UFOV и требуют большего количества фиксаций, что, в свою очередь, может привести к большему количеству пропущенной информации. Представление TM-T превосходило как по объективной производительности, так и по субъективным предпочтениям представление TM-C. Это произошло, несмотря на то, что для формата TM-T была зарезервирована область экрана для имен групп в заголовках, оставляя меньше места для отображения данных конечного узла. В представлении TM-C участники

не всегда замечали, что шрифты для заголовков транзакций были меньше, чем для заголовка веб-приложения, что могло привести к увеличению количества ошибок и времени выполнения.

Потенциальная возможность дальнейшего развития древовидных карт выявлена в ходе высказывания предложений пользователей, участвовавших в эксперименте. Многие участники предложили дополнительные функции древовидной карты, чтобы помочь в их задачах мониторинга сети. Определяемый пользователем порог, после которого конечные узлы станут красными, позволит им более легко отслеживать проблемные сетевые объекты. Автоматическое обновление, генерируемое системой, требуется через определенные администратором интервалы, например, каждые 30 мин. Фильтрация по одной или нескольким конкретным метрикам позволит быстро анализировать проблемы. Некоторым также требуется предоставление исторического представления метрики данных, чтобы лучше диагностировать проблемы. Некоторые участники также отметили, что непрерывная цветовая шкала не нужна, поскольку дискретных значений цвета достаточно для большинства задач мониторинга и диагностики.

Древовидные карты превосходили несортированные представления таблиц в задачах идентификации, сравнения и анализа в этом исследовании. Это преимущество возросло, когда две метрики информации были объединены, и это дает возможность обнаруживать тенденции. Здесь представление иерархии заголовков превосходило классическое представление с плавающим заголовком из-за меньшего количества затуманивания и путаницы, но особые проблемы дизайна, такие как шрифты и цвета, имеют решающее значение при визуализации данных.

Обсуждение и рекомендации

Эволюция методов визуализации иерархических данных привела к созданию новых способов их отображения, которые могут одновременно применяться с известными способами, взаимно дополняя друг друга.

Рассмотрим преимущества и недостатки «обычных» деревьев решений в аналитике. Деревья решений остаются популярными, так как их легко воспринимать, а также и по другим причинам:

- они могут быть полезны с точными данными или без точных данных, а также любые данные требуют минимальной подготовки;
- новые опции могут быть добавлены к существующим деревьям;
- их ценность в выборе лучшего из нескольких вариантов;
- они легко сочетаются с другими инструментами принятия решений.

Однако деревья решений могут стать чрезмерно сложными. В таких случаях более компактная диаграмма влияния может быть хорошей альтернативой. Диаграммы влияния сужают акцент на критические решения, исходные данные и цели. Деревья решений играют существенную роль в машинном обучении и интеллектуальном анализе данных. Дерево решений также можно использовать для создания автоматизированных прогностических моделей, в которых используются приложения для машинного обучения, интеллектуального анализа данных и статистики. Этот метод, известный как изучение дерева решений, учитывает наблюдения в отношении элемента, чтобы определить его ценность.

Когда узлы представляют данные, а не решения, этот тип дерева используют как дерево классификации. Каждая ветвь содержит набор атрибутов или правил классификации, которые связаны с определенной меткой класса, которая находится в конце ветки. Эти правила, также известные как правила принятия решений, могут быть выражены в предложении if-then. Каждый дополнительный набор данных помогает модели более точно предсказать, какому из конечного набора значений принадлежит рассматриваемый объект. Затем эту информацию можно использовать в качестве входных данных в более широкой модели принятия решений. Иногда прогнозируемой переменной будет действительное число, например, цена. Деревья решений с непрерывными, вещественными результатами называются деревьями регрессии.

Для повышения точности иногда несколько деревьев используются вместе в методах ансамбля:

- создание пакетов предполагает получение нескольких деревьев путем повторной выборки исходных данных, после чего эти деревья используют для достижения консенсуса;
- классификатор случайного леса состоит из нескольких деревьев, предназначенных для увеличения скорости классификации;
- повышенные деревья, которые можно использовать для деревьев регрессии и классификации;

– все деревья в лесу вращения обучаются с использованием метода главных компонент на случайной части данных.

Дерево решений считается оптимальным, когда оно представляет наибольшее количество данных с наименьшим количеством уровней или вопросов. Алгоритмы, предназначенные для создания оптимизированных деревьев решений, включают CART, ASSISTANT, CLS и ID3/4/5. Дерево решений также можно создать, создав правила ассоциации, поместив целевую переменную справа. В каждом методе нужно определить, где лучше сделать разделение и на каком уровне. Обычные методы для этого включают применение коэффициента Джини, извлечение информации и уменьшение дисперсии. Использование деревьев решений в машинном обучении имеет несколько преимуществ:

- стоимость использования дерева для прогнозирования данных уменьшается с каждой дополнительной точкой данных;
- работает для категориальных или числовых данных;
- может моделировать проблемы с несколькими выходами;
- использует модель белого ящика (облегчая объяснение результатов) ;
- надежность дерева может быть проверена и определена количественно;
- имеет тенденцию быть точным независимо от того, нарушает ли оно допущения исходных данных.

Но у них также есть несколько недостатков:

- при работе с категориальными данными с несколькими уровнями прирост информации смещается в пользу атрибутов с наибольшим количеством уровней;
- расчеты могут стать сложными при работе с неопределенностью и множеством связанных результатов.

В появившихся исторически позднее древовидных картах отсутствует ввод вероятности сценария (выбора ветви) как первичное данное, но по размеру и цвету прямоугольника группы исходных данных можно получить наглядное представление об этой величине. Древовидные карты могут предоставлять существенные преимущества по сравнению с табличными данными в корпоративных приложениях благодаря присущей им способности поддерживать интеграцию пользователями разных измерений информации. Представления иерархии древовидных карт значительно различались по поддержке задач идентификации, сравнения и анализа, но были значительно быстрее и точнее, чем представления табличных данных. Изучение древовидной карты было, по крайней мере, таким же успешным, как и для таблиц. Различия в производительности между древовидными картами и таблицами увеличиваются с увеличением размера наборов данных. Субъективные оценки пользователей в подавляющем большинстве случаев поддерживали древовидные карты в табличных представлениях данных. Эти результаты показывают, что древовидные карты должны быть включены в качестве стандартного графического компонента в приложения для анализа и мониторинга данных на уровне предприятия.

Заключение

Тенденции развития древовидных карт являются частью общего процесса развития систем поддержки принятия решений, и достижения в этой области требуют комплексного изучения. Например, сейчас искусственный интеллект позволил людям принимать лучшие решения с помощью интеллектуальных DSS. Новые исследования, регулярно публикуемые по результатам конференций IFIP TC8 / Working Group 8.3 [11], показывают, что лица, принимающие решения, могут действовать более своевременно, используя данные в режиме реального времени, более точно благодаря интеллектуальному анализу данных и методам «больших данных», более стратегически, учитывая большее количество факторов, более инклюзивно, благодаря доступности данных социальных сетей и более широкий доступ к средствам массовой информации с помощью медиатехнологий. Начиная с 2014 г. [13] встречаются утверждения о рождении нового поколения технологий, которому присвоено название DSS2.0.

В рамках общего направления исследований формулируемые темы включают теоретические, эмпирические и проектные исследования; тематические подходы в системах поддержки принятия решений; модели принятия решений в реальном мире; информационные технологии в здравоохранении; теорию принятия решений; управление знаниями; открытие знаний и ресурсов; бизнес-аналитику; системы поддержки принятия групповых решений; «большие данные»; специальные

языки для поддержки принятия решений; мультимедийные инструменты для DSS; системы Web 2.0 в поддержке принятия решений и контекстные технологии для принятия решений; интеллектуальные системы и технологии поддержки принятия решений; методы исследования в DSS 2.0; мобильные DSS; аналитику социальных сетей. Для всех, кто разрабатывает или использует системы поддержки принятия решений, перечисленный список методов и приложений должен дать идеи и указания для вывода собственных разработок на новый технологический уровень.

Список литературы

1. Power D. J., Heavin C. *Decision Support, Analytics, and Business Intelligence*. Third Edition. New York : Business Expert Press, 2017. P. 196
2. Белозерцев А. И., Михеев М. Ю., Прокофьев О. В., Семочкина И. Ю. Методы анализа данных и их реализация в системах поддержки принятия решений. Аспекты инжиниринга информационно-измерительных систем : учеб. пособие. Пенза : Изд-во ПГУ, 2018. 148 с.
3. Прокофьев О. В., Семочкина И. Ю. Методы и средства поддержки принятия решений в социально-экономических задачах. Пенза : Изд-во ПГУ, 2010. 100 с.
4. Долгова И. А., Прокофьев О. В. Компьютерная поддержка принятия решений для управления социально-экономическими системами. Пенза : Изд-во ПГУ, 2012. 116 с.
5. Михеев М. Ю., Прокофьев О. В., Семочкина И. Ю. Методы анализа данных и их реализация в системах поддержки принятия решений : учеб. пособие. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2014. 118 с.
6. Прокофьев О. В. Концепция и способы построения систем поддержки принятия решений на основе интеллектуального анализа данных // Системы интеллектуального анализа данных: методология, реализация, приложения. Пенза : АННОО ПДЗ, 2013. С. 22–40.
7. Тюрин М. В., Фомин С. А., Прокофьев О. В. Разработка моделей прогнозирования состояния элементов технически сложного объекта // Надежность и качество сложных систем. 2016. № 1. С. 73–78.
8. Николаев А. В., Прокофьев О. В., Тюрин М. В., Токарев А. Н. Большие данные для нового качественного уровня электроэнергетики // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2018. Т. 2. С. 102–104.
9. Михеев М. Ю., Прокофьев О. В., Савочкин А. Е. Прогнозирование литеральных ситуаций по коротким временным рядам // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2017. Т. 1. С. 320–324.
10. What is a decision tree? URL: <https://www.lucidchart.com/pages/decision-tree>
11. Phillips-Wren G. E., Carlsson S., Respicio A. *DSS 2.0 – Supporting Decision Making With New Technologies*. IOS Press, 2014. P. 604.
12. Goldberg J. H., Helfman J. Enterprise Network Monitoring Using Treemaps. *Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting Proceedings*. September. 2005. P. 671–675. doi: 10.1177/154193120504900508.
13. International Federation For Information Processing. Technical Committee 8. Working Group 8.3. URL: <http://ifip8.dsi.uminho.pt/index.php/events?wg=8.3>

References

1. Power D.J., Heavin C. *Decision Support, Analytics, and Business Intelligence*. Third Edition. New York: Business Expert Press, 2017:196.
2. Belozertsev A.I., Mikheev M.Yu., Prokofev O.V., Semochkina I.Yu. *Metody analiza dannykh i ikh realizatsiya v sistemakh podderzhki prinyatiya resheniy. Aspekty inzhiniringa informatsionno-izmeritel'nykh sistem: ucheb. posobie = Methods of data analysis and their implementation in decision support systems. Aspects of information and measurement systems engineering : textbook*. Penza: Izd-vo PGU, 2018:148. (In Russ.)
3. Prokofev O.V., Semochkina I.Yu. *Metody i sredstva podderzhki prinyatiya resheniy v sotsial'no-ekonomicheskikh zadachakh = Methods and means of decision support in socio-economic problems*. Penza: Izd-vo PGU, 2010:100. (In Russ.)
4. Dolgova I.A., Prokofev O.V. *Komp'yuternaya podderzhka prinyatiya resheniy dlya upravleniya sotsial'no-ekonomicheskimi sistemami = Computer-based decision support for managing socio-economic systems*. Penza: Izd-vo PGU, 2012:116. (In Russ.)
5. Mikheev M.Yu., Prokofev O.V., Semochkina I.Yu. *Metody analiza dannykh i ikh realizatsiya v sistemakh podderzhki prinyatiya resheniy: ucheb. posobie = Methods of data analysis and their implementation in decision support systems: textbook*. Penza: Izd-vo PGU, 2014:118. (In Russ.)
6. Prokofev O.V. The concept and methods of building decision support systems based on data mining. *Sistemy intellektual'nogo analiza dannykh: metodologiya, realizatsiya, prilozheniya = Data mining systems: methodology, implementation, applications*. Penza: ANNOO PDZ, 2013:22–40. (In Russ.)

7. Tyurin M.V., Fomin S.A., Prokofev O.V. Development of models for predicting the state of elements of a technically complex object. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system* = Reliability and quality of complex systems. 2016;1:73–78. (In Russ.)
8. Nikolaev A.V., Prokofev O.V., Tyurin M.V., Tokarev A.N. Big data for a new qualitative level of the electric power industry. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality. 2018;2:102–104. (In Russ.)
9. Mikheev M.Yu., Prokofev O.V., Savochkin A.E. Predicting literal situations over short time series. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality. 2017;1:320–324. (In Russ.)
10. *What is a decision tree?* Available at: <https://www.lucidchart.com/pages/decision-tree>
11. Phillips-Wren G.E., Carlsson S., Respício A. *DSS 2.0 – Supporting Decision Making With New Technologies*. IOS Press, 2014:604.
12. Goldberg J.H., Helfman J. *Enterprise Network Monitoring Using Treemaps. Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting Proceedings*. September. 2005:671–675. doi: 10.1177/154193120504900508.
13. *International Federation For Information Processing. Technical Committee 8. Working Group 8.3*. Available at: <http://ifiptc8.dsi.uminho.pt/index.php/events?wg=8.3>

Информация об авторах / Information about the authors

Михаил Юрьевич Михеев

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой информационных
технологий и систем,
Пензенский государственный
технологический университет
(Россия, г. Пенза, проезд Байдукова/ул. Гагарина, 1а/11)
E-mail: mix1959@gmail.com

Олег Владимирович Прокофьев

кандидат технических наук, доцент
кафедры математики и информатики,
Пензенский государственный
технологический университет
(Россия, г. Пенза, проезд Байдукова/ул. Гагарина, 1а/11)
E-mail: prokof_ow@mail.ru.

Ирина Юриевна Семочкина

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры информационных технологий и систем,
Пензенский государственный
технологический университет
(Россия, г. Пенза, проезд Байдукова/ул. Гагарина, 1а/11)
E-mail: ius1961@gmail.com

Mikhail Yu. Mikheev

Doctor of technical sciences, professor,
head of sub-department of informational technologies
and systems,
Penza State Technological University
(1a /11 Baydukov passage /Gagarin street,
Penza, Russia)

Oleg V. Prokofev

Candidate of technical sciences, associate professor
of sub-department of mathematics and computer science,
Penza State Technological University
(1a /11 Baydukov passage /Gagarin street,
Penza, Russia)

Irina Yu. Semochkina

Candidate of technical sciences, associate professor,
associate professor of sub-department of informational
technologies and systems,
Penza State Technological University
(1a /11 Baydukov passage /Gagarin street,
Penza, Russia)

К ПРОБЛЕМЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ АНТЕННЫ ВИВАЛЬДИ ДЛЯ ИЗЛУЧЕНИЯ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИМПУЛЬСА

А. И. Мельничук¹, Н. В. Горячев², Н. К. Юрков³

¹ Учебная авиационная база Краснодарского высшего военного авиационного училища летчиков МО РФ,
Ртищево, Россия

^{2,3} Пензенский государственный университет, Пенза, Россия
¹ pelmenio@mail.ru, ² ra4foc@yandex.ru, ³ yurkov_NK@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Проблеме подавления и/или поражения электронных систем управления беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) посвящено множество работ, в числе которых недостаточное внимание уделяется системам подавления сверхмалых БПЛА, не имеющих дополнительных средств защиты бортовой электронной аппаратуры. Однако, подобные аппараты особенно опасны при полете в «стае». Одним из основных методов подавления является облучение сверхкороткими электромагнитными импульсами. Созданию излучателя подобных сверхширокополосных электромагнитных импульсов и оценке их эффективности посвящена настоящая работа. *Материалы и методы.* Неустраняемое повреждение на полупроводниковых переходах возникает под действием электромагнитного перенапряжения, что становится возможным при наличии эффективной антенной системы, способной без потерь передать мощность сверхкоротких СВЧ импульсов. Предложен излучатель в виде антенны Вивальди, который обладает необходимыми техническими характеристиками. Предложена методика расчета подобной антенны в системе многофункционального подавления БПЛА. *Результаты.* Проведены приближительный расчет и оптимизация в системе автоматизированного проектирования; проверка полученных результатов при моделировании антенны; а также проверка полученных результатов при моделировании антенны. *Выводы.* Методом конечных элементов проведен расчет антенны Вивальди, предложен генетический алгоритм оптимизации полученной антенны, с помощью которого удалось добиться приемлемых характеристик излучателя. Сделан вывод об актуальности использования фазированной антенной решетки на основе антенны Вивальди.

Ключевые слова: беспилотные летательные аппараты, электромагнитное излучение, бортовая электронная аппаратура, средства подавления или поражения, СВЧ излучение, антенны, моделирование.

Для цитирования: Мельничук А. И., Горячев Н. В., Юрков Н. К. К проблеме автоматизированного проектирования антенны Вивальди для излучения сверхширокополосного электромагнитного импульса // Надежность и качество сложных систем. 2021. № 1. С. 87–101. doi:10.21685/2307-4205-2021-1-9

ON THE PROBLEM OF COMPUTER-AIDED DESIGN OF THE VIVALDI ANTENNA FOR THE EMISSION OF AN ULTRA-WIDEBAND ELECTROMAGNETIC PULSE

A.I. Mel'nichuk¹, N.V. Goryachev², N.K. Yurkov³

¹ Aviation Base of the Krasnodar Higher Military Aviation School of Pilots of Russian Ministry of Defense,
Rtishchevo, Russia

^{2,3} Penza State University, Penza, Russia
¹ pelmenio@mail.ru, ² ra4foc@yandex.ru, ³ yurkov_NK@mail.ru

Abstract. *Background.* The problem of suppression and / or destruction of electronic control systems of unmanned aerial vehicles (UAVs) is devoted to many works, including insufficient attention to suppression systems for ultra-small UAVs that do not have additional means of protection of onboard electronic equipment. However, such devices are especially dangerous when flying in a "flock". One of the main suppression methods is ultrashort electromagnetic pulse irradiation. The present work is devoted to the creation of an emitter of such UWPS and the assessment of their efficiency. *Materials and methods.* Fatal damage on semiconductor junctions arises under the influence of electromagnetic overvoltage, which becomes possible in the presence of an effective antenna system capable of

transmitting the power of ultrashort microwave pulses without loss. A radiator in the form of a Vivaldi antenna, which has the necessary technical characteristics, is proposed. A method is proposed for calculating such an antenna in a multifunctional UAV suppression system. *Results.* Approximate calculation and optimization in the computer-aided design system have been carried out; verification of the results obtained when simulating the antenna; as well as verification of the results obtained when simulating the antenna. *Conclusions.* The finite element method was used to calculate the Vivaldi antenna, a genetic algorithm for optimizing the resulting antenna was proposed, with the help of which it was possible to achieve acceptable characteristics of the emitter. A conclusion is made about the relevance of using a phased antenna array based on a Vivaldi antenna.

Keywords: unmanned aerial vehicles, electromagnetic radiation, onboard electronic equipment, means of suppression or destruction, microwave radiation, antennas, modeling

For citation: Mel'nichuk A.I., Goryachev N.V., Yurkov N.K. On the problem of computer-aided design of the vivaldi antenna for the emission of an ultra-wideband electromagnetic pulse. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2021;1:87–101. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2021-1-9

Введение

Технология функционального подавления беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) предусматривает использование электромагнитного излучения (ЭМИ) малой длительности (от долей до десятков наносекунд). Возможны два варианта воздействия таких ЭМИ на электронную аппаратуру: внутрисполосное или внеполосное [1, 2].

Внеполосное функциональное подавление предусматривает воздействие на приемные устройства радиоэлектронных средств (РЭС) на любых частотах вне их полос пропускания и не требует исходных данных по рабочему диапазону частот [3, 4].

Внутрисполосные способы функционального подавления предусматривают потери энергии воздействующего ЭМИ при прохождении через входные цепи приемника РЭС, зависящие от соотношения между полосой пропускания приемного тракта и шириной спектра, воздействующего ЭМИ. Внутрисполосные способы являются энергетически наиболее выгодными, но требуют исходных данных о технических характеристиках функционирования СВЧ излучения на БПЛА, поражаемых или подавляемых РЭС, например, о рабочей частоте и полосе пропускания приемных устройств, тактовой частоте управляющих спецвычислителей и компьютеров, резонансной частоте конструкций крепежа радиоэлектронных элементов на платах и т.д. [5, 6].

Известны три принципиально отличающихся направления реализации средств функционального подавления с малой длительностью мощных ЭМИ:

- 1) искровые и полупроводниковые генераторы видеоимпульсов;
- 2) релятивистские генераторы СВЧ радиоимпульсов;
- 3) передающие многопозиционные системы излучения (МСИ) и фазированные антенные решетки с управляемой фокусировкой ЭМИ в СВЧ диапазоне.

Наибольшее распространение получило третье направление реализации, основанное на фазированных антенных решетках.

Результатом воздействия сверхкоротких СВЧ радиоимпульсов являются [7, 8]:

– помехи: источник излучения создает напряженность электромагнитного поля в диапазоне рабочих частот приемного устройства цели; эта напряженность такая же по величине или больше полезного сигнала – приемное устройство не может выделить полезный сигнал;

– ложная информация: наведенный электромагнитный сигнал создает ложную информацию на приемном устройстве;

– переходная дестабилизация: наведенное напряжение воздействует на логическое состояние электронного компонента;

– неустраняемое повреждение: полупроводниковые переходы подвергаются воздействию перенапряжения, что выводит их из строя. Однако это становится возможным при наличии эффективной антенной системы, способной без потерь передать мощность сверхкоротких СВЧ импульсов.

Учитывая, что с проектированием устройства связана проблема СВЧ излучения в сверхшироком диапазоне, целесообразно рассмотреть антенну, работающую в широкой полосе частот. Для создания антенно-фидерного устройства предлагается рассмотреть антенну TSA (от английского *Tapered Slot Antenna* – антенна, обладающая расширяющейся щелью), которая отвечает требованиям по созданию устройства функционального подавления систем беспилотного летательного аппарата путем излучения сверхширокого сверхкороткого электромагнитного импульса.

Антенны Вивальди (излучатели на основе симметричных щелевых линий, далее – антенны Вивальди) обладают необходимыми техническими характеристиками: 1) малые габаритные размеры; 2) малый вес излучателя; 3) необходимая диаграмма направленности, создаваемая на всем диапазоне рабочих частот; 4) способность излучать сверхкороткие импульсы [9, 10].

Кроме заявленных требований, необходимо отметить и простоту конструкции данного типа излучателей, а также возможность работы в широком диапазоне частот. Суммируя данные достоинства, целесообразно рассчитать и рассмотреть излучатель подобного типа для дальнейшего моделирования и возможной апробации.

Рабочая полоса при расчете больше всего зависит от выбранной частоты. Как правило, она ухудшает согласование на выходе. Также рабочая полоса зависит от изменения максимума диаграммы направленности, расширения луча и других параметров [11, 12].

Широкополосными антеннами принято считать такие антенны, рабочая полоса которых должна составлять от 10–50 % номинальной частоты. Антенна Вивальди считается широкополосной антенной и рассматривается как излучатель сверхкоротких импульсов в ряде работ. Учитывая вышесказанное, нужно учесть, что выбранная рабочая частота – 8 ГГц (а действующий неблагоприятно на электронные радиоэлементы частотный диапазон от 5 до 8 ГГц) для дальнейших расчетов.

Первоначально уместно рассматривать излучатель такого рода как нерегулярную линию передачи, согласующую регулярную линию со свободным пространством. Коэффициент отражения на входе устройства согласования необходимо минимизировать (вместе с ним изменяются волновое сопротивление и длина перехода). Таким образом достигаются удовлетворительные частотные характеристики (в щелевых линиях могут распространяться Т-волны и квази Т-волны).

Для более точного определения характеристик применяются другие методы расчета электромагнитного поля вдоль всей щелевой антенны [13, 14]. Применяется ступенчатая аппроксимация секциями, отрезками щели постоянной ширины, к расширяющейся щели по экспоненциальному закону, это дает также приближенный, но более точный метод расчета. Для подобных секций уже известно распределение поля, полученное методом Галеркина в спектральной области. Таким образом, поле всей щелевой антенны может быть определено как сумма поля каждой секции.

Согласно второй части метода определяется поле щелевой антенны с амплитудным распределением поля в щели, полученным ранее в первой части, исходя из этого можно учесть диэлектрическую подложку в вычислениях (в случае исполнения антенны на слое печатной платы), также дифракцию волны на ребрах излучателя бесконечной высоты.

Приведенные методы громоздки, неудобны. Для приближенного инженерного расчета, электродинамического моделирования вполне пригодны программные комплексы для расчета различных видов антенн. Для приближенного расчета и моделирования антенны целесообразно воспользоваться системами автоматизированного проектирования CST Microwave Studio и HFSS Microwave Office ввиду того, что теория антенн Вивальди довольно сложна в области электродинамики (данная антенна является антенной бегущей волны). Как правило, параметры антенны подбираются эмпирически.

Для дальнейшего моделирования антенны Вивальди уместно воспользоваться HFSS.

Приближительный расчет и оптимизация в системе автоматизированного проектирования

Расчет фактической длины антенны проводим согласно

$$L = L_{eff} - 2\Delta L,$$

$$W_{Total} = \frac{c}{2f_0 \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}}},$$

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[\frac{1}{\sqrt{1 + 12 \left(\frac{h}{W} \right)}} \right],$$

$$L_{Total} = \frac{c}{2f_0\sqrt{\epsilon_{eff}}} - 0,824 \frac{(\epsilon_{eff} + 0,3)\left(\frac{W}{h} + 0,264\right)}{(\epsilon_{eff} - 0,258)\left(\frac{W}{h} + 0,8\right)}$$

Геометрия раскрыва рассчитана по формулам:

$$W_{max} = \frac{c}{2f_{min}\sqrt{\epsilon_r}},$$

$$W_{min} = \frac{c}{2f_{max}\sqrt{\epsilon_r}},$$

где c – скорость распространения электромагнитной волны в вакууме; f_{min} – минимальная рабочая частота; f_{max} – максимальная рабочая частота; ϵ_r – диэлектрическая проницаемость.

Ширина щели антенны определяется

$$W(x) = W_0 \exp \left[\ln(W_L) \left(\frac{x}{L} \right)^\alpha \right] - (W_0 + b),$$

где W_0 – длина антенны; W_L – общая ширина антенны; b – минимальное значение раскрыва конуса; $\alpha = 0,7$.

Скрин-шот экрана представлен на рис. 1.

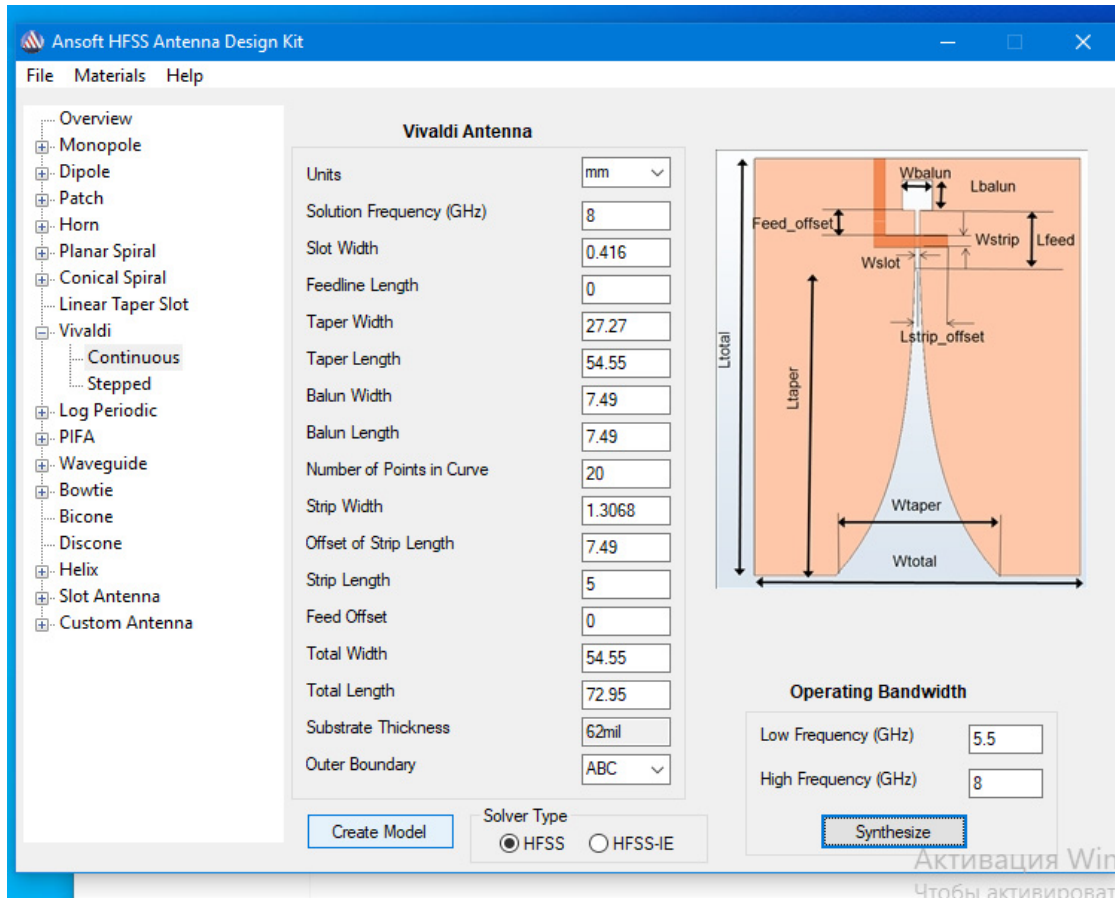


Рис. 1. Скриншот программы расчета. Геометрические размеры, полученные при приближенном расчете

На рис. 2 представлена зависимость коэффициента отражения от частоты.

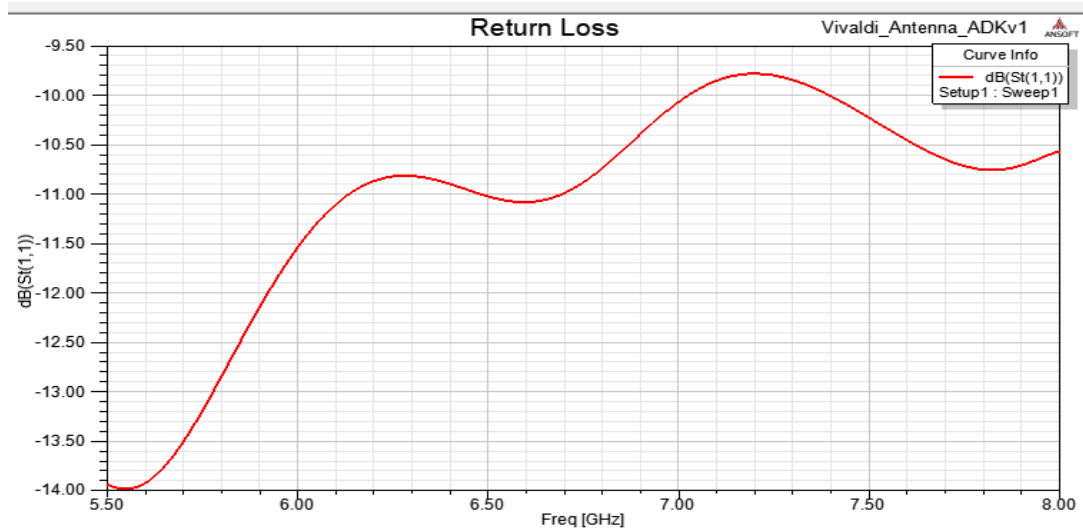


Рис. 2. Зависимость коэффициента отражения от частоты

Как видно из графика (рис. 2), коэффициент отражения на частоте 8 ГГц равен $-10,5$ дБ, что довольно мало, хороший результат начинается от -20 дБ. Более того, начиная с 6 ГГц, он растёт.

Для дальнейшего рассмотрения данного вида антенны необходимо выполнить оптимизацию антенны.

Целесообразно оптимизировать длину антенны, ее ширину, размер первоначального раскрыва. Но также необходимо учесть, что массо-габаритные показатели не должны выходить за пределы желаемых результатов.

Первоначально возможно рассмотреть влияние W_{slot} (размер первоначального раскрыва) на коэффициент отражения (рис. 3).

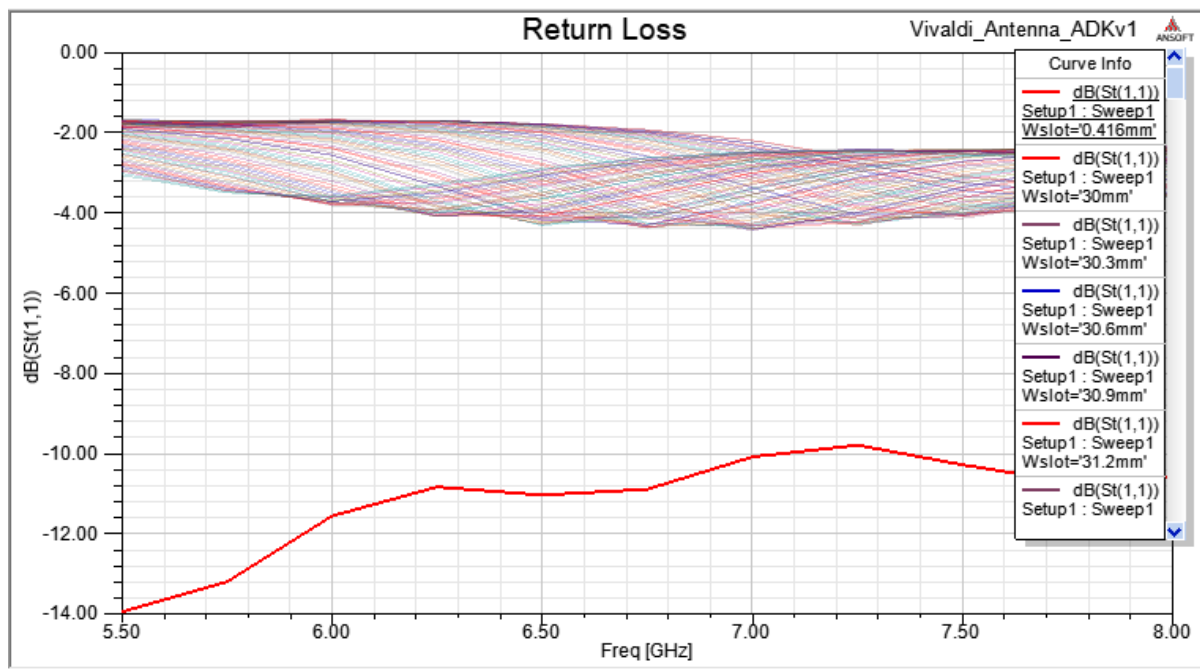


Рис. 3. Оптимизация коэффициента отражения путем изменения размера первоначального раскрыва антенны

Как видно из построенного графика оптимизации, при увеличении показателя увеличивается коэффициент отражения, что является нежелательным.

После неудачной оптимизации предыдущего параметра проведена оптимизация L_{total} (длина антенны) (рис. 4).

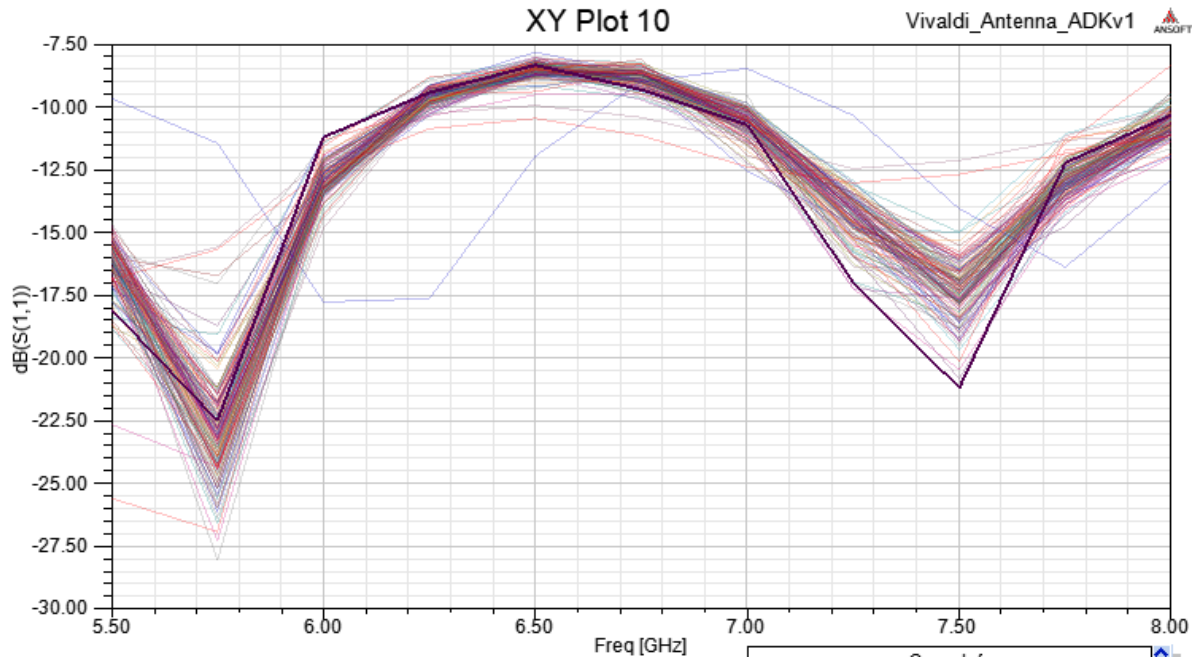


Рис. 4. Оптимизация коэффициента отражения путем изменения длины антенны

На приведенном графике можно выделить ломанную, удовлетворяющую минимальным требованиям коэффициента отражения. При первоначальной оптимизации был выбран «генетический» алгоритм.

Было установлено, что при оптимальном коэффициенте отражения длина антенны стала 228,5 мм, что, в принципе, удовлетворяет предстоящим условиям эксплуатации. График приведен на рис. 5.

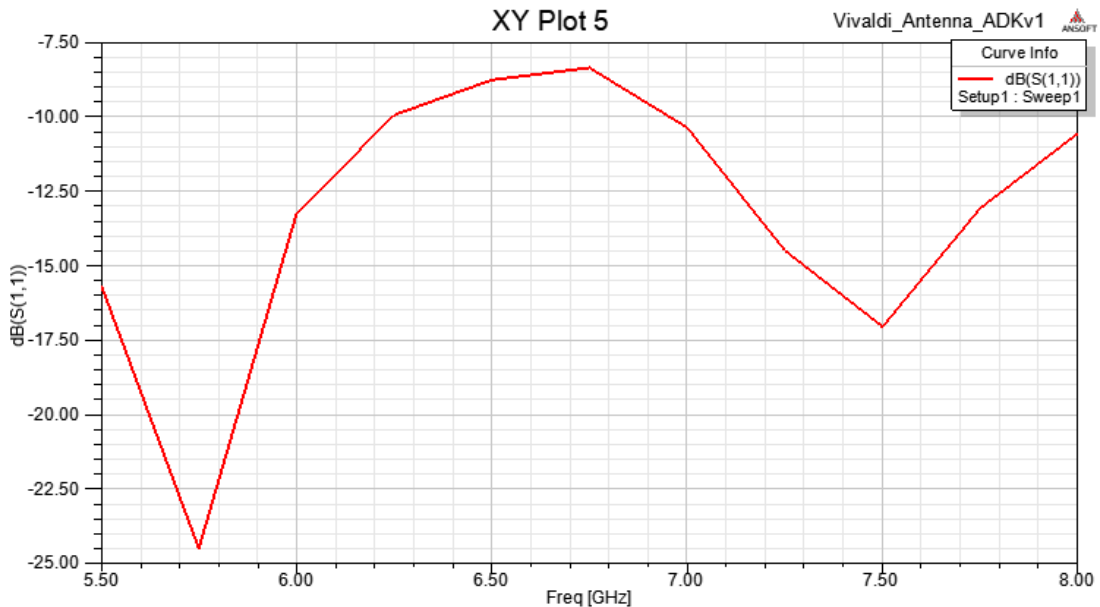


Рис. 5. Результаты «грубой» оптимизации в системе автоматизированного проектирования

Таким образом, при грубой оптимизации удалось уменьшить коэффициент отражения до приемлемого на частоте 5,7 ГГц, но так как антенна предполагается сверхширокополосная, следовательно, целесообразно провести дальнейшую оптимизацию, чтобы коэффициент отражения стал приемлем и на других частотах.

Как видно из графиков оптимизации, с уменьшением размера ширины антенны уменьшается коэффициент отражения. Учитывая это, была выбрана ломаная, с размерами, соответствующими значениям 39,5 мм (на графике представлен и более удачный размер в области 5,6 ГГц, но в области 7,5 ГГц он не удовлетворяет заданным характеристикам) (рис. 6).

Таким образом, геометрические размеры изменились после оптимизации.

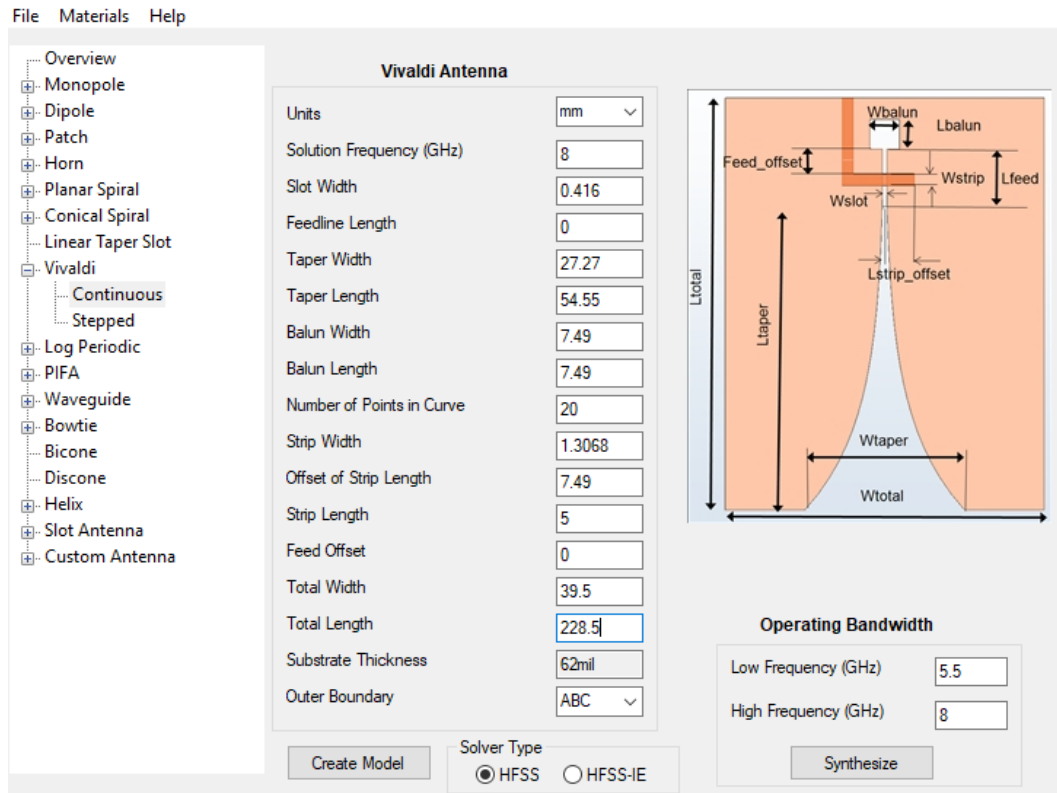


Рис. 6. Полученные геометрические размеры антенны после оптимизации

Проверка полученных результатов при моделировании антенны

Для проверки полученной геометрии антенны рассмотрим график изменения коэффициента отражения, полученного в ходе моделирования антенной системы после ее оптимизации (рис. 7).

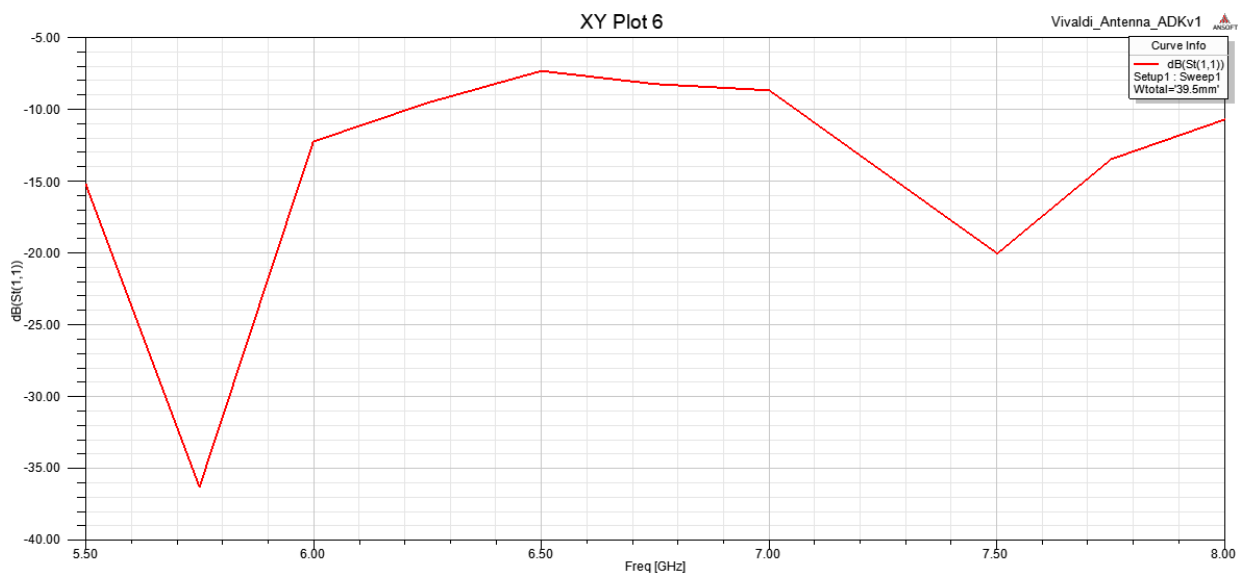


Рис. 7. График коэффициента отражения в результате моделирования оптимизированной антенны

Различия в графиках рис. 5 и 7 вызваны изменением активного и реактивного сопротивлений, вызванных изменением геометрических размеров антенны.

Как следует из анализа графика изменения коэффициента отражения, минимумы значений достигаются в двух точках на частотах в 5,6; 7,5 ГГц. Указанные частоты лежат в области желаемых, так как действуют отрицательно на БРЭА подавляемых БПЛА.

Для построения диаграммы направленности используются формулы:

– в плоскости H ($\varphi = 0$):

$$F_{\varphi}(\theta) = \frac{2 \cos \theta}{\sqrt{\cos^2 \theta + (\xi \operatorname{ctg} \xi k_0 d)^2}} \cdot \left(\frac{\sin(0,5 k_0 a \sin \theta)}{0,5 k_0 a \sin \theta} \right);$$

– в плоскости E ($\varphi = \pi/2$):

$$F_{\varphi}(\theta) = \frac{2 \xi \cos \theta \cos(0,5 k_0 b \sin \theta)}{\sqrt{\xi^2 + (\epsilon \mu \cos \theta \operatorname{ctg} \xi k_0 d)^2} \left(1 - \left(k_0 \frac{b}{\pi} \sin \theta \right)^2 \right)},$$

где d – толщина; a – ширина; b – длина антенны; $k = \beta/\epsilon\mu$; β – постоянная распространения; ϵ – диэлектрическая проницаемость; μ – магнитная проницаемость;

$$\xi = \sqrt{\epsilon\mu - \sin^2 \theta}.$$

Коэффициент направленного действия определен выражением

$$D = \frac{4\pi U}{P_{rad}},$$

где U – интенсивность излучения; P_{rad} – мощность излучения.

Мощность интенсивного излучения

$$U(\theta, \varphi) = \frac{|E|^2}{\eta_0} r^2,$$

где $|E|$ – модуль E -поля; r – расстояние от антенны; η – импеданс свободного пространства, равный 376,7 дБ.

В ходе проведения моделирования диаграмм направленности получена 3D-визуализация диаграммы направленности (рис. 8), а также 2D-визуализация (рис. 9).

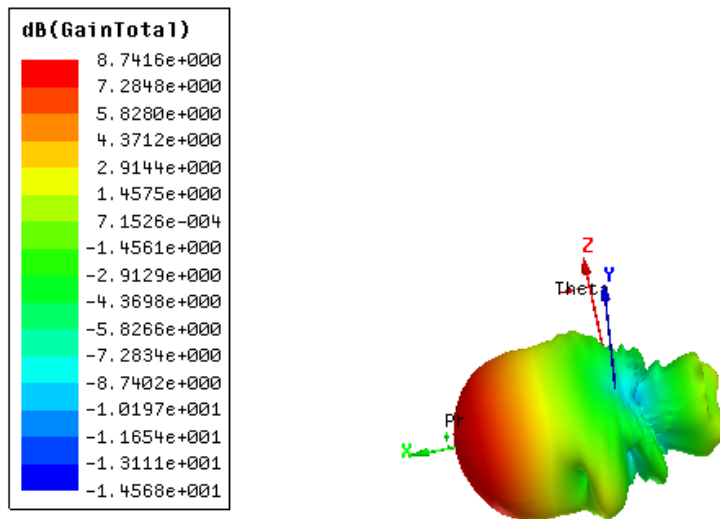


Рис. 8. Диаграмма направленности в трехмерном пространстве

Согласно приведенным результатам ширина диаграммы направленности достаточна для поставленной цели, максимальное значение усиления в области, помеченной красным цветом, составляет 8,7 дБ.

2D-диаграмма направленности выглядит следующим образом (рис. 9).

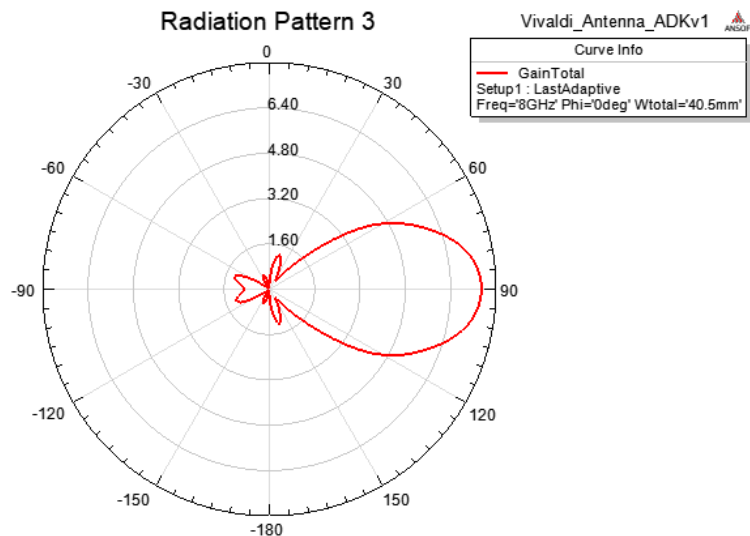


Рис. 9. Диаграмма направленности в двумерном пространстве

Из графика полярных координат следует, что ширина диаграммы направленности на уровне половины мощности соответствует 60° , достаточно широкая. Уровень боковых лепестков очень низкий, не более 13 % [15, 16].

Рассмотрим график поляризации в E и H области (рис. 10).

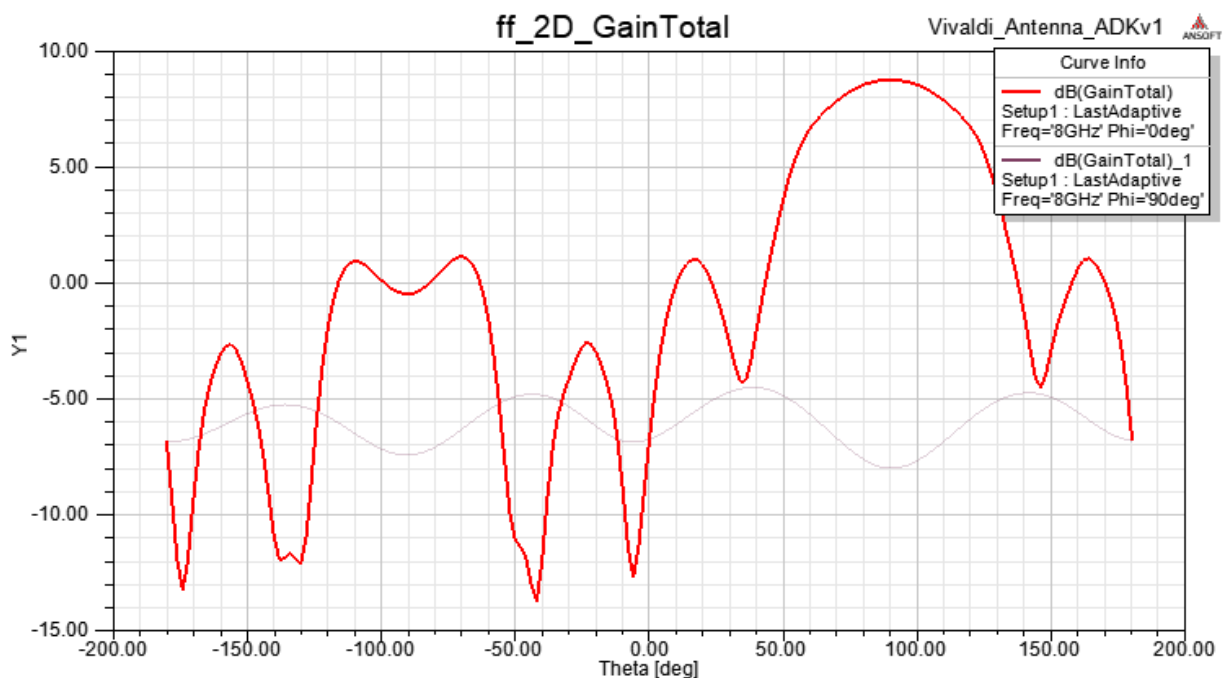


Рис. 10. График поляризации в E области

График повторяет диаграмму направленности в полярной системе координат, но для удобства представлен в прямоугольной. Коэффициент усиления главного лепестка – 8,7 дБ.

Подобный график поляризации в H -области дан на рис. 11. Анализ графика рис. 11 указывает на удовлетворительные характеристики проектируемой антенны.

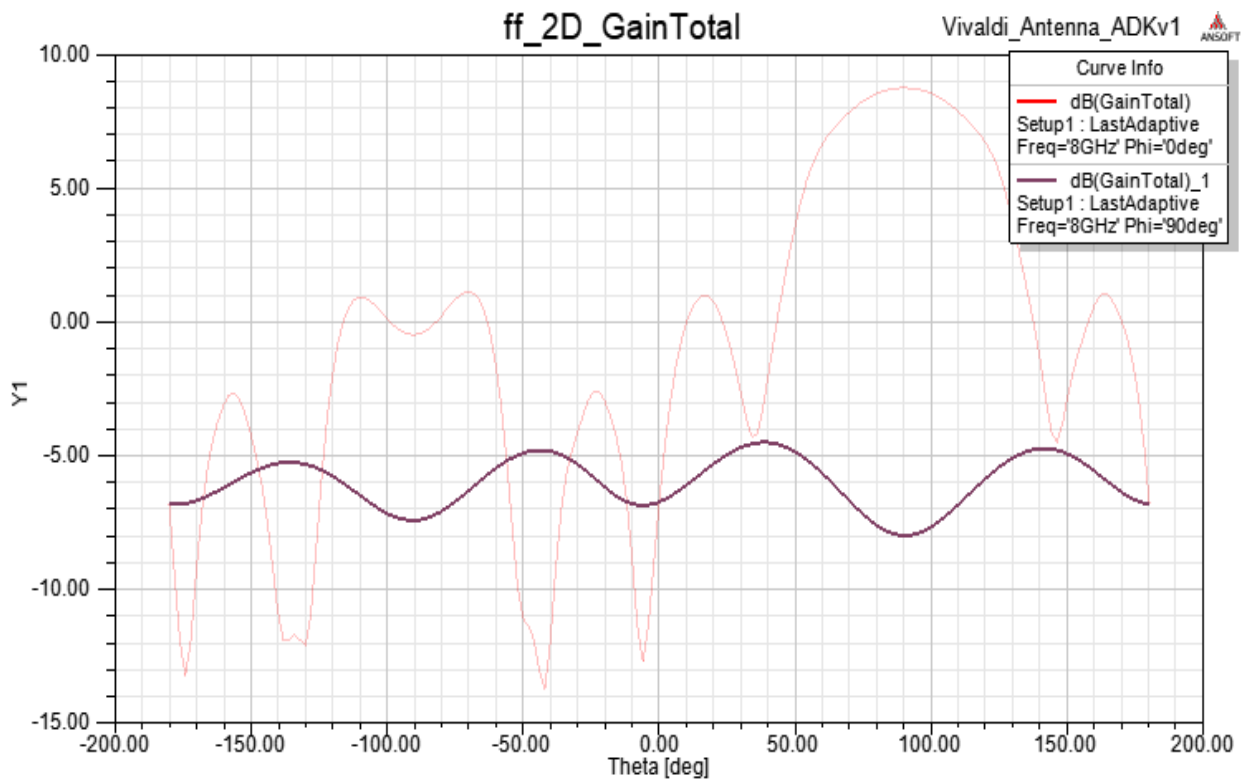


Рис. 11. График поляризации в H -области

В ходе моделирования антенной системы получена диаграмма Смита (рис. 12).

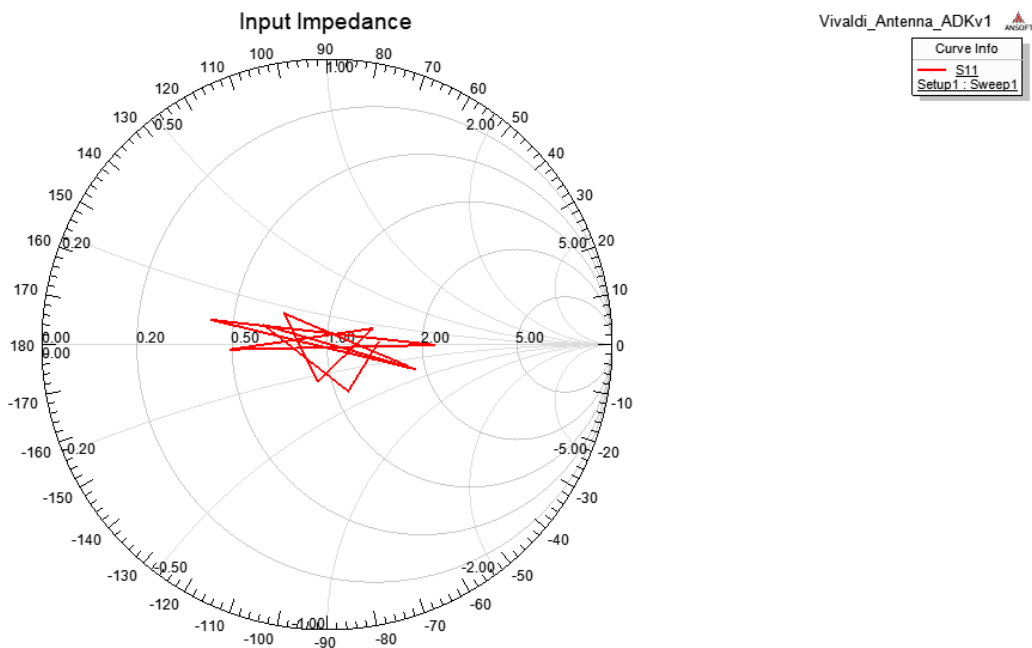


Рис. 12. Диаграмма Смита

Анализ диаграммы Смита подтверждает успешность проведенного исследования.

Далее проведем моделирование излучения антенны как в E -поле (рис. 13), так и в A -составляющей (рис. 14).

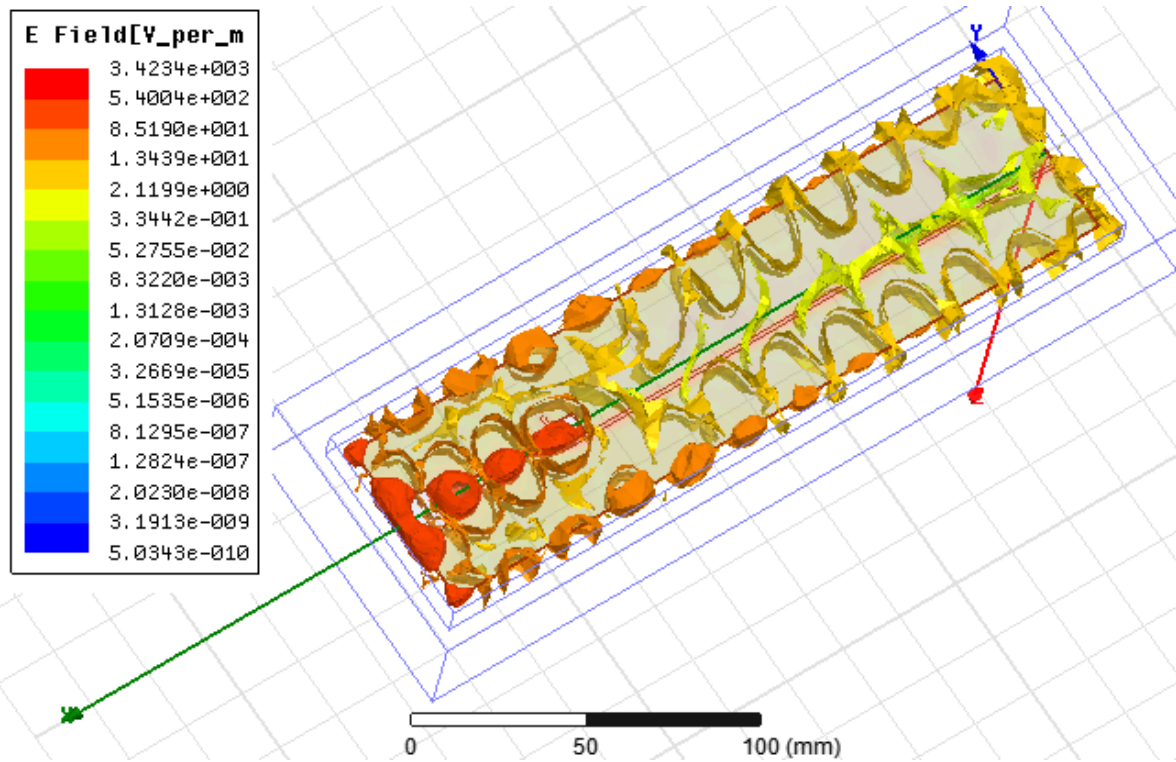


Рис. 13. Излучение E -поля антенны

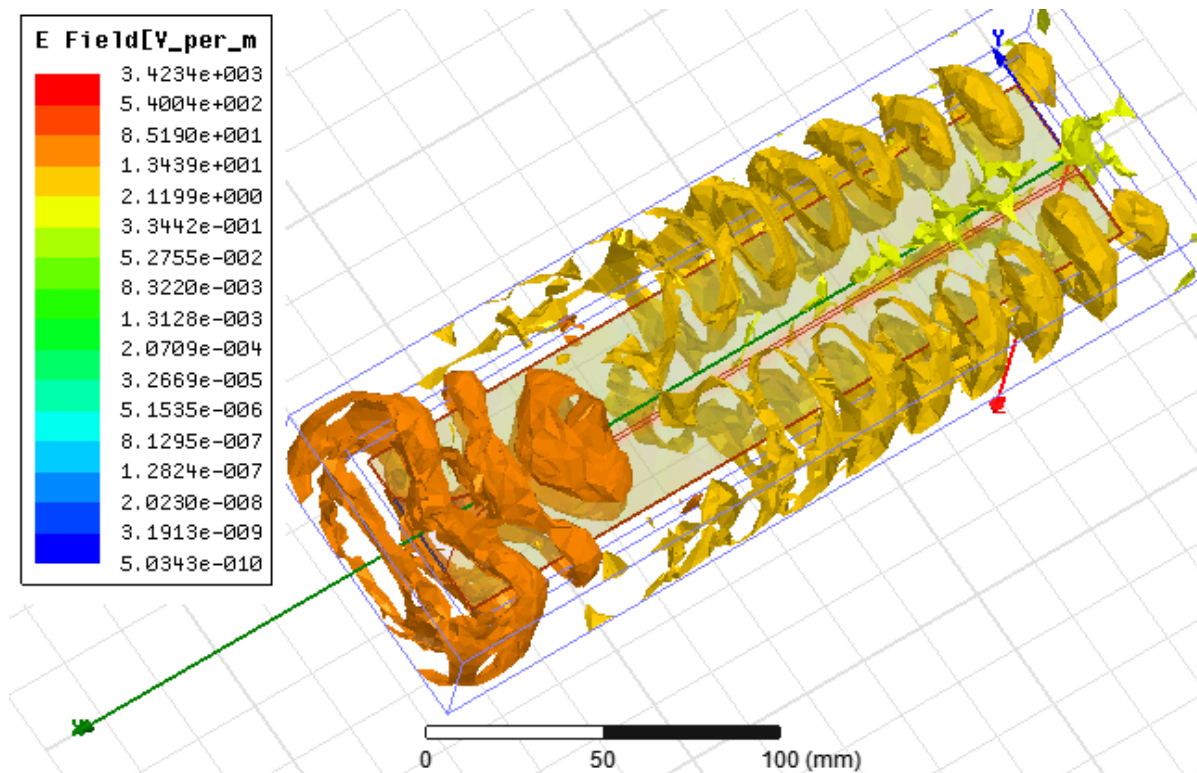
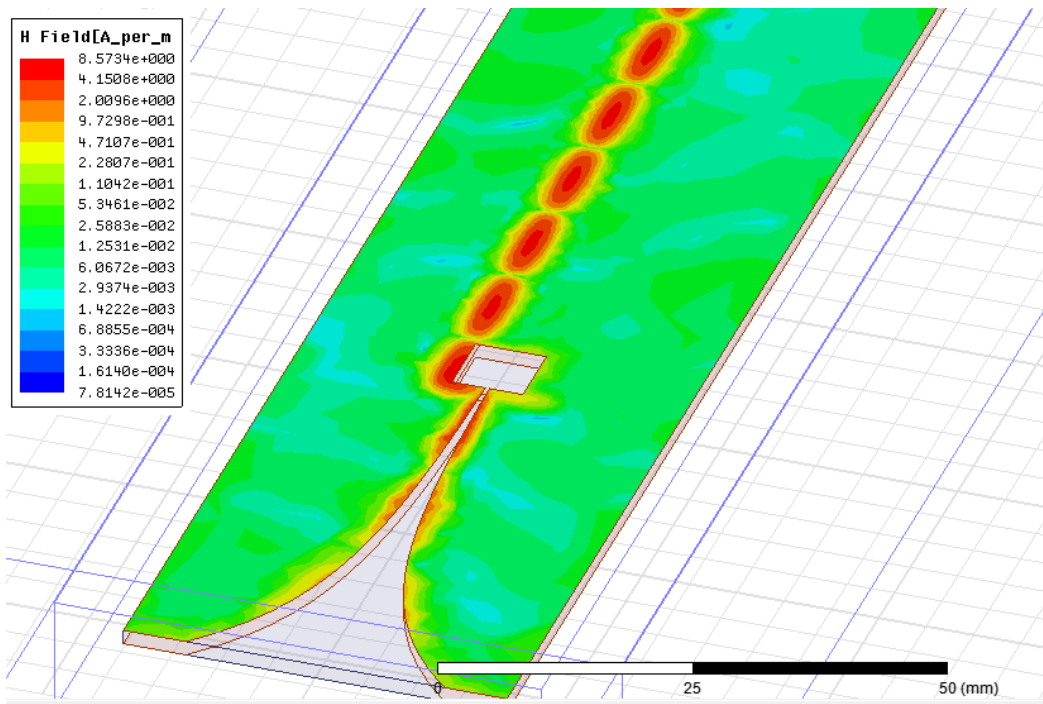


Рис. 14. Излучение H -поля антенны

Как показано на представленном моделировании излучения E -поля, видно сильное излучение электромагнитного поля, отмеченного на приведенном скриншоте оранжевым и желтым цветами.

В излучении H -поля наблюдается похожая картина (рис. 14).

Рис. 14. Излучение H -поля антенны

Анализ рис. 14 дает подтверждение сделанным выводам.

Заключение

Используя метод конечных элементов, удалось произвести анализ результатов, расчетов и моделирования антенны Вивальди, генетический алгоритм оптимизации полученной антенны Вивальди (за счет изменения геометрических размеров), добиться приемлемых характеристик излучателя. Исходя из практического опыта, как правило, достаточно упрощенной идеализированной модели, учитывающей взаимное влияние электронных радиоэлементов, характеристик фильтров и катушек.

На основании полученных результатов можно судить об актуальности использования подобных типов антенн в излучении сверхширокополосных систем. С инженерной точки зрения также вызывает интерес построение на основе антенны Вивальди фазированной антенной решетки, излучающей в указанном диапазоне [17–19].

Список литературы

1. Патент 2700206 Российская Федерация, В64С 99/00(2019.09) Н04К 3/00(2019.09) F41Н 13/00(2019.09). Способ двухфакторного функционального подавления беспилотного летательного аппарата / Юрков Н. К., Горячев Н. В., Кузина Е. А. № 2018114720 ; заявл. 20.04.2018 ; опубл. 13.09.2019, Бюл. № 26.
2. Патент 2700207 Российская Федерация, МПК В64С 99/00(2019.09) Н04К 3/00(2019.09) F41Н 13/00(2019.09) F42В 12/36(2019.09). Способ функционального подавления беспилотного летательного аппарата / Юрков Н. К., Горячев Н. В., Кузина Е. А. № 2018142886 ; заявл. 05.12.2018 ; опубл. 13.09.2019, Бюл. № 26.
3. Gross F. G. *Frontiers in Antennas : Next Generation Design & Engineering*. The McGraw-Hill Companies, 2011. 526 p.
4. Бобрешов А. М., Мещеряков И. И., Усков Г. К. Моделирование генератора сверхкоротких импульсов совместно с антенной Вивальди // *Вестник Воронежского государственного университета. Сер.: Системный анализ и информационные технологии*. 2014. № 3. С. 81–85.
5. *Устройства СВЧ и антенны. Проектирование фазированных антенных решеток* / ред. Д. И. Воскресенский. М. : Радиотехника, 2012. 744 с.
6. Мительман Ю. Е. *Проектирование антенных систем в ansoft hfss*. Екатеринбург, 2012.
7. Чернышев С. Л., Виленский А. Р. Разработка излучателей для сверхкороткоимпульсных антенных решеток // *Радиолокация. Навигация. Связь : докл. XVII Междунар. науч.-техн. конф. Воронеж, 2011*. С. 2159–2170.

8. Согомоян К. Э. Воздействие ультракоротких импульсов электромагнитного излучения на беспилотные летательные аппараты // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2019. Т. 2. С. 315–317.
9. Мельничук А. И., Горячев Н. В., Юрков Н. К. Способы и средства противодействия БПЛА // Надежность и качество сложных систем. 2020. № 4. С. 131–138.
10. Гришко А. К. Оптимальное управление частотным ресурсом радиотехнических систем на основе вероятностного анализа динамики информационного конфликта // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2016. № 57. С. 21–28. doi: 10.21667/1995-4565-2016-57-3-21-28.
11. Гришко А. К., Горячев Н. В., Юрков Н. К. Анализ математических моделей расчета электроакустических полей и дальности действия радиолокационных систем методом последовательного анализа // Инженерный вестник Дона. 2015. Т. 35, № 2–1. С. 16.
12. Andreev P. G., Yakimov A. N., Yurkov N. K. [et al.]. Methods of Calculating the Strength of Electric Component of Electromagnetic Field in Difficult Conditions // 2016 12th International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE 2016) (Saratov, Russia, September 22–23, 2016). Saratov, 2016. Vol. 1. P. 1–7. doi: 10.1109/APEDE.2016.7878895.
13. Гришко А. К. Оптимизация размещения элементов РЭС на основе многоуровневой геоинформационной модели // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер.: Технические науки. 2015. № 3. С. 85–90.
14. Гришко А. К., Жумабаева А. С., Юрков Н. К. Управление электромагнитной устойчивостью радиоэлектронных систем на основе вероятностного анализа динамики информационного конфликта // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2016. № 4. С. 49–58.
15. Grishko A. K. Parameter control of radio-electronic systems based of analysis of information conflict. 2016 13th International Scientifictechnical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE 2016) (Novosibirsk, Russia, October 03–06, 2016). Novosibirsk, 2016. P. 107–111. doi: 10.1109/APEIE.2016.7806423.
16. Grishko A., Goryachev N., Kocheharov I. [et al.]. Management of Structural Components Complex Electronic Systems on the Basis of Adaptive Model // 2016 13th International Conference on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications, and Computer Science (TCSET) (Lviv–Slavsko, Ukraine, February 23–26, 2016). Lviv–Slavsko, 2016. P. 214–218. doi: 10.1109/TCSET.2016.7452017.
17. Grishko A., Goryachev N., Kocheharov I., Yurkov N. Dynamic Analysis and Optimization of Parameter Control in Radio Systems in Conditions of Interference // 2016 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON) (Moscow, Russia, May 12–14, 2016). Moscow, 2016. P. 1–4. doi: 10.1109/SIBCON.2016.7491674.
18. Grigor'ev A., Grishko A., Goryachev N. [et al.]. Contactless Three-Component Measurement of Mirror Antenna Vibrations // 2016 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON) (Moscow, Russia, May 12–14, 2016). Moscow, 2016. P. 1–5. doi: 10.1109/SIBCON.2016.7491673.
19. Grishko A., Goryachev N., Yurkov N. Adaptive Control of Functional Elements of Complex Radio Electronic Systems // International Journal of Applied Engineering Research. 2015. Vol. 10, № 23. P. 43842–43845.

References

1. Patent 2700206 Russian Federation, B64C 99/00(2019.09) H04K 3/00(2019.09) F41H 13/00(2019.09). *Sposob dvukhfaktornogo funktsional'nogo podavleniya bespilotnogo letatel'nogo apparata = Method of two-factor functional suppression of an unmanned aerial vehicle*. Yurkov N.K., Goryachev N.V., Kuzina E.A. No. 2018114720; appl. 20.04.2018; publ. 13.09.2019, bull. No. 26. (In Russ.)
2. Patent 2700207 Russian Federation, MPK B64C 99/00(2019.09) H04K 3/00(2019.09) F41H 13/00(2019.09) F42B 12/36(2019.09). *Sposob funktsional'nogo podavleniya bespilotnogo letatel'nogo apparata = Method of functional suppression of an unmanned aerial vehicle*. Yurkov N.K., Goryachev N.V., Kuzina E.A. No. 2018142886; appl. 05.12.2018; publ. 13.09.2019, bull. No. 26. (In Russ.)
3. Gross F.G. *Frontiers in Antennas: Next Generation Design & Engineering*. The McGraw-Hill Companies, 2011:526.
4. Bobreshov A.M., Meshcheryakov I.I., Uskov G.K. Simulation of an ultrashort pulse generator in conjunction with a Vivaldi antenna. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser.: Sistemnyy analiz i informatsionnye tekhnologii = Bulletin of the Voronezh State University. Ser.: System Analysis and Information technologies*. 2014;3:81–85. (In Russ.)
5. Voskresenskiy D. I. (ed.) *Ustroystva SVCh i anteny. Proektirovanie fazirovannykh antennykh reshetok = Microwave devices and antennas. Design of phased array antennas*. Moscow: Radiotekhnika, 2012:744. (In Russ.)
6. Mitel'man Yu.E. *Proektirovanie antennykh sistem v anssoft hfss = Design of antenna systems in anssoft hfss*. Ekaterinburg, 2012. (In Russ.)

7. Chernyshev S.L., Vilenskiy A.R. Development of emitters for ultrashort pulse antenna arrays. *Radiolokatsiya. Navigatsiya. Svyaz': dokl. XVII Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.* = Radar location. Navigation. Connection: reports of XVII International Scientific and Technical Conference. Voronezh, 2011:2159–2170. (In Russ.)
8. Sogomonyan K.E. Impact of ultrashort electromagnetic radiation pulses on unmanned aerial vehicles. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2019;2:315–317. (In Russ.)
9. Mel'nichuk A.I., Goryachev N.V., Yurkov N.K. Methods and means of countering UAVs. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2020;4:131–138. (In Russ.)
10. Grishko A.K. Optimal management of the frequency resource of radio engineering systems based on the probabilistic analysis of the dynamics of the information conflict. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radio-tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Ryazan State Radio Engineering University*. 2016;57:21–28. (In Russ.). doi: 10.21667/1995-4565-2016-57-3-21-28.
11. Grishko A.K., Goryachev N.V., Yurkov N.K. Analysis of mathematical models for calculating electroacoustic fields and the range of radar systems by sequential analysis. *Inzhenernyy vestnik Dona = Engineering Bulletin of the Don*. 2015;35(2–1):16. (In Russ.)
12. Andreev P.G., Yakimov A.N., Yurkov N.K. [et al.]. Methods of Calculating the Strength of Electric Component of Electromagnetic Field in Difficult Conditions. *2016 12th International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE 2016) (Saratov, Russia, September 22–23, 2016)*. Saratov, 2016;1:1–7. doi: 10.1109/APEDE.2016.7878895.
13. Grishko A.K. Optimization of the placement of RES elements based on a multi-level geoinformation model. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Ser.: Tekhnicheskie nauki = Bulletin of the Samara State Technical University. Ser.: Technical sciences*. 2015;3:85–90. (In Russ.)
14. Grishko A.K., Zhumabaeva A.S., Yurkov N.K. Control of electromagnetic stability of radio-electronic systems based on probabilistic analysis of information conflict dynamics. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2016;4:49–58. (In Russ.)
15. Grishko A.K. Parameter control of radio-electronic systems based of analysis of information conflict. *2016 13th International Scientifictechnical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE 2016) (Novosibirsk, Russia, October 03–06, 2016)*. Novosibirsk, 2016:107–111. doi: 10.1109/APEIE.2016.7806423.
16. Grishko A., Goryachev N., Kochegarov I. [et al.]. Management of Structural Components Complex Electronic Systems on the Basis of Adaptive Model. *2016 13th International Conference on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications, and Computer Science (TCSET) (Lviv–Slavsko, Ukraine, February 23–26, 2016)*. Lviv–Slavsko, 2016:214–218. doi: 10.1109/TCSET.2016.7452017.
17. Grishko A., Goryachev N., Kochegarov I., Yurkov N. Dynamic Analysis and Optimization of Parameter Control in Radio Systems in Conditions of Interference. *2016 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON) (Moscow, Russia, May 12–14, 2016)*. Moscow, 2016:1–4. doi: 10.1109/SIBCON.2016.7491674.
18. Grigor'ev A., Grishko A., Goryachev N. [et al.]. Contactless Three-Component Measurement of Mirror Antenna Vibrations. *2016 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON) (Moscow, Russia, May 12–14, 2016)*. Moscow, 2016:1–5. doi: 10.1109/SIBCON.2016.7491673.
19. Grishko A., Goryachev N., Yurkov N. Adaptive Control of Functional Elements of Complex Radio Electronic Systems. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2015;10(23):43842–43845.

Информация об авторах / Information about the authors

Антон Иванович Мельничук

инженер группы обслуживания и ремонта бортовой контрольно-записывающей аппаратуры, Учебная авиационная база Краснодарского высшего военного авиационного училища летчиков МО РФ (Россия, Саратовская область, г. Ртищево, ул. Котовского, 1/1)
E-mail: pelmenio@mail.ru

Anton I. Mel'nichuk

Engineer of the service and repair group of on-board recording equipment training, Aviation Base of the Krasnodar Higher Military Aviation School of Pilots of Russian Ministry of Defense (1/1 Kotovsky street, Rtishchevo, Saratov Region, Russia)

Николай Владимирович Горячев

кандидат технических наук,
доцент кафедры конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: ra4foc@yandex.ru

Николай Кондратьевич Юрков

доктор технических наук, профессор,
заслуженный деятель науки РФ,
заведующий кафедрой конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: yurkov_NK@mail.ru

Nikolay V. Goryachev

Candidate of technical sciences,
associate professor of sub-department
of radio equipment design
and production,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Nikolay K. Yurkov

Doctor of technical sciences, professor,
the honoured worker of science
of the Russian Federation,
head of sub-department
of radio equipment design and production,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РЕЗОНАНСНЫХ ЧАСТОТ ТОНКОСТЕННЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ БОРТОВЫХ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

С. И. Фролов¹, Е. А. Данилова², Г. В. Таньков³, И. И. Кочегаров⁴, А. В. Григорьев⁵

^{1,2,3,4,5} Пензенский государственный университет, Пенза, Россия
¹ sfrolov46@mail.ru, ² siori@list.ru, ³ g.tankov43@mail.ru, ⁴ kipra@pnzgu.ru, ⁵ a_grigorev@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Важной задачей при разработке бортовых радиоэлектронных средств является оценка резонансных частот конструкции. Цилиндрическая форма конструкции применяется реже, чем прямоугольная, притом, что в ряде случаев обладает большей жесткостью. Кроме того, в литературе отсутствуют инженерные методики для определения собственных частот колебаний (СЧК) цилиндрических оболочек. Целью работы является разработка методики решения задачи нахождения минимальной СЧК свободно опертой круговой цилиндрической оболочки и получено аналитического выражения для частотных параметров цилиндра с заземленными торцами. *Материалы и методы.* В работе используются положения теории механических колебаний для получения аналитических выражений собственной частоты колебаний цилиндрической оболочки. Для численного решения используются методы конечных элементов и программный пакет ANSYS. *Результаты.* Предложены результаты расчетов собственных частот колебаний цилиндрических тонкостенных оболочек с заземленными краями, позволяющие обоснованно выбрать размеры конструкции с точки зрения защиты от резонанса. Выполнено численное моделирование, подтвердившее адекватность предложенной математической модели. *Вывод.* Результаты работы в виде рекомендаций по повышению жесткости конструкций цилиндрических конструкций бортовых радиоэлектронных средств позволят создавать более надежные конструкции за счет улучшения стойкости к вибрации.

Ключевые слова: цилиндрическая оболочка, собственная частота колебаний, математическое моделирование, вибрация, резонанс, защита

Для цитирования: Фролов С. И., Данилова Е. А., Таньков Г. В., Кочегаров И. И., Григорьев А. В. Разработка методики определения резонансных частот тонкостенных цилиндрических конструкций бортовых радиоэлектронных средств // Надежность и качество сложных систем. 2021. № 1. С. 102–113. doi:10.21685/2307-4205-2021-1-10

DEVELOPMENT OF A METHOD FOR DETERMINING THE RESONANT FREQUENCIES OF THIN-WALLED CYLINDRICAL STRUCTURES ON-BOARD ELECTRONIC EQUIPMENT

S.I. Frolov¹, E.A. Danilova², G.V. Tan'kov³, I.I. Kochegarov⁴, A.V. Grigor'ev⁵

^{1,2,3,4,5} Penza State University, Penza, Russia
¹ sfrolov46@mail.ru, ² siori@list.ru, ³ g.tankov43@mail.ru, ⁴ kipra@pnzgu.ru, ⁵ a_grigorev@mail.ru

Abstract. *Background.* An important task in the development of airborne radioelectronic facilities is the assessment of the resonant frequencies of the structure. The cylindrical shape of the structure is used less often than the rectangular one, moreover, in some cases it has greater rigidity. In addition, there are no engineering techniques in the literature for determining the natural vibration frequencies (EF) of cylindrical shells. The aim of this work is to develop a methodology for solving the problem of finding the minimum SCF of a freely supported circular cylindrical shell and an analytical expression for the frequency parameters of a cylinder with restrained ends is obtained. *Materials and methods.* The paper uses the provisions of the theory of mechanical vibrations to obtain analytical expressions for the natural frequency of vibrations of a cylindrical shell. For the numerical solution, finite element methods and the ANSYS software package are used. *Results.* The results of calculations of natural frequencies of vibrations of cylindrical thin-walled shells with restrained edges are proposed, which make it possible to reasonably choose the dimensions of the structure from the point of view of protection against resonance. Numerical modeling has been carried out,

which has confirmed the adequacy of the proposed mathematical model. *Conclusion.* The results of the work in the form of recommendations for increasing the stiffness of the structures of cylindrical structures of onboard radio-electronic means will make it possible to create more reliable structures by improving the resistance to vibration.

Keywords: cylindrical shell, natural vibration frequency, mathematical modeling, vibration, resonance, protection

For citation: Frolov S.I., Danilova E.A., Tan'kov G.V., Kochegarov I.I., Grigor'ev A.V. Development of a method for determining the resonant frequencies of thin-walled cylindrical structures on-board electronic equipment. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2021;1:102–113. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2021-1-10

Введение

Наиболее важной и требующей особого внимания группой факторов надежности бортовых радиоэлектронных средств (БРЭС) являются конструктивные факторы, поскольку исправление ошибок конструирования, приводящих к отказам аппаратуры, как правило, оказывается самым дорогостоящим, так как требует последующих изменений в технической подготовке производства и доработки или списания задела продукции.

Ситуация осложняется тем, что часто имеют место так называемые «постепенные» отказы, которые являются следствием деградации физико-механических свойств материалов под влиянием внешних воздействий и естественного старения. Выявить причины таких отказов БРЭС в условиях длительной эксплуатации бывает очень сложно и, соответственно, большой проблемой является получение достоверной статистики для оценки принятых конструктивных решений по каждой конкретной разработке.

Тем не менее, основываясь на опыте эксплуатации большого числа различных БРЭС, многие специалисты видят причиной значительного числа отказов (до 30 % всех отказов) недостаточную вибропрочность БРЭС, что является следствием наличия резонансов элементов их конструкции. Это значит, что традиционно применяемые методы защиты от вибрации, такие как демпфирование и амортизация, не всегда гарантируют безотказность БРЭС, спроектированных с резонансами, и отказы таких БРЭС следует отнести к конструктивным факторам. Именно поэтому важнейшим конструктивным методом обеспечения вибропрочности БРЭС является отстройка резонансных частот элементов конструкции за пределы диапазона частот внешних возмущающих воздействий, или другими словами, создание безрезонансных конструкций в заданном диапазоне частот вибрации.

Однако было бы не совсем правильно во всех случаях наличия резонансов в БРЭС считать их конструктивной ошибкой. В сложных случаях, при отсутствии проверенных инженерных методик расчета, когда у конструктора нет ни квалификации, ни времени на научные изыскания, наличие резонансов следует квалифицировать как ошибку, допущенную на этапе НИР.

Цилиндрическая форма блока в сравнении с прямоугольной, при сопоставимых по величине объемах, в ряде случаев обладает большей жесткостью, что позволяет создать безрезонансную конструкцию с меньшим весом и габаритами. Однако такая форма при проектировании аппаратуры используется относительно редко и, как правило, преимущественно тогда, когда является частью цилиндрической конструкции изделия, например, в случае приборных отсеков ракет малой и средней дальности различного назначения. В данном случае, когда продольные нагрузки невелики и могут быть восприняты обшивкой относительно небольшой толщины, защитный кожух является обшивкой приборного отсека, ограничивает его внутренний объем, защищая от воздействия факторов окружающей среды.

В герметичных блоках БРЭС защитный кожух представляет собой пространственную тонкостенную конструкцию, жестко закрепленную на основании. В авиационных ракетах защитный кожух приборных отсеков часто выполняется в виде неподкрепленной или подкрепленной стрингерами гладкой цилиндрической оболочки, имеющей по торцам стыковочные шпангоуты, предназначенные для соединения с соседними отсеками. Герметизация приборного отсека существенно повышает надежность аппаратуры, создает наилучшие условия работы приборов во время полета, обеспечивает высокую боеготовность ракеты и способствует повышению точности полета. Поэтому разгерметизация приборного отсека, которая может наступить под воздействием интенсивной широкополосной вибрации в процессе длительной эксплуатации, является крайне опасной, особенно при наличии резонансов [1–3].

Создание безрезонансных цилиндрических конструкций затруднено из-за отсутствия инженерных методик и сложности определения собственных частот колебаний (СЧК) круговых цилиндрических оболочек (далее по тексту – цилиндров) по данным многочисленных публикаций и справочной литературы [4–6]. При этом следует отметить трудности экспериментального определения СЧК цилиндров, так как для этого требуются знания особенностей их спектра.

В отличие от спектра таких упругих тел, как стержни и пластины, где расположение частот имеет некоторый регулярный порядок, спектр СЧК цилиндрических оболочек не подчиняется какому-либо простому правилу. Например, минимальной (основной) СЧК цилиндра соответствует не самая простая форма колебаний с минимальным количеством волн в окружном направлении. Число таких волн зависит от физических свойств и соотношения размеров цилиндров и может быть достаточно большим. Кроме того, при эксперименте на спектр СЧК существенное влияние оказывают даже малые начальные неправильности цилиндров, такие как отклонения поперечного сечения от идеальной формы и т.п. [7]. При таких обстоятельствах вместо натуральных экспериментов важную роль играет компьютерное моделирование, в данном случае – методом конечных элементов (МКЭ).

Метод конечных элементов в настоящее время распространен достаточно широко, он в частности используется в таких пакетах программ, как отечественные вычислительные комплексы SCAD, MicroFe, иностранные – ANSYS, SOLIDWORKS, SIMULATION и др. Но при всех достоинствах МКЭ пакеты программ на его основе получаются громоздкими, ресурсоемкими, сложными в освоении и дорогими. Это в нашем случае делает их использование при практическом проектировании не рациональным. Однако при проведении исследований для разработки инженерных методик проектирования безрезонансных конструкций эти пакеты программ могут быть с успехом использованы.

В данной статье приведены результаты исследований по методике определения СЧК тонкостенных круговых цилиндрических оболочек с закрепленными торцами, решены тестовые задачи с использованием пакета программ ANSYS и даны рекомендации по созданию безрезонансных цилиндрических конструкций на ранних стадиях проектирования БРЭС.

Исследование методики определения СЧК цилиндров

Исследование СЧК проводится для цилиндров с идеальной цилиндрической срединной поверхностью с круговым поперечным сечением, так как получаемая в этом случае математическая модель при своей относительной простоте обладает многими свойствами реальных цилиндрических конструкций БРЭС.

В настоящее время по проблеме определения СЧК цилиндрических оболочек имеется большое число публикаций с информацией в основном теоретического характера. Целью настоящей работы является разработка инженерной методики расчета минимальных СЧК цилиндров и практического использования результатов для синтеза безрезонансных цилиндрических конструкций БРЭС.

Для начала целесообразно кратко рассмотреть последовательность решения задачи нахождения СЧК цилиндра в рамках «классической» теории, построенной на основе гипотезы прямых недеформируемых нормалей, когда исследования сводятся фактически к исследованию поведения срединной поверхности. Погрешность такой теории для нашего случая $R/h > 20$ (R – радиус, h – толщина стенки цилиндра) по результатам многочисленных исследований составляет не более 5 %.

Для определения СЧК свободно опертых цилиндрических оболочек используется формула

$$f = \frac{K_{mn}}{2\pi R} \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\mu^2)}}, \quad (1)$$

где E – модуль Юнга; μ – коэффициент Пуассона; ρ – плотность материала цилиндра.

Частотный коэффициент K_{mn} находится путем решения динамических уравнений линейных колебаний цилиндрической оболочки.

Разрешающие уравнения цилиндрической оболочки в этом случае без учета волнового характера распространения деформации имеют вид [8]:

$$\begin{aligned} \frac{\delta^2}{\delta \xi^2} + \frac{1-\mu}{2} \frac{\delta^2 u}{\delta \phi^2} + \frac{1+\mu}{2} \frac{\delta^2 v}{\delta \xi \delta \phi} - \mu \frac{\delta \omega}{\delta \xi} &= 0; \\ \frac{1+\mu}{2} \frac{\delta^2 u}{\delta \xi \delta \phi} + \frac{1-\mu}{2} \frac{\delta^2 v}{\delta \xi^2} + \frac{\delta^2 v}{\delta \phi^2} - \frac{\delta \omega}{\delta \phi} &= 0; \\ \mu \frac{\delta u}{\delta \xi} + \frac{\delta u}{\delta \phi} - \omega - \beta \nabla^4 \omega &= L^* \frac{\delta^2 \omega}{\delta t^2}. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь введены следующие обозначения: u, v, w – обозначения компонент перемещения точек срединной поверхности цилиндра в направлениях: x – вдоль образующей, y – в окружном направлении, z – вдоль нормали к срединной поверхности;

$$\xi = \frac{x}{R}; \beta = \frac{h^2}{12R^2}; L^* = \frac{1-\mu^2}{E} \rho R^2.$$

На основании уравнений (2) путем преобразований получаются несвязанные уравнения

$$\begin{aligned} \frac{\beta}{1-\mu^2} \nabla^8 \omega + \frac{\delta^4 u}{\delta \xi^4} + \frac{L^*}{1-\mu^2} \frac{\delta^2}{\delta t^2} (\nabla^4 \omega) &= 0; \\ \nabla^4 u &= \frac{\delta}{\delta \xi} \left(\mu \frac{\delta^2 \omega}{\delta \xi^2} - \frac{\delta^2 \omega}{\delta \phi^2} \right); \\ \nabla^4 u &= \frac{\delta}{\delta \xi} \left[\frac{\delta^2 \omega}{\delta \phi^2} + (2+\mu) \frac{\delta^2 \omega}{\delta \xi^2} \right]. \end{aligned} \quad (3)$$

Точное решение для цилиндра длиной l при свободном опирании торцов ищется в виде разложения по формам собственных колебаний

$$u_{n,m} = A_{n,m} \cos \lambda_m \xi \cos n\phi \cos \omega t; \quad v_{n,m} = B_{n,m} \sin \lambda_m \xi \sin n\phi \cos \omega t; \quad w_{n,m} = C_{n,m} \sin \lambda_m \xi \cos n\phi \cos \omega t,$$

где $\lambda m = m\pi R/l$ – параметр продольной волны, который характеризует количество продольных полу-волн деформации ($m=1, 2, 3, \dots$); n – число волн в окружном направлении ($n = 1, 2, 3, \dots$).

Частотное уравнение, отвечающее системе (3), имеет единственный действительный корень, и выражение для частотного коэффициента K_{mn} запишется

$$K_{mn} = \sqrt{\frac{(1-\mu^2)\lambda_m^4 + \beta(\lambda_m^2 + n^2)^4}{(\lambda_m^2 + n^2)^2}}. \quad (4)$$

Из анализа выражения (4) видно, что необходимое для создания безрезонансной конструкции минимальное (основное) значение собственной частоты соответствует одной продольной полу-волне при $m = 1$.

Минимальное значение n_{\min}^2 находится из условия экстремума $dK_{mn}^2/dn^2 = 0$:

$$n_{\min}^2 = \lambda_m^4 \sqrt{\frac{1-\mu^2}{\beta}} - \lambda_m^2. \quad (5)$$

Подстановка выражения (5) в формулу (4) после несложных преобразований дает для минимального СЧК свободно опертого цилиндра следующее выражение:

$$K_{mn} = \pi \frac{R}{l} \sqrt{\frac{h}{R}} \sqrt[4]{\frac{1-\mu^2}{3}}, \quad (6)$$

или в степенных функциях при $\mu = 0,3$;

$$K_{mn} = 2,331 \left(\frac{l}{R}\right)^{-1} \left(\frac{R}{h}\right)^{-0,5}. \quad (7)$$

Расчеты частотного параметра по формуле (7) показывают хорошее совпадение с данными справочника [4] (табл. 1).

Таблица 1

$K_{mn} \cdot 100$		R/h			
		100	200	300	400
l/R	1	23,31	16,49	13,46	11,66
		23,08	16,47	13,46	11,61
	%	1,02	0,10	0,01	0,41
	2	11,66	8,24	6,73	5,83
		11,43	8,14	6,67	5,83
	%	1,99	1,25	0,92	-0,01
	3	7,77	5,50	4,49	3,89
		7,61	5,39	4,49	3,83
	%	2,14	1,99	0,04	1,38
	4	5,83	4,12	3,37	2,91
		5,78	4,14	3,30	2,89
	%	0,91	-0,52	1,91	0,88

Представить значения K_{mn} в табличном виде можно с привязкой к толщине стенки и длине цилиндра, что удобно для восприятия.

Для примера ниже приведены значения $K_{mn} \cdot 100$ для цилиндра с радиусом $R = 75$ мм и свободным опиранием торцов (табл. 2).

Таблица 2

Свободное опирание			R/h						
			150	100	75	60	50	42,9	37,5
			$R, \text{ мм}$	$h, \text{ мм}$					
l/R	0,67	75	0,5	0,75	1	1,25	1,5	1,75	2
	1	50	28,55	34,97	40,38	45,15	49,46	53,42	57,11
	1,33	75	19,04	23,32	26,92	30,10	32,97	35,61	38,07
	1,67	100	14,28	17,49	20,19	22,57	24,73	26,71	28,55
	2	125	11,42	13,99	16,15	18,06	19,78	21,37	22,84
	2,33	150	9,52	11,66	13,46	15,05	16,49	17,81	19,04
	2,67	175	8,16	9,99	11,54	12,90	14,13	15,26	16,32
	3	200	7,14	8,74	10,10	11,29	12,36	13,36	14,28
	3,33	225	6,35	7,77	8,97	10,03	10,99	11,87	12,69
	3,67	250	5,71	6,99	8,08	9,03	9,89	10,68	11,42
	4	275	5,19	6,36	7,34	8,21	8,99	9,71	10,38
		300	4,76	5,83	6,73	7,52	8,24	8,90	9,52

Для цилиндров с жестким защемлением, в отличие от свободного опирания торцов, для определения частотного параметра K_{mn} на практике рекомендуется использование различных достаточно сложных полуэмпирических формул и графиков.

В то же время аппроксимацией данных справочника [4] степенными функциями с использованием офисного пакета программ Excel можно легко получить аналитическое выражение, аналогичное (7), для частотных параметров цилиндра с защемленными торцами:

$$K_{mn} = 2,331 \left(\frac{l}{R}\right)^{-0,935} \left(\frac{R}{h}\right)^{-0,45}. \quad (8)$$

Погрешность значений частотных параметров, рассчитанных по полуэмпирической формуле (8), в сравнении с данными по справочнику [4] укладывается в $\pm 2\%$ (табл. 3).

Таблица 3

		R/h			
		100	200	300	400
l/R	1	29,32	21,42	17,89	15,70
		29,35	21,48	17,90	15,73
	%	0,09	0,29	0,05	0,16
	2	15,53	11,30	9,366	8,230
		15,35	11,24	9,362	8,225
	%	-1,17	-0,57	-0,04	-0,06
	3	10,59	7,692	6,411	5,57
		10,51	7,69	6,41	5,63
	%	-0,79	-0,02	-0,05	1,08
	4	8,158	5,863	4,822	4,233
		8,03	5,88	4,90	4,30
	%	-1,59	0,24	1,55	1,63

Однако данные табл. 3 подтверждают точность расчетов только для тонких ($R/h > 100$) и длинных ($l/R > 1$) оболочек цилиндров. А для более тонких ($20 > R/h > 100$) и коротких ($l/R < 1$) цилиндров погрешность значений частотных параметров требует уточнений, в нашем случае – с использованием численных решений тестовых задач.

С целью настройки и проверки точности решения задачи по расчету СЧК цилиндра с использованием комплекса программ ANSYS определены собственные частоты стального цилиндра с размерами:

$$R = 76 \text{ мм}, l = 305 \text{ мм}; h = 0,25 \text{ мм}.$$

Механические характеристики материала цилиндра $E = 1,96 \cdot 10^{11}$ Па, $\mu = 0,3$, $\rho = 7700$ кг/м³.

Цилиндр с такими параметрами многократно использовался в качестве тестового, и на него имеется достаточная статистика, в том числе результаты эксперимента. В табл. 4 представлены данные по основной собственной частоте выше указанного цилиндра, найденные различными методами.

Таблица 4

Справочник [4]				SCAD [10]	MicroFe [11]	ANSYS
Точное значение	Эксперимент	По Рэлею – Ритцу	Арнольд			
533	525	545	541	522,2	522	521,5

Как видно из таблицы, имеется большой разброс значений основной собственной частоты цилиндра. Особенно это касается значений, найденных приближенными методами. Использование численных методов дало хорошо совпадающие результаты, подкрепленные экспериментом, что позволяет использовать комплекс ANSYS для тестовых расчетов СЧК цилиндров.

Погрешность расчетов частот по формулам (1), (8) исследовалась с использованием пакета программ ANSYS на примере расчета СЧК для трех стальных цилиндров с размерами:

1) $R = 76$ мм, $l = 305$ мм; 2) $R = 106$ мм, $l = 150$ мм; 3) $R = 150$ мм, $l = 75$ мм.

Толщина для всех цилиндров принималась: $h = 0,5; 1; 1,5; 2$ мм, механические характеристики: $E = 1,96 \cdot 10^{11}$ Па, $\mu = 0,3$, $\rho = 7700$ кг/м³.

Далее приводятся результаты расчетов собственных частот колебаний в табличном виде для трех вышеприведенных вариантов цилиндров (табл. 5). Данные получены с использованием программы ANSYS. В скобках указано количество полуволн по длине цилиндра $m > 1$.

Таблица 5

Цилиндр 1, Толщина h , мм							
0,5		1		1,5		2	
СЧК, Гц	n	СЧК, Гц	n	СЧК, Гц	n	СЧК, Гц	n
718,66	5	976,64	4	1241,4	4	1367,8	3
801,57	4	1138,2	5	1281,1	3	1515,8	4
827,12	6	1190,7	3	1651,7	5	1960,4	2
1051,7	7	1525,6	6	1946,5	2	2151,6	5
1148,1	3	1661,1	5(2)	2089,6	4(2)	2313,1	4(2)
1211,8	6(2)	1818,1	6(2)	2119,6	5(2)	2593,2	5(2)
1274,3	7(2)	1873,6	4(2)	2308,8	6	2722,6	3(2)
1347,4	8	1900,5	2	2586,1	6(2)	3054,6	6
1355,5	5(2)	2045,2	7	2650,6	3(2)	3339,6	6(2)
1483,2	8(2)	2227	7(2)	2914,4	5(3)	3368,1	5(3)
1696,5	9	2368,8	6(3)	3113,4	6(3)	3443,6	1
1711,8	7(3)	2484,2	5(3)	3128,6	7	3456,6	4(3)
1758,3	4(2)	2548,1	3(2)	3241,7	4(3)	3871,5	6(3)
1773,8	8(3)	2591,8	7(3)	3324,7	7(2)	3971,4	2(2)
Цилиндр 2, Толщина h , мм							
0,5		1		1,5		2	
СЧК, Гц	n	СЧК, Гц	n	СЧК, Гц	n	СЧК, Гц	n
1248,6	6	1702,6	5	2089,1	5	2309,2	4
1298,4	7	1837,8	6	2115,4	4	2530,8	5
1417,9	5	1962,7	4	2528,7	6	2812,5	3
1505,2	8	2246,1	7	2755,8	3	3255,9	6
1815,4	9	2711,7	3	3259,2	7	3942,9	5(2)
1861,1	4	2827	8	3494,1	6(2)	4179,6	6(2)
2088,2	8(2)	2901,9	6(2)	3564,3	5(2)	4184,7	2
2163,3	7(2)	2941,3	7(2)	3901,2	7(2)	4288,6	7
2197,7	10	3261,8	5(2)	4168,6	2	4393,9	4(2)
2205,5	9(2)	3294,3	8(2)	4182,3	8	4935,5	7(2)
2468,5	10(2)	3530,3	9	4223,5	4(2)	5541,9	8
2472,4	6(2)	3870,3	9(2)	4648,6	8(2)	5653,8	3(2)
2637	11	4091,6	4(2)	4983,1	6(3)	5667,3	6(3)
2680,5	3	4103	7(3)	5024,5	7(3)	5868,5	5(3)
Цилиндр 3, Толщина h , мм							
0,5		1		1,5		2	
СЧК, Гц	n	СЧК, Гц	n	СЧК, Гц	n	СЧК, Гц	n
2004	11	2738,7	8	3277,7	7	3734,2	7
2010,7	10	2747,2	9	3311,1	8	3772,6	6
2081,1	12	2899	7	3478,9	6	3968,7	8
2111,6	9	2904,9	10	3551	9	4115,4	5
2229,2	13	3187,1	11	3935,8	5	4431,7	9
2315	8	3242,6	6	3961,5	10	4793,3	4
2435,8	14	3569,9	12	4508,3	11	5077,7	10
2630,5	7	3791,8	5	4684,3	4	5870,7	11
2690,2	15	4034,1	13	5165,7	12	5872,2	3
2984,4	16	4566,2	14	5765,9	9(2)	6660,3	8(2)
3076,3	6	4595,1	4	5784,9	8(2)	6685,1	7(2)
3312,6	17	4716,2	10(2)	5804,7	3	6786,7	12
3391,3	13(2)	4776,1	11(2)	5916,3	13	6874	9(2)
3426,7	12(2)	4804	9(2)	5940,2	10(2)	6964,6	6(2)

Для наглядного понимания результатов расчетов на рис. 1–5 показаны некоторые основные собственные формы колебаний цилиндров, отличающихся геометрическими размерами, в частности, с разными радиусами, длинами и толщинами оболочки.

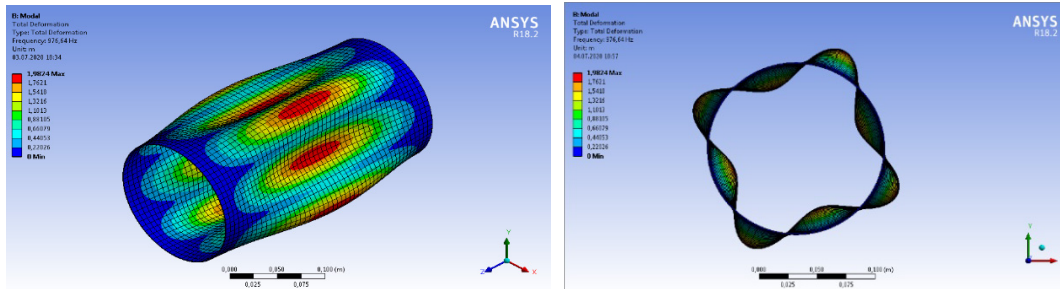


Рис. 1. Цилиндр $R = 76$ мм, $l = 305$ мм, $h = 1$ мм; СЧК – 976,6 Гц

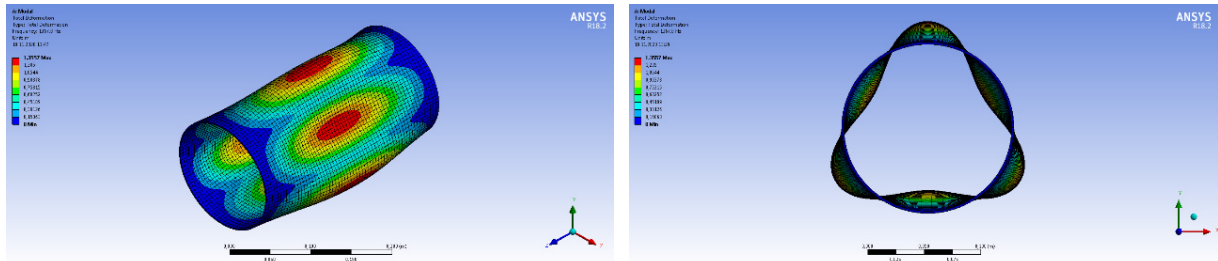


Рис. 2. Цилиндр $R = 76$ мм, $l = 305$ мм, $h = 2$ мм; СЧК – 1367,8 Гц

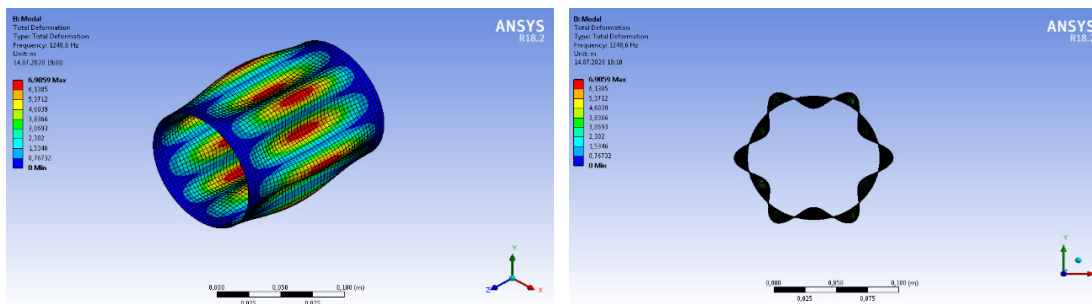


Рис. 3. Цилиндр $R = 106$ мм, $l = 150$ мм, $h = 0,5$ мм; СЧК – 1248,6 Гц

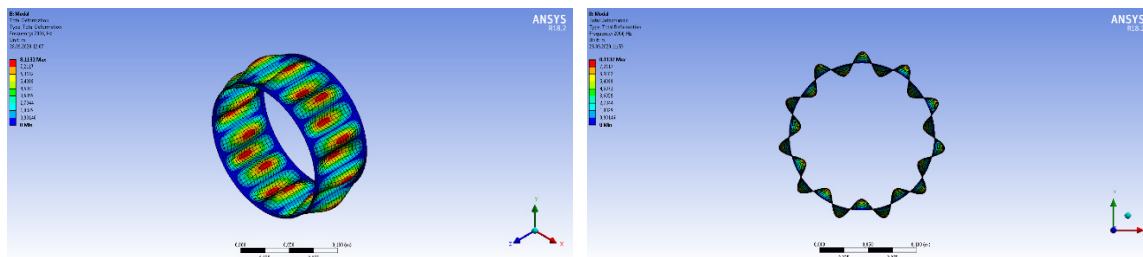


Рис. 4. Цилиндр $R = 150$ мм, $l = 75$ мм, $h = 0,5$ мм; СЧК – 2004,0 Гц

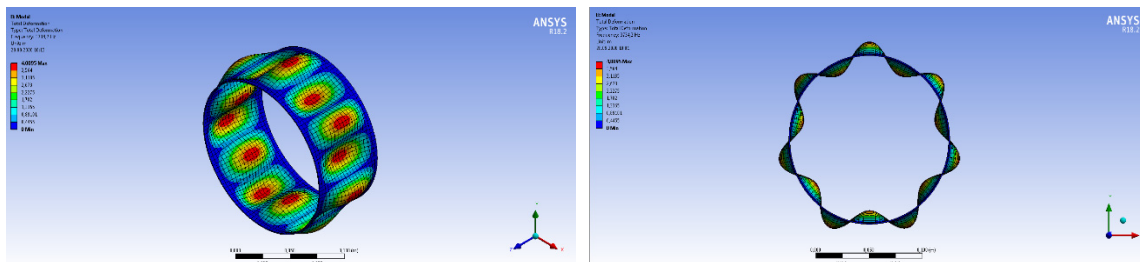


Рис. 5. Цилиндр $R = 150$ мм, $l = 75$ мм, $h = 2$ мм; СЧК – 3734,2 Гц

Погрешности расчетов СЧК по полученным выше полуэмпирическим формулам в сравнении с результатами расчетов частот с использованием пакета программ ANSYS приведены в табл. 6.

Таблица 6

R, мм		R/h									
150		300		150		100		75			
		212		106		70,7		53			
		152		76		50,7		38			
l/R		l		h, мм							
		305		0,5		1		1,5		2	
4,0				718,7		976,6		1241,4		1367,8	
				734,4		1003,2		1204,0		1370,4	
		%		2,1		2,6		-3,1		0,2	
1,42		150		1248,6		1702,6		2089,1		2309,2	
				1201,4		1641,1		1969,6		2241,8	
		%		-3,8		-3,6		-5,7		-2,9	
0,5		75		2004		2738,7		3277,7		3734,2	
				1920,8		2623,9		3149,1		3584,4	
		%		-4,2		-4,2		-3,9		-4,0	

Как следует из табл. 6, результаты расчетов СЧК цилиндров с заземленными торцами по двум разным методикам дают хорошее совпадение, и полуэмпирические формулы (1), (8) могут быть предложены для инженерных расчетов. Причем аналитическое представление зависимостей параметров цилиндров дает хорошие возможности для автоматизированного синтеза безрезонансных цилиндрических конструкций БРЭС решением обратных инженерных задач с использованием стандартного офисного пакета программ Excel.

Значения K_{mn} можно также представить в табличном виде с привязкой к толщине и длине цилиндра, что удобно для восприятия и выполнения расчетов. Для примера, в табл. 7 приведены значения $K_{mn} \cdot 100$ для цилиндров с заземленными торцами и радиусами $R = 75, 100$ мм.

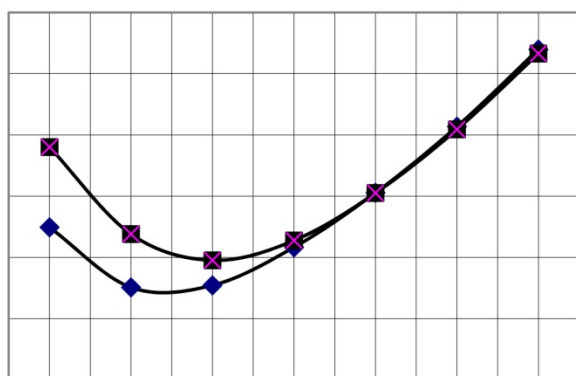
Таблица 7

Заземленные торцы (R = 75 мм)			R/h							
			150	100	75	60	50	42,9	37,5	
R, мм			h, мм							
75			0,5	0,75	1	1,25	1,5	1,75	2	
l/R	l	0,67	50	35,73	42,88	48,81	53,97	58,58	62,79	66,68
		1,00	75	24,46	29,35	33,41	36,94	40,10	42,98	45,64
		1,33	100	18,69	22,43	25,53	28,23	30,64	32,84	34,87
		1,67	125	15,17	18,21	20,72	22,91	24,87	26,66	28,31
		2,00	150	12,79	15,35	17,47	19,32	20,97	22,48	23,87
		2,33	175	11,07	13,29	15,13	16,73	18,16	19,46	20,67
		2,67	200	9,77	11,73	13,35	14,76	16,03	17,18	18,24
		3,00	225	8,76	10,51	11,96	13,22	14,35	15,39	16,34
		3,33	250	7,93	9,52	10,84	11,98	13,01	13,94	14,81
		3,67	275	7,26	8,71	9,91	10,96	11,90	12,75	13,54
4,00	300	6,69	8,03	9,14	10,11	10,97	11,76	12,49		
Заземленные торцы (R = 100 мм)			R/h							
			200	133,3	100,0	80,0	66,7	57,1	50	
R, мм			h, мм							
100			0,5	0,75	1	1,25	1,5	1,75	2	
l/R	l	0,5	50	41,08	49,30	56,12	62,05	67,35	72,19	76,66
		0,75	75	28,12	33,75	38,41	42,47	46,10	49,41	52,47
		1	100	21,49	25,79	29,35	32,45	35,23	37,76	40,10
		1,25	125	17,44	20,93	23,82	26,34	28,59	30,65	32,55
		1,5	150	14,71	17,65	20,09	22,21	24,11	25,84	27,44
		1,75	175	12,73	15,28	17,39	19,23	20,88	22,37	23,76
		2	200	11,24	13,49	15,35	16,97	18,43	19,75	20,97
		2,25	225	10,07	12,08	13,75	15,20	16,50	17,69	18,78
		2,5	250	9,12	10,95	12,46	13,78	14,96	16,03	17,02
		2,75	275	8,34	10,01	11,40	12,60	13,68	14,66	15,57
		3	300	7,69	9,23	10,51	11,62	12,61	13,52	14,35
		3,25	325	7,14	8,57	9,75	10,78	11,70	12,54	13,32
		3,5	350	6,66	7,99	9,10	10,06	10,92	11,70	12,43
		3,75	375	6,24	7,49	8,53	9,43	10,24	10,97	11,65
		4	400	5,88	7,05	8,03	8,88	9,64	10,33	10,97

При проектировании безрезонансных конструкций серьезной проблемой является обеспечение не только собственной жесткости элементов конструкции, но и необходимой и достаточной жесткости их крепления в условиях ограничения массо-габаритных характеристик БРЭС.

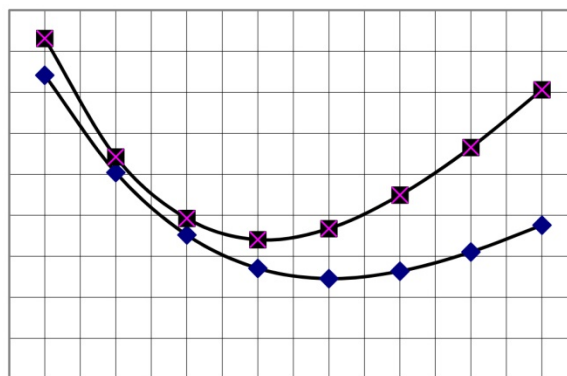
Поскольку на практике крепление конструкций не может быть абсолютно жестким, как это принято в математической модели жесткого защемления торцов, то СЧК цилиндра будет находиться в интервале между СЧК свободного опирания (нижний предел) и СЧК жесткого защемления (верхний предел) [12]. При этом задача конструктора сводится к поиску решения с обеспечением максимальной жесткости крепления при минимальных массо-габаритных характеристиках конструкции.

Некоторые рекомендации по решению этой задачи можно сделать на основании сравнительного анализа СЧК цилиндров 1, 2 и 3 со свободно опертыми торцами, полученными с использованием формул (1), (4) и защемленными торцами – по результатам расчетов СЧК в ANSYS в зависимости от волнового параметра n при параметре продольных колебаний $m = 1$. Графические зависимости для трех различных видов цилиндров показаны на рис. 6–8.



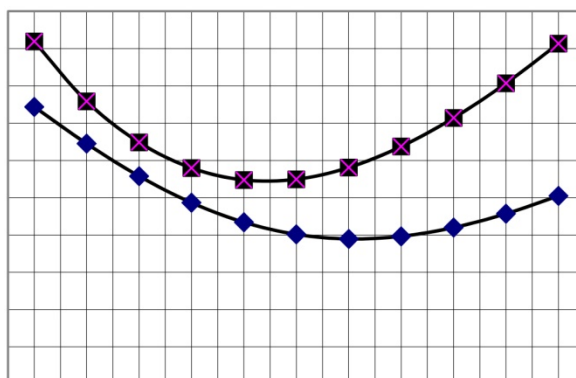
—◆— Опирание —■— Защемление

Рис. 6. Цилиндр 1 ($R = 76$ мм, $l = 305$ мм, $h = 1$ мм)



—◆— Опирание —■— Защемление

Рис. 7. Цилиндр 2 ($R = 106$ мм, $l = 150$ мм, $h = 1$ мм)



—◆— Опирание —■— Защемление

Рис. 8. Цилиндр 3 ($R = 150$ мм, $l = 75$ мм, $h = 1$ мм)

Анализ приведенных выше графиков позволяет сделать следующие выводы:

1. Наибольшая основная СЧК при одинаковых объемах и прочих равных характеристиках принадлежит цилиндру с меньшим отношением l/R .

2. Интервал жесткости крепления и эффективность жесткого крепления коротких цилиндров ($l/R < 2$) возрастают с ростом номера гармоник окружных волн n . Это дает возможность увеличить жесткость цилиндра исключением низкочастотных гармоник путем продольного оребрения узловых линий форм изгибных колебаний и при условии малого увеличения массы цилиндра от добавления ребер значительно повысить основную СЧК.

3. Дополнительные возможности повышения жесткости цилиндра появляются также при обрешении окружных узловых линий продольных изгибных колебаний поверхности цилиндра, как это следует из формулы (4) при $m > 1$.

4. На практике увеличение жесткости цилиндрической оболочки приборных отсеков ракет достигается путем введения дополнительных подкрепляющих оболочку продольных стрингеров и промежуточных поперечных шпангоутов. Однако эффективность такого конструкторского решения при создании безрезонансной конструкции будет зависеть от правильности выбора количества и расположения стрингеров и шпангоутов, а также соотношения их массы и жесткости.

Заключение

1. На основе проведенных исследований предложены аналитические выражения и таблицы для определения на ранних стадиях проектирования основной СЧК цилиндрических конструкций безрезонансных блоков БРЭС.

2. Выполненные тестовые расчеты, в том числе с использованием пакета программ ANSYS, подтвердили достоверность и необходимую точность результатов расчета СЧК цилиндрических конструкций для практического применения предложенных инструментов.

3. Разработка методики создания безрезонансных стрингерно-шпангоутных цилиндрических конструкций герметичных блоков БРЭС требует проведения дополнительных исследований.

Список литературы

1. Свиридюк Д. М. Повышение эксплуатационных характеристик двигателей путем введения технологической операции контроля герметичности вакуум-плотных корпусов РЭА. М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, Авиационная и ракетно-космическая техника, 2009.
2. Тюлевин С. В. Анализ отказов бортовых радиоэлектронных средств // Наука и инновации в современном мире: техника и технологии. Одесса, 2017. С. 7–31.
3. Ненашев А. П. Конструирование радиоэлектронных средств : учебник для радиотехн. спец. вузов. М. : Высш. шк., 1990.
4. Прочность, устойчивость, колебания : справочник / под ред. И. А. Биргер, Я. Г. Пановко. М. : Машиностроение, 1968. Т. 3.
5. Справочник по динамике сооружений / под ред. И. М. Коренева. М. : Стройиздат, 1972.
6. Вибрации в технике : справочник / ред. совет: В. Н. Челомей (пред.). М. : Машиностроение, 1978. Т. 1.
7. Лейзерович Г. С., Тарануха Н. А. О математической модели нелинейных колебаний круговых цилиндрических оболочек с начальными неправильностями // Вестник Нижегородского университета. 2009. № 6.
8. Кубенко И. Д., Ковальчук П. С., Подчасов Н. П. Нелинейные колебания цилиндрических оболочек. Киев : Выща школа, 1989.
9. Дяченко И. А., Миронов А. А., Свердлик Ю. М. Сравнительный анализ теории и конечно-элементных моделей расчета свободных колебаний цилиндрических оболочек // Транспортные системы. 2019. № 39.
10. Свободные колебания круговой цилиндрической оболочки, защемленной по торцам. URL: scadsoft.com/tests_scad/index/test/77
11. Верификационный отчет по программному комплексу MicroFe. РААСН, ООО Техсофт, 2009.
12. Талицкий Е. Н. Защита электронных средств от механических воздействий. Владимир : ВГУ, 2001.

References

1. Sviridyuk D.M. *Povyshenie ekspluatatsionnykh kharakteristik dvigateley putem vvedeniya tekhnologicheskoy operatsii kontrolya germetichnosti vakuum-plotnykh korpusov REA = Improving the performance characteristics of engines by introducing a technological operation to control the tightness of vacuum-tight REA housings*. Moscow: MGTU im. N.E. Bauman, Aviatcionnaya i raketno-kosmicheskaya tekhnika, 2009. (In Russ.)
2. Tyulevin S.V. Analysis of on-board electronic equipment failures. *Nauka i innovatsii v sovremennom mire: tekhnika i tekhnologii = Science and innovation in the modern world: engineering and technology*. Odessa, 2017:7–31.
3. Nenashev A.P. *Konstruirovaniye radioelektronnykh sredstv: uchebnik dlya radiotekhn. spets. vuzov = Designing radio-electronic means: a textbook for radio engineers. special universities*. Moscow: Vyssh. shk., 1990. (In Russ.)
4. Birger I. A., Panovko Ya. G. (eds.) *Prochnost', ustoychivost', kolebaniya: spravochnik = Strength, stability, vibrations: reference book*. Moscow: Mashino-stroenie, 1968;3. (In Russ.)
5. Korenev I. M. (ed.) *Spravochnik po dinamike sooruzheniy = Handbook of structure dynamics*. Moscow: Sroyizdat, 1972. (In Russ.)

6. Chelomey V. N. (ed.) *Vibratsii v tekhnike: spravochnik = Vibrations in engineering: a reference book*. Moscow: Mashinostroenie, 1978;1. (In Russ.)
7. Leyzerovich G.S., Taranukha N.A. On a mathematical model of nonlinear oscillations of circular cylindrical shells with initial irregularities. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta = Bulletin of the Nizhny Novgorod University*. 2009;6. (In Russ.)
8. Kubenko I.D., Koval'chuk P.S., Podchasov N.P. *Nelineynye kolebaniya tsilindricheskikh obolochek = Nonlinear oscillations of cylindrical shells*. Kiev: Vyshcha shkola, 1989.
9. Dyachenko I.A, Mironov A.A., Sverdlik Yu.M. *Comparative analysis of the theory and finite element models for calculating free vibrations of cylindrical shells. Transportnye sistemy = Transport systems*. 2019;39. (In Russ.)
10. *Svobodnye kolebaniya krugovoy tsilindricheskoy obolochki, zashchemlennoy po tortsam = Free vibrations of a circular cylindrical shell, pinched at the ends*. (In Russ.) Available at: scadsoft.com/tests_scad/index/test/77
11. *Verifikatsionnyy otchet po programmnomu kompleksu MicroFe = Verification report on the MicroFe software package*. RAASN, OOO Tekhsoft, 2009. (In Russ.)
12. Talitskiy E.N. *Zashchita elektronnykh sredstv ot mekhanicheskikh vozdeystviy = Protection of electronic devices from mechanical influences*. Vladimir: VGU, 2001. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Сергей Иванович Фролов

кандидат технических наук,
доцент кафедры конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: ra4foc@yandex.ru

Евгения Анатольевна Данилова

кандидат технических наук,
доцент кафедры конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: siori@list.ru

Георгий Васильевич Таньков

кандидат технических наук,
доцент кафедры конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: g.tankov43@mail.ru

Игорь Иванович Кочегаров

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: kipra@pnzgu.ru

Алексей Валерьевич Григорьев

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: a_grigorev@mail.ru

Sergei I. Frolov

Candidate of technical sciences,
associate professor of sub-department
of radio equipment design and production,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Evgeniya A. Danilova

Candidate of technical sciences,
associate professor of sub-department
of radio equipment design and production,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Georgiy V. Tan'kov

Candidate of technical sciences,
associate professor of sub-department
of radio equipment design and production,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Igor' I. Kochegarov

Candidate of technical sciences, associate professor,
associate professor of sub-department
of radio equipment design and production,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Alexey V. Grigoriev

Candidate of technical sciences, associate professor,
associate professor of sub-department
of radio equipment design and production,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

УПРАВЛЕНИЕ РИСКАМИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ЯДЕРНЫХ ОБЪЕКТОВ ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА НА ОСНОВЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ДИАГНОСТИКИ ИХ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ

С. В. Васильева¹, О. В. Коновалова², А. М. Панкин³,
И. А. Тутнов⁴, А. В. Соболев⁵, В. С. Царев⁶

¹ Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований, Москва, Россия

² Фонд поддержки научно-технического развития «Наукоемкие технологии», Москва, Россия

³ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

^{4,6} Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия

⁵ Обнинский институт атомной энергетики Национального исследовательского
ядерного университета «МИФИ», Обнинск, Россия

¹ S218a@mail.ru, ^{2,4} office@energodiagnostika.ru, ³ alpank@niti.ru,

⁵ sobolevartem82@gmail.com, ⁶ Tsarev_VS@nrcki.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Приоритетная идея управления техногенными рисками опасных энергетических объектов РФ на основе измерительной диагностической информации заключается в формировании различных видов деятельности по научному обоснованию и инструментальному обеспечению допустимости производственных состояний и рисков, текущей функциональной безопасности и эксплуатационной надежности, экологической приемлемости объектов, производственных технологий, инженерных систем, сетей и сооружений, в первую очередь оборудования АЭС, нефтяной и газовой промышленности по их фактическому техническому состоянию. *Материалы и методы.* В период длительной эксплуатации указанного оборудования отличительной особенностью современной методологии управления рисками эксплуатации опасных производственных объектов является стремление к использованию перспективных методов оценок возможных опасностей на основе имитационного моделирования событий разрушительного и пожароопасного характера, процессов деградации служебных свойств, а также вероятностного прогнозирования момента перехода конкретного вида оборудования или его конструкции в критическое состояние и последующего разрушения. *Результаты.* Показан состав информационной модели системы управления техногенными рисками потенциально опасных объектов на базе риск-ориентированной интегральной оценки техногенной безопасности и экономической выгоды. Представлена позитивная перспектива управления техногенными рисками объектов энергетического комплекса при формировании программ их технического обслуживания и ремонта с учетом измерительной диагностической информации о контролируемых объектах. *Вывод.* Предложения по системному улучшению качества управления техногенными рисками энергетических опасных объектов ТЭК обладают определенными технико-экономическими преимуществами, а именно: научно обоснованной оптимизацией затрат на все мероприятия по управлению рисками промышленного функционирования энергетического объекта при его длительной эксплуатации; возможность эволюционного развития системы диагностирования и прогнозной оценки риска; возможность дальнейшего развития системы культуры безопасности эксплуатации энергетического объекта.

Ключевые слова: ядерная безопасность, риск, диагностика, ядерный объект, информационная модель, инструментальное и информационное обеспечение, технологический и производственный процессы, имитационное моделирование

Для цитирования: Васильева С. В., Коновалова О. В., Панкин А. М., Тутнов И. А., Соболев А. В., Царев В. С. Управление рисками энергетических ядерных объектов топливно-энергетического комплекса на основе измерительной диагностики их технического состояния // Надежность и качество сложных систем. 2021. № 1. С. 114–122. doi:10.21685/2307-4205-2021-1-11

RISK MANAGEMENT OF NUCLEAR POWER FACILITIES IN THE FUEL AND ENERGY COMPLEX BASED ON MEASUREMENT DIAGNOSTICS THEIR TECHNICAL CONDITION

**S.V. Vasil'eva¹, O.V. Konovalova², A.M. Pankin³,
I.A. Tutnov⁴, A.V. Sobolev⁵, V.S. Tsarev⁶**

¹ Trinity Institute for Innovative and Fusion Research, Moscow, Russia

² Foundation for Support of Scientific and Technical Development "High Technologies", Moscow, Russia

³ Saint-Petersburg Polytechnic University named after Peter the Great, Saint-Petersburg, Russia

^{4,6} National Research Center "Kurchatov Institute", Moscow, Russia

⁵ Obninsk Institute of Nuclear Power Engineering MEPhI, Obninsk, Russia

¹ S218a@mail.ru, ^{2,4} office@energodiagnostika.ru, ³ alpank@niti.ru,

⁵ sobolevartem82@gmail.com, ⁶ Tsarev_VS@nrcki.ru

Abstract. *Background.* The priority idea of managing technogenic risks of hazardous energy facilities of the Russian Federation on the basis of measuring diagnostic information is to form various activities for scientific substantiation and instrumental support of the admissibility of production conditions and risks, current functional safety and operational reliability, environmental acceptability of facilities, production technologies, engineering systems, networks and structures, primarily equipment for nuclear power plants, oil and gas industry according to their actual technical condition. *Materials and methods.* During the period of long-term operation of the specified equipment, a distinctive feature of the modern risk management methodology for the operation of hazardous production facilities is the desire to use promising methods for assessing possible hazards based on the simulation of destructive and fire hazardous events, degradation processes of service properties, as well as probabilistic forecasting of the moment of transition of a specific type of equipment or its structure in critical condition and subsequent destruction. *Results.* The composition of the information model of the management system for man-made risks of potentially hazardous objects based on risk-oriented integral assessment of man-made safety and economic benefits is shown. The article presents a positive perspective for managing technogenic risks of energy complex objects when developing programs for their maintenance and repair, taking into account measuring diagnostic information about controlled objects. *Conclusion.* Proposals for the systematic improvement of the quality of man-made risk management at hazardous energy facilities in the fuel and energy complex have certain technical and economic advantages, namely: scientifically grounded optimization of costs for all measures to manage risks of industrial operation of a power facility during its long-term operation; the possibility of evolutionary development of the system for diagnosing and predictive risk assessment; the possibility of further development of the safety culture system for the operation of an energy facility.

Keywords: nuclear safety, risk, diagnostics, nuclear facility, information model, instrumental and information support, technological and production processes, simulation

For citation: Vasil'eva S.V., Konovalova O.V., Pankin A.M., Tutnov I.A., Sobolev A.V., Tsarev V.S. Risk management of nuclear power facilities in the fuel and energy complex based on measurement diagnostics their technical condition. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2021;1:114–122. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2021-1-11

Современные тенденции развития технологий обеспечения безопасности сложных технических систем и сооружений указывают на новые научные направления, которые определяют актуальность постоянного развития культуры безопасной эксплуатации потенциально опасных производственных объектов [1, 2], в частности объектов атомной энергетики РФ. В связи с этим появилась существенная необходимость на основе физико-технологических положений непрерывного диагностического мониторинга технического состояния ответственного энергетического оборудования промышленных предприятий ТЭК приступить к новому переосмыслению существующего способа понимания и трактовки опасных явлений и событий разрушительного и пожароопасного характера при управлении техногенными рисками потенциально опасных ядерных объектов ТЭК.

Приоритетная идея управления техногенными рисками опасных энергетических объектов РФ на основе измерительной диагностической информации заключается в формировании различных видов деятельности по научному обоснованию и инструментальному обеспечению допустимости

производственных состояний и рисков, текущей функциональной безопасности и эксплуатационной надежности, экологической приемлемости объектов, производственных технологий, инженерных систем, сетей и сооружений по их фактическому техническому состоянию. В период длительной эксплуатации указанного оборудования отличительной особенностью современной методологии управления рисками эксплуатации опасных производственных объектов является стремление к использованию перспективных методов оценок возможных опасностей на основе имитационного моделирования событий разрушительного и пожароопасного характера, процессов деградации служебных свойств, а также вероятностного прогнозирования момента перехода конкретного вида оборудования или его конструкции в критическое состояние и последующего разрушения. Поэтому необходимость постоянного улучшения культуры безопасной эксплуатации различных объектов и сооружений ТЭК для текущего периода и будущего представляется актуальной.

Формирование системы культуры безопасности энергетических комплексов и сооружений ТЭК предполагает определить понятийное определение термина «Культура безопасности эксплуатации». Применение понятий «Культура безопасности» для выявления и анализа техногенных опасностей впервые было выполнено международным агентством по атомной энергии МАГАТЭ в 1986 г. для анализа причин, исходных событий и последствий аварии на Чернобыльской АЭС [3]. Для текущего момента многими экспертами в общем случае «Культура безопасности» для этапа эксплуатации потенциально опасных объектов трактуется как общее состояние технического развития производственного объекта, интегрируемое с деятельностью человека, менеджмента и администрации, в целом общества. Критериями качества этой деятельности являются индикаторные характеристики надежности энергетической техники, надежности работников и их отношения к вопросам обеспечения безопасной жизни, охраны труда, экономически оправданной практической производственной деятельности по снижению уровня опасности для окружающего мира. Обобщая многочисленные понятийные определения «Культура безопасности», можно для нашего случая уточнить это определение. Культура безопасности эксплуатации объекта ТЭК – квалификационная, психологическая подготовленность всех лиц, инструментальное и информационное обеспечение всех технологических и производственных процессов, организационно-инженерная система производственной деятельности, при которой обеспечение промышленной безопасности и экологической приемлемости текущего и будущего функционирования этого объекта является приоритетной целью и внутренней потребностью, приводящей к самосознанию ответственности и к самоконтролю при выполнении всех работ.

Следующим важным этапом становления организационно-инженерной системы управления техногенными рисками потенциально опасных объектов ТЭК на основе измерительной диагностической информации эксплуатационного мониторинга их технического состояния является определение и обоснование базовых принципов формирования такой системы. Эти базовые принципы могут быть сформулированы, исходя из того, что количественная величина риска, вероятности наступления события отказа, аварии или иной чрезвычайной ситуации на объектах энергетического ядерного комплекса никогда не может быть уменьшена до нуля. До недавнего времени, несмотря на применение принципа соразмерности регулирующего воздействия, для управления рисками функционирования объектов имеются ограничения, которые обусловлены положениями федерального закона¹. Эти ограничения устанавливают для всех видов технического надзора за безопасностью объектов ТЭК единую интенсивность контрольных и надзорных мероприятий, которым со всей очевидностью предшествовали процессы эксплуатационного мониторинга и диагностического прогнозирования ожидаемых и возможных опасностей, рисков будущей эксплуатации опасных энергетических объектов. В текущий период появилась инициатива при диагностировании предполагаемых опасных событий разрушительного и пожароопасного характера учитывать фактическое техническое состояние энергетического объекта, степень тяжести возможных опасностей, частоты их проявления, трудности превентивного предупреждения и преодоления, вероятность несоблюдения персоналом объекта обязательных требований безопасности и многое другое. Этому способствовало появление в атомной энергетике стратегии перехода с технического обслуживания и ремонта основного оборудования АЭС по регламенту на техническое обслуживание и ремонт по фактическому состоянию. Концепция этой стратегии была принята в атомной энергетике в начале 2000-х гг. [4].

¹ О защите прав юридических лиц и индивидуальных предпринимателей при осуществлении государственного контроля (надзора) и муниципального контроля : федер. закон № 294-ФЗ от 26 декабря 2008 г.

В соответствии с ней на всех АЭС РФ, в том числе и на строящихся, создавались отделы технического диагностирования, которые должны развивать алгоритмы диагностирования особо ответственного оборудования станции и в первую очередь потенциально опасного для персонала и окружающего населения. К этому следует отнести и перспективу внедрения риск-ориентированного подхода при организации практических работ на потенциально опасных объектах, в первую очередь по техническому обслуживанию и предупредительному ремонту [5].

В зависимости от принимаемой концепции оценки риска можно разделить перспективу внедрения риск-ориентированного подхода на применение статической и динамической модели (рис. 1).

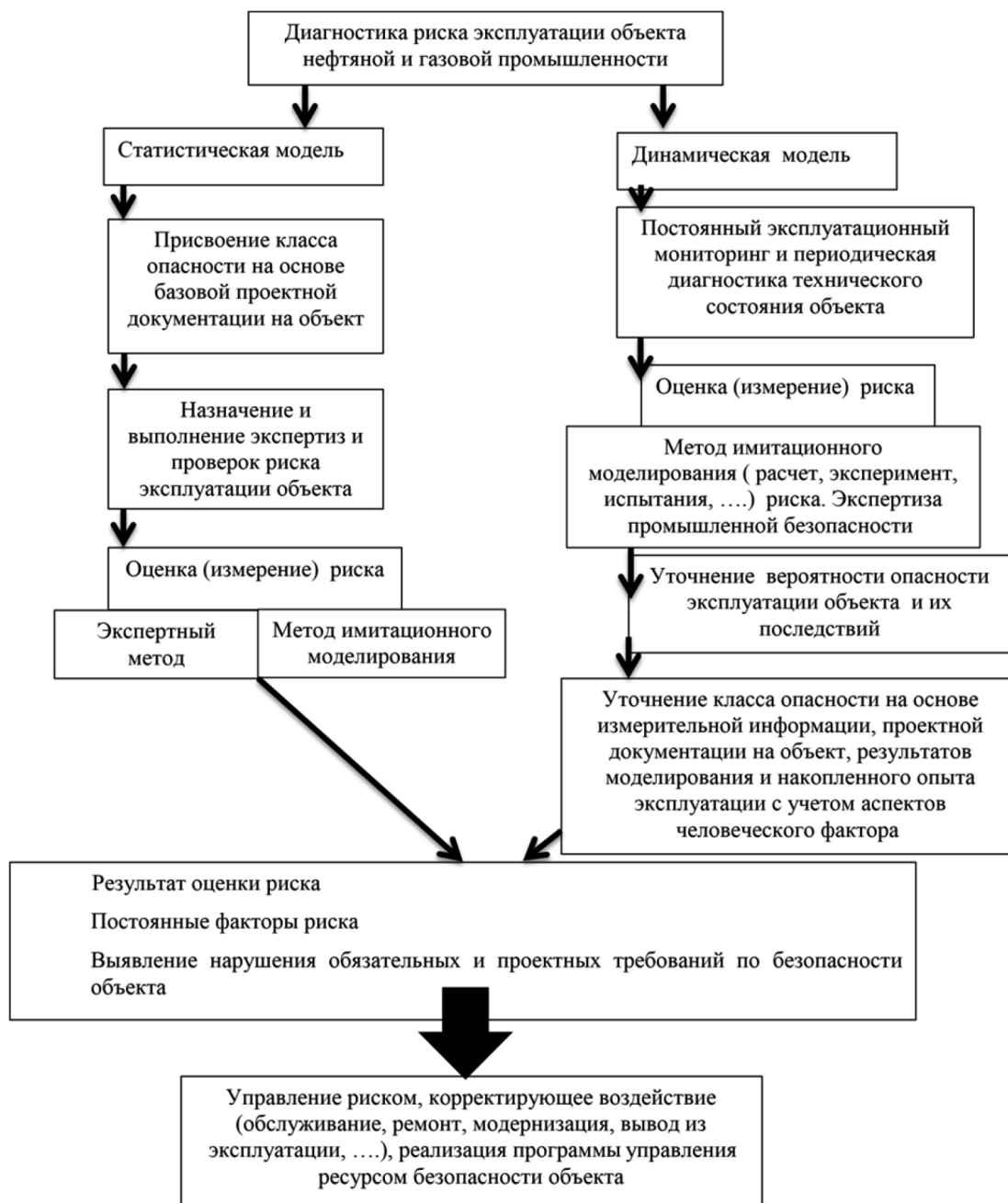


Рис. 1. Иллюстрация концепции риск-ориентированного подхода для обоснования гарантий безопасности текущей и будущей эксплуатации объектов ТЭК

Динамическая модель оценки риска предусматривает проведение диагностических измерений фактического технического состояния объекта и изменение категории риска в зависимости от выявленных фактов нарушений обязательных требований и имевших место случаев причинения вреда.

Статическая модель такой возможности не предусматривает. В общем случае при инструментальном развитии комплексной системы риск-ориентированного подхода оценки безопасности будущего функционирования объекта ТЭК, в первую очередь для этапа эксплуатации, должны быть созданы позитивные условия и приняты превентивные меры, гарантирующие, что последствия любого события разрушительного и пожароопасного характера, чрезвычайной ситуации, аварии или инцидента на любом энергетическом объекте будут ограниченными. При этом ущерб от этих последствий может быть значительным, но приемлемым по общим социальным критериям и пределам безопасности жизнедеятельности населения страны, региона. Поэтому при формировании и развитии комплексной системы риск-ориентированного подхода к оценкам промышленной и экологической безопасности объектов энергетического комплекса требуется особый осознанный анализ качества и приемлемости пределов техногенного риска, достоверности исходной информации для различных оценок функциональной безопасности и надежности, экологической приемлемости условий эксплуатации любых объектов. Это касается в первую очередь точности исходных данных и методик (методов, алгоритмов), важных для оценок возможностей принять приемлемым достигнутое качество условий эксплуатации и уровней риска, особенно в разрезе достоверности результатов оценок вероятности реализации угроз и нанесения вреда здоровью, гибели людей. Это также касается способностей и возможностей для точного выявления существенного ущерба в период промышленной эксплуатации объектов ТЭК. Все это тесно связано с таким понятием, как культура безопасной эксплуатации, которое еще только находится на начальной стадии своего становления, хотя уже широко и эффективно используется [2, 6].

В нашем случае качество и культуру безопасности эксплуатации объектов ТЭК пока следует определять как набор индикаторных служебных характеристик и особенностей производственной деятельности организации, которая эксплуатирует объект. При этом данный набор предполагает учет и контроль поведения, результатов деятельности отдельных лиц, принимающих решения в области безопасности, охраны труда и т.д. Со всей очевидностью, содержание общей концепции «Культура безопасности эксплуатации» сложных систем и сооружений энергетических объектов ТЭК выходит за рамки эксплуатационной деятельности любой энергетической системы или комплекса. Эта концепция обычно охватывает все процессы для всех стадий жизненного цикла потенциально опасного энергетического объекта, которые могут оказать влияние на безопасную жизнедеятельность. Концепция культуры безопасности эксплуатации промышленных сооружений и объектов ТЭК обязана охватывать разные сферы управления состоянием функциональной безопасности, в том числе законодательную, регулирующую, технологическую, экономическую и др. Все эти сферы устанавливают обязательное условие: для проектного функционирования опасных промышленных объектов и сооружений ТЭК должны быть представлены необходимые обоснования и точные гарантии безопасности и эксплуатационной надежности. Концепция культуры безопасности эксплуатации сооружений объектов ТЭК является одним из важных аспектов управления техногенными рисками потенциально опасных объектов на основе измерительной информации эксплуатационного мониторинга и прогнозирования изменения их технического состояния. Вместе с этим все сферы управления состоянием защищенности от возможных аварий и общая система культуры безопасности эксплуатации связаны с проявлением определенных обстоятельств, обусловленных человеческим фактором. На основе вышесказанного применительно к условиям управления техногенными рисками потенциально опасных энергетических объектов ТЭК можно выделить, по крайней мере, следующие базовые составляющие:

1. Правильное проектирование, создание, промышленная эксплуатация и прекращение эксплуатации объектов или инженерных технологических систем объектов ТЭК, а также реабилитация территорий, на которых был размещен объект или энергетический комплекс. Для правильного и качественного осуществления этих видов деятельности важно отдельно для каждого этапа жизненного цикла объекта определить критерии и пределы риска в индикаторах вероятности приемлемого, надежного и безаварийного их функционирования в составе всей производственной инфраструктуры производственных компонентов конкретного энергетического комплекса.

2. Создание необходимой интегральной инженерно-организационной и экономической системы планирования и реализации мер превентивного и текущего управления природными и техногенными явлениями разрушительного и пожароопасного характера, сопровождающимися значительным ущербом как для организации, эксплуатирующей объект или комплекс, так и для потребителей

энергии. Эта система должна включать реализацию возможности диагностического мониторинга возможных опасностей и управление рисками технологических процессов, и практического производственного использования объектов или комплексов.

3. Создание систем диагностирования для оценки технического состояния сложных технических объектов в процессе их эксплуатации [5, 6].

Суть организационно-инженерной системы культуры безопасности эксплуатации энергетических объектов ТЭК заключается в гарантированном обеспечении комфортной жизнедеятельности для рабочего персонала, населения, потребителей энергии, а также сохранения окружающей среды на всех этапах создания, строительства, монтажа и эксплуатации сооружений, оборудования и инженерных систем и различных объектов ТЭК, вплоть до вывода их из эксплуатации и реабилитации территорий. В общем случае культура безопасности эксплуатации есть свод верифицированных гарантий, что все делается правильно и соответствует принятым правилам, нормам, критериям промышленной, радиационной и экологической, ядерной безопасности. Культура безопасности эксплуатации – это также уверенность в том, что эти гарантии получены на основе правильно выполненных комплексных инженерно-диагностических обследований и диагностических прогнозов состояния функциональной безопасности объектов. Это означает, например, что правильно доказана функциональная прочность, надежность конструктивных компонентов объектов или комплексов, их инженерных систем, сетей, сооружений, безопасность технологических процессов. Культура безопасности эксплуатации есть уверенность в том, что имеет место разумная защищенность не только персонала объектов ТЭК, в том числе строителей, монтажников и эксплуатационников, но и всего населения региона или близлежащих территорий.

Для персонала общая система культуры безопасности эксплуатации состоит из нескольких базовых составляющих, которые поясняет информационная модель на рис. 2. Важный аспект культуры безопасности эксплуатации объектов – это знания, опыт и компетентность лиц, которые являются ответственными за техническое состояние и риски безопасности при проектировании, создании и эксплуатации потенциально опасных энергетических объектов. Культура безопасности эксплуатации в первую очередь есть качество эксплуатации и квалификационная, профессиональная пригодность, подготовленность и успешное владение трудовыми навыками всех лиц, целевая производственная деятельность которых – это обеспечение функциональной безопасности, системной надежности и экологической приемлемости объектов и комплексов. Поэтому одним из главных принципов для постоянного развития потенциала и культуры безопасности эксплуатации энергетических объектов ТЭК является принцип управления качеством эксплуатации и проектной документации объектов и инженерных систем [5, 6]. Реализация этого принципа на практике в свою очередь требует определить критерии риска эксплуатации, в том числе критерий качества нормативного и методического сопровождения и точности оценок технического состояния и промышленной безопасности. Этот критерий должен рассматривать во всех направлениях при осуществлении промышленной деятельности энергетического объекта, но в первую очередь это касается измерений и оценок системной надежности и устойчивости к противодействию возможным авариям. Также этот критерий должен в общем виде обеспечить возможность правильного выбора физического явления и информативных параметров, дающих наиболее объективную измерительную информацию о составляющих риска и достигнутого уровня промышленной, радиационной и экологической, ядерной безопасности. Поэтому важно уточнить, что одним из основных принципов формирования и развития комплексной системы культуры безопасности эксплуатации энергетических объектов ТЭК является принцип верифицированного выбора физического явления и апробации информативных параметров, дающих наиболее объективную информацию о составляющих, факторах риска и безаварийности эксплуатации конкретного производственного объекта. Другим важным принципом здесь будет безусловное обеспечение целенаправленного на постоянной основе мониторинга составляющих риска, с которыми сталкивается организация, эксплуатирующая энергетические объекты ТЭК. Вместе с этими основными принципами формирования и развития комплексной системы управления техногенными рисками потенциально опасных энергетических объектов на основе измерительной информации эксплуатационного диагностического мониторинга и прогнозирования их технического состояния на общей платформе парадигмы культуры безопасности сложных технических систем и сооружений следует предложить следующие рабочие, функциональные принципы:

– принцип достоверной оценки вероятности возникновения той или иной неблагоприятной ситуации в условиях эксплуатации и негативных последствий (возможного ущерба), так называемый принцип адекватности;

- принцип верифицированного формирования и затем постоянного обновления инструментальных (информационных, технических, измерительных и пр.) средств мониторинга, прогнозирования и управления риском эксплуатации объекта или комплекса;
- принцип правильного установления пределов социально приемлемых рисков и приемлемой платы (допустимого ущерба, компенсации) за проектные пределы рисков, которые будут приняты организацией, эксплуатирующей объект или комплекс;
- принцип достижения технической возможности и практической осуществимости эксплуатационного мониторинга за тем, чтобы принятые лимитные показатели риска эксплуатации объектов или комплексов находились в пределах обоснованных индикаторов запретов и ограничений;
- принцип обязательного соответствия текущего состояния принятым критериям промышленной безопасности и индикаторам социально допустимого риска;
- принцип постоянного уточнения и выработки новых практических рекомендаций по формированию стратегии внутрифирменного стратегического планирования культуры безопасности эксплуатации энергетических объектов ТЭК на основе научно-технического прогресса;
- принцип эффективного распределения ресурсов эксплуатирующей объект или комплекс организации для превентивного противодействия угрозам аварий и инцидентов с учетом степени риска (принцип совместимости) для конечных потребителей услуг (рис. 2).



Рис. 2. Основные составляющие информационной модели культуры безопасности эксплуатации объекта нефтегазового сектора ТЭК

Таким образом, могут быть определены основные базовые принципы формирования и развития комплексной системы управления техногенными рисками потенциально опасных энергетических объектов ТЭК на основе измерительной диагностической информации об их техническом состоянии. Эти принципы представляют концептуальную основу для формирования перспективы управления техногенными рисками опасных объектов в аспектах их культуры безопасности. Сущность этой перспективы – возможность динамического управления ресурсом и безопасностью будущей промышленной эксплуатации энергетического объекта ТЭК с учетом его фактического состояния.

Заключение

Предложения по системному улучшению качества управления техногенными рисками энергетических опасных объектов ТЭК в аспектах их культуры безопасности на основе измерительной диагностической информации эксплуатационного мониторинга и прогнозирования их технического состояния обладают определенными технико-экономическими преимуществами, а именно:

- научно обоснованная оптимизация временных и материальных, финансовых затрат на все мероприятия по управлению рисками промышленного функционирования энергетического объекта при его длительной эксплуатации за счет использования имеющейся дифференциации опасностей по их потенциально ожидаемому ущербу для окружающего мира, собственников объекта и персонала;
- возможность эволюционного развития системы диагностирования и прогнозной оценки риска с постепенным повышением уровня ее гибкости за счет дополнения используемых критериев и учета различных динамических факторов опасностей;
- возможность дальнейшего развития системы культуры безопасности эксплуатации энергетического объекта за счет внедрения современных научно обоснованных подходов оценок риска будущей эксплуатации промышленных энергетических систем и комплексов.

Список литературы

1. Кузнецов В. Н. Культура безопасности: социологическое исследование : монография. М. : Наука, 2001. 318 с.
2. Махутов Н. А., Тутнов И. А., Фролов К. В. [и др.]. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Функционирование и развитие сложных народнохозяйственных систем, систем связи и коммуникаций. М. : Знание, 1998. Ч. 1. 488 с.
3. URL: www.iaea.org
4. Хамаза А. А. Риск ориентированный подход в регулирующей деятельности в области ядерной и радиационной безопасности // Радиация и риск. 2015. Т. 24, № 4. С. 87–97.
5. Панкин А. М. Об основных понятиях технической диагностики // Контроль. Диагностика. 2010. № 10. С. 38–45.
6. Власов С. В., Степанов В. В., Тутнов И. А. Промышленная безопасность трубопроводов воды и пара высокого давления : монография. М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2012. 210 с.

References

1. Kuznetsov V.N. *Kul'tura bezopasnosti: sotsiologicheskoe issledovanie: monografiya = Culture of safety: a sociological study: a monograph*. Moscow: Nauka, 2001:318. (In Russ.)
2. Makhutov N.A., Tutnov I.A., Frolov K.V. [et al.]. *Bezopasnost' Rossii. Pravovye, sotsial'no-ekonomicheskie i nauchno-tekhicheskie aspekty. Funktsionirovanie i razvitie slozhnykh narodnokhozyaystvennykh sistem, sistem svyazi i kommunikatsiy = Security of Russia. Legal, socio-economic, scientific and technical aspects. Functioning and development of complex national economic systems, communication and communication systems*. Moscow: Znanie, 1998;1:488. (In Russ.)
3. Available at: www.iaea.org
4. Khamaza A.A. Risk-based approach in regulatory activities in the field of nuclear and radiation safety. *Radiatsiya i risk = Radiation and risk*. 2015;24(4):87–97. (In Russ.)
5. Pankin A.M. About the basic concepts of technical diagnostics. *Kontrol'. Diagnostika = Control. Diagnostics*. 2010;10:38–45. (In Russ.)
6. Vlasov S.V., Stepanov V.V., Tutnov I.A. *Promyshlennaya bezopasnost' truboprovodov vody i para vysokogo davleniya: monografiya = Industrial safety of high-pressure water and steam pipelines : monograph*. Moscow: MGTU im. N.E. Bauman, 2012:210. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Светлана Валерьевна Васильева

руководитель проекта,
Государственный научный центр
Российской Федерации
Троицкий институт инновационных
и термоядерных исследований
(Россия, г. Москва, г. Троицк, ул. Пушкиных, 12)
E-mail: S218a@mail.ru

Ольга Владимировна Коновалова

директор,
Фонд поддержки научно-технического развития
«Наукоёмкие технологии»
(Россия, г. Москва, ул. Кржижановского, 21/33, к. 1)
E-mail: office@energodiagnostika.ru

Александр Михайлович Панкин

доктор технических наук, доцент высшей школы
«Атомная и тепловая энергетика»,
Санкт-Петербургского политехнического
университета Петра Великого,
(Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29)
E-mail: alpank@niti.ru

Игорь Александрович Тутнов

доктор технических наук, профессор,
начальник лаборатории,
Национальный исследовательский центр
«Курчатовский институт»
(Россия, г. Москва, пл. акад. Курчатова 1)
E-mail: office@energodiagnostika.ru

Артем Владимирович Соболев

старший преподаватель,
кафедра атомных станций,
Обнинский институт атомной энергетики
Национального исследовательского ядерного
университета «МИФИ»
(Россия, Калужская обл., г. Обнинск,
тер. Студгородок, 1)
E-mail: sobolevartem82@gmail.com

Владимир Сергеевич Царев

научный сотрудник,
Национальный исследовательский центр
«Курчатовский институт»
(Россия, г. Москва, пл. акад. Курчатова, 1)
E-mail: Tsarev_VS@nrcki.ru

Svetlana V. Vasilyeva

Project manager,
State Scientific Center of the Russian Federation Trini-
ty Institute for Innovative and Fusion Research (12
Pushkovykh street, Troitsk, Moscow, Russia)

Olga V. Konovalova

Director,
Science and Technology Development Support Fund
"Science-Intensive Technologies"
(building 1, 21/33 Krzhizhanovsky street,
Moscow, Russia)

Alexander M. Pankin

Doctor of technical sciences,
associate professor of the higher school
"Nuclear and Thermal Power Engineering",
Saint-Petersburg Polytechnic University
named after Peter the Great
(29 Politekhnikeskaya street, Saint-Petersburg, Russia)

Igor A. Tutnov

Doctor of technical sciences, professor,
head of the laboratory,
National Research Center "Kurchatov Institute"
(1 Acad. Kurchatova square, Moscow, Russia)

Artem V. Sobolev

Senior lecturer,
sub-department of nuclear power plants,
Obninsk Institute of Atomic Energy
of National Research Nuclear University MEPhI
(1 Studgorodok, Obninsk, Kaluga region, Russia)

Vladimir S. Tsarev

Researcher,
National Research Center "Kurchatov Institute"
(1 Acad. Kurchatova square, Moscow, Russia)

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПЛАТФОРМЫ БИЗНЕС-ОБУЧЕНИЯ: АНАЛИТИКА ЛУЧШИХ ПРАКТИК

Е. В. Ширинкина

Сургутский государственный университет, Сургут, Россия
shirinkina86@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Актуальность исследования обусловлена тем, что развитие удаленной занятости и пандемии увеличивает потенциал дистанционного обучения, где особая роль отводится развитию обучающих платформ. Цель исследования – обобщить наиболее эффективные инструменты технологических обучающих платформ для решения определенных бизнес-задач. *Материалы и методы.* Эмпирической базой исследования послужили отчеты международных консалтинговых компаний EFMD, ELearning Inside, Technavio. В этой связи автором приводится аналитика лучших практик применения технологических обучающих платформ. *Результаты.* Аналитика лучших практик позволила выделить несколько надежных платформ, которые демонстрируют разнообразие функций и решаемых задач. Практическая значимость полученных результатов исследования заключается в том, что это позволит компаниям найти «ту самую» технологию среди сотен вариантов, которые существуют на рынке образовательных технологий для обеспечения эффективного бизнес-обучения. *Выводы.* Универсальность обучающих платформ (многофункциональность и всеохватность) имеет свои слабые стороны. Пользователям бывает очень легко запутаться в функциях, а разработчикам приходится в погоне за желаниями клиента постоянно менять архитектуру продукта, чтобы избежать ловушки универсальности, нужно создавать не платформу, а пространство для работы с разными инструментами для взаимодействия разных платформ.

Ключевые слова: технологические платформы обучения, цифровая экономика, образовательные технологии, бизнес-обучение, корпоративное обучение, эффективность

Для цитирования: Ширинкина Е. В. Технологические платформы бизнес-обучения: аналитика лучших практик // Надежность и качество сложных систем. 2021. № 1. С. 123–128. doi:10.21685/2307-4205-2021-1-12

TECHNOLOGY PLATFORMS FOR BUSINESS TRAINING: BEST PRACTICE ANALYTICS

E.V. Shirinkina

Surgut State University, Surgut, Russia
shirinkina86@yandex.ru

Abstract. *Background.* The relevance of the study is due to the fact that the development of remote employment and the pandemic increases the potential of distance learning, where a special role is given to the development of learning platforms. The purpose of the study is to summarize the most effective tools of technology learning platforms for solving specific business problems. *Materials and methods.* The empirical basis of the study was the reports of the international consulting companies EFMD, ELearning Inside, Technavio. In this regard, the author provides an analysis of the best practices for using technology training platforms. *Results.* Analytics of best practices allowed us to identify several reliable platforms that demonstrate a variety of functions and tasks. The practical significance of the research results obtained is that it will allow companies to find the "very" technology among the hundreds of options that exist on the educational technology market to provide effective business training. *Conclusions.* The versatility of training platforms (versatility and comprehensiveness) has its weaknesses. It can be very easy for users to get confused about functions, and developers have to constantly change the architecture of the product in pursuit of the client's desires, in order to avoid the trap of universality, you need to create not a platform, but a space for working with different tools for interaction between different platforms.

Keywords: technological learning platforms, digital economy, educational technologies, business training, corporate training, efficiency

For citation: Shirinkina E.V. Technology platforms for business training: best practice analytics. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2021;1:123–128. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2021-1-12

Введение

Каждая платформа наилучшим образом решает какие-то определенные бизнес-задачи в конкретной ситуации, поэтому каждый раз, когда возникает новая задача, имеет смысл просмотреть другие инструменты, наиболее подходящие для ее решения. Но как найти «ту самую» технологию среди сотен вариантов, которые есть на рынке?

Технологические платформы, связанные с обучением, могут совмещать в себе множество разных функций:

- дать пользователю все нужное для обучения (предоставить индивидуальную траекторию обучения, расписание, связь с группой и преподавателем, доступ к интерактивным заданиям и т.д.);
- дать преподавателю все нужное для донесения учебного материала (инструменты для оценивания, тестирования, выдачи сертификатов, разработки образовательного решения, библиотеки контента и т.д.);
- дать заказчику обучения все необходимое для организации процесса и анализа его эффективности (инструменты администрирования, отчетности, аналитики, обеспечения безопасности и конфиденциальности и т.д.) [1, 2].

Однако универсальная платформа имеет свои недостатки, поскольку в стремлении к универсальности могут быть неожиданные последствия. Если в компании большая вовлеченность в дистанционное обучение и платформа хорошо воспринимается пользователями, то она начинает использоваться для не связанного с обучением функционала: информирования, опросов, анкет, справок, и через какое-то время пользователь, заходя на такую универсальную платформу, теряется.

Для разработчиков универсальность – тоже своеобразный вызов. С одной стороны, пожелания заказчика по расширению функционала позволяют прокачать продукт. С другой стороны, иногда для их удовлетворения приходится пересматривать всю архитектуру платформы, а это связано с большими затратами времени и денег. Как найти решение, которое будет гибко адаптироваться под нужды пользователей, не теряя структуры и не требуя при этом постоянной перестройки готового продукта?

Идеальное IT-решение – это строить не одно здание с функционалом города, а целый город с разными модулями, с развитой инфраструктурой. Создавая платформу дистанционного обучения, нужно думать о пространстве дистанционного обучения и не ограничиваться одним универсальным инструментом.

Есть ли сегодня на рынке технологических образовательных решений такой философский камень? Можно ли его создать самим? Как безболезненно преодолеть рубеж выбора нужного решения для своей компании? О каких возможных недостатках технологической платформы нужно знать? Ответы на эти вопросы постараемся получить в результате исследования.

Методика исследования

Первый и самый главный вопрос: для какой бизнес-задачи, не для учебной, а для бизнес-задачи, необходимо применять платформу? Они могут быть совершенно разные, и каждая из них диктует свои требования к платформе. Если нужно закрыть пробелы высшего образования, обучить недостающим навыкам, то важно иметь возможность создавать макро- и микроучебные модули, составлять смешанные программы, развивать компетенции, обмениваться опытом, пользоваться базой знаний [3, 4].

Для того чтобы измерить эффективность обучающей платформы, возможно, требуется всего один параметр – пользуются ли ей. Процесс обучения можно построить и на Google Диске, просто загрузив в папки настолько потрясающие учебные материалы, что многие будут мечтать получить туда доступ. Когда контент, как легенда, переходит из уст в уста, обучающая платформа достигает определенного успеха. Создавать платформу необходимо с прицелом на построение максимально вовлекающего обучающего процесса. Безусловно, что человек, проходящий обучение, должен получать от него удовольствие: счастливый, довольный человек наиболее эффективен на работе.

Если обучение призвано снизить риски бизнеса (юридические, финансовые и т.д.), то платформа должна обеспечить своевременную и релевантную доставку контента, составление точной отчетности для аудита. Бизнес-задача по сокращению операционных издержек (уменьшение ошибок, сокращение периода адаптации сотрудников) диктует формат микрообучения с часто изменяемым контентом быстрого производства и с быстрой аналитикой. Если нужно массово информировать и вовлекать сотрудников, то платформа должна обеспечивать мобильность, простоту создания и доставки контента и использование различных инструментов для привлечения внимания.

Во-первых, всегда можно выбрать приоритеты, две-три задачи, и под них подобрать платформы. Во-вторых, это нормально – иметь несколько платформ под разные задачи и их интегрировать. В-третьих, в некоторых случаях, особенно в очень крупных компаниях, оправдано написание собственной платформы с нуля.

Аналитика лучших практик позволила выделить несколько надежных платформ, которые демонстрируют разнообразие функций и решаемых задач [5–7].

1. SHAREKNOWLEDGE – LMS на платформе SHAREPOINT, может автоматизировать все обучение в компании.

Сильные стороны:

- отчетность и аналитика;
- можно делегировать функции обучения разным сотрудникам, например, назначить тренера по определенному направлению.

2. DOCEBO – LMS с функциями социального обучения.

Сильные стороны:

- персонализированный учебный опыт и в части треков, и в части интерфейса для определенных групп сотрудников;
- социальное обучение: любой пользователь может создавать свой контент, брать на себя функцию эксперта в своей сфере и отвечать на вопросы своих коллег; так как ответы сохраняются и выдаются в поиске, за счет компетентных сотрудников создается корпоративная база знаний;
- широкий набор функций API для интеграции.

3. MOBILE LEARNING – мобильная платформа, которая действительно хорошо работает на разных устройствах (в отличие от многих других платформ).

Сильные стороны:

- одинаково быстрая работа на любых смартфонах и планшетах;
- поддержка любых версий ПО;
- возможность офлайн-обучения и тестирования.

4. HINTED – платформа интерактивных подсказок, встраивает обучающие подсказки в интерфейсы. Например, вы работаете в CRM-системе, в банковских системах со сложным интерфейсом и получаете подсказки прямо на рабочем месте. Это пример технологии для микрообучения.

Ожидается, что из-за пандемии коронавируса объем рынка образовательных технологий увеличится в 2,5 раза (рис. 1).

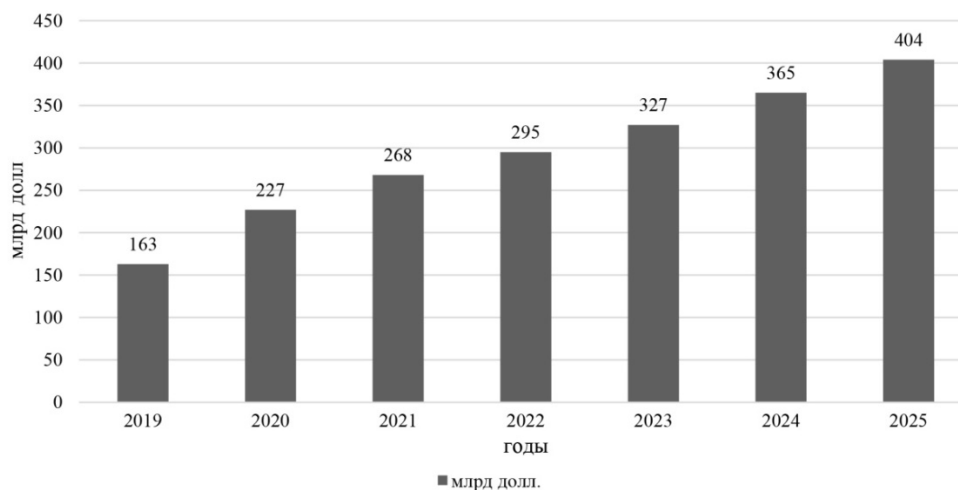


Рис. 1. Оценка глобального рынка образовательных технологий, млрд долл. [8]

Доля рынка соответственно увеличится до 5,2 % от мирового рынка образования.

Универсальность платформы (многофункциональность и всеохватность) имеет свои слабые стороны. Пользователям бывает очень легко запутаться в функциях, а разработчикам приходится в погоне за желаниями клиента постоянно менять архитектуру продукта. Чтобы избежать ловушки универсальности, нужно создавать не платформу, а пространство для работы с разными инструментами для взаимодействия разных платформ.

При выборе платформы принимать во внимание стоит не только ее функциональные особенности, но и возможность следовать концепции time-to-market. Если обновление контента происходит часто и регулярно, приходится жертвовать многоэтапным процессом согласования и отрисовки уникальных дизайнерских решений во имя скорости публикации, иначе информация устареет до выхода учебного материала.

Как быть, когда возникает вопрос: делать ли ставку на разнообразие систем или предпочесть путь качества и доступности «всего и сразу» в одном? Нужно делать ставку на пользу. Можно найти экономическую выгоду от ста платформ или пользу в разработке одной большой платформы, которая закроет сразу ряд задач, даже с учетом заведомо больших стартовых вложений, поэтому, принимая решение, необходимо продумывать и фиксировать бизнес-задачи, расставлять их в порядке значимости, оценивать предполагаемый эффект от каждой подобранной технологии.

Аналитика лучших практик

Опыт компании iSpring «Даем отточенные инструменты»

iSpring – международный провайдер и платформа системы дистанционного обучения, дает инструментарий, который позволяет очень быстро, силами небольшого отдела T&D упаковать важную информацию и нести ее сотрудникам, партнерам и клиентам [2, 9].

Руководитель направления компании iSpring Михаил Кречин: «Бизнес всегда находится в агрессивной среде, в которой выживают те, кто может адекватно отвечать на внешние вызовы. В этом смысле возможность сделать онлайн-курс за 24 часа – это залог выживания. Насколько внутри компаний быстро распространяются знания и информация, настолько быстро бизнес может адаптироваться к новым условиям».

Для быстрого запуска качественного курса необходимы:

- проверенные шаблоны, чтобы сконцентрироваться на контенте, а не на его подаче;
- интерактивные элементы: тесты, диалоговые тренажеры;
- инструменты интеграции в курс любого контента – от записей действий с экрана до внутренних документов компании;
- совместимость с любыми устройствами.

Опыт Teachbase «Мыслим проектами»

Компания Teachbase работает с более чем 500 компаниями. Чем дальше, тем чаще клиенту нужно решать глобальную задачу запуска целой системы, и все чаще LMS не может решить те локальные задачи, которые ставит клиент, поэтому компания поменяла свой подход в сторону конструктора образовательных проектов. Реализация образовательного проекта характеризуется тремя ключевыми факторами: одна задача; конечные сроки; измеримые результаты [1–5].

Преимущества подхода:

1. Интеграция в любую корпоративную среду. Даже когда компании работают постоянно с одной платформой, им необходимо запускать новые проекты, под которые эта платформа, оказывается, не подходит. Образовательный проект можно вписать в интерактивный интерфейс, с которым люди уже работают, не заставляя сотрудников привыкать к еще одному внутреннему сервису. Например, если система обучения встраивается в личный кабинет, в нем всего лишь появляется новая строчка.

2. Решение локальных задач без изменений всей корпоративной системы, например, часто используются карты для организации входного обучения. Данные о прохождении обучения подгружаются в другие рабочие системы компании, где их видят руководители и HR.

3. Гибкость в работе с привычными инструментами создания контента. В зависимости от задачи подключаются внешние системы, которыми люди привыкли пользоваться. Для аналитики это

Power BI, «Яндекс.Метрика», Google Аналитика. Для создания и презентации контента – Tilda, YouTube, сервисы Google и т.д.

4. Измеримые результаты. Когда говорится об эффективности запуска новой LMS, нужно учесть столько факторов, что о точном измерении не может быть и речи. Когда дело касается одного образовательного проекта, можно оценить, насколько удалось выполнить его задачу, потому что она была одна. Важная функция – собрать данные из всех используемых в рамках проекта сервисов для аналитики.

Мировые технологические платформы – 2019

В этом обзоре собраны самые популярные мировые облачные платформы, заслужившие высокие оценки экспертов и пользователей [4, 8]. Оценки пользователей компания Finances Online собирала с помощью отслеживания упоминаний в социальных сетях и анализируя их окраску с помощью алгоритмов (негативный/позитивный/нейтральный отзыв). Упомянутые здесь системы упорядочены по убыванию рейтинга, присвоенного экспертами Finances Online (а не по показателю удовлетворенности пользователей):

1) ILT – Instructor-Led Training, обучение с помощью наставника, процесс которого схож с традиционным обучением в классе;

2) MOOC – Massive Open Online Course, массовые открытые онлайн-курсы, формат обучения, отличительной особенностью которого является большое количество студентов, необходимое для запуска, а также открытый доступ к контенту через Интернет;

3) CRM-система – Customer Relationship Management, система автоматизированного управления процессов взаимодействия с клиентами;

4) AICC – Aviation Industry Computer-Based Training Committee, самый первый стандарт электронного обучения. Более современной версией является стандарт SCORM.

Технологические платформы e-learning, созданные для корпоративных нужд, имеют свои отличительные особенности. Для таких решений, помимо кросс-платформенности и поддержки различных видов контента, важны такие критерии, как простота внедрения, надежность использования и администрирования, соответствие стандартам безопасности, поддержка разных потоков пользователей.

Заключение

Важно помнить, что не существует универсального решения, которое подошло бы каждой организации: небольшой компании важны одни вещи, а крупной корпорации – уже другие, поэтому при выборе платформы всегда стоит ознакомиться с характеристиками платформы на сайте, изучить существующие платформы и пообщаться с менеджерами, чтобы уточнить важные для компании детали.

Универсальность платформы (многофункциональность и всеохватность) имеет свои слабые стороны. Пользователям бывает очень легко запутаться в функциях, а разработчикам приходится в погоне за желаниями клиента постоянно менять архитектуру продукта, чтобы избежать ловушки универсальности, нужно создавать не платформу, а пространство для работы с разными инструментами для взаимодействия разных платформ.

Список литературы

1. Emmanuel N. Education technology is a global opportunity. URL: <https://techcrunch.com/2018/01/19/education-technology-is-a-global-opportunity/> (дата обращения: 24.08.2020).
2. Millennials On Track to be the Most Educated Generation to Date. URL: https://www.pewresearch.org/fact-tank/2018/03/16/how-millennials-compare-with-their-grandparents/ft_millennials-education_031715/ (дата обращения: 24.08.2020).
3. Захарова У. С. Производство MOOC в университете: цели, достижения, барьеры // Университетское управление: практика и анализ. 2019. № 23. С. 46–68.
4. EFMD. Digital age learning. Special interest group report, 2018. URL: http://www.efmd.org/images/stories/efmd/downloadables/Corporate_Advisory/2017/5a_SIG_DAL_Report.pdf (дата обращения: 24.08.2020).
5. Ширинкина Е. В. Платформы обучения в условиях цифровой трансформации // Надежность и качество сложных систем. 2020. № 1. С. 42–48.

6. ELearning Inside. Corporate microlearnings examples: real-world case studies, 2017. URL: <https://news.elearninginside.com/corporate-microlearning-examples/> (дата обращения: 24.08.2020).
7. Metaari: Game-based learning market will reach \$17 billion by 2023. URL: <https://www.gamesindustry.biz/articles/2018-08-08-metaari-game-based-learning-market-will-reach-usd17-billion-by-2023> (дата обращения: 24.08.2020).
8. Technavio. Online Language Learning Market in the US 2018-2022. Increased Use of VR to Boost Demand. URL: <https://www.technavio.com/> (дата обращения: 24.08.2020).
9. Куприяновский В. П., Сухомлин В. А., Добрынин А. П. [и др.]. Навыки в цифровой экономике и вызовы системы образования // International Journal of Open Information Technologies. 2017. Т. 5, № 1. С. 19–25.

References

1. Emmanuel N. *Education technology is a global opportunity*. Available at: <https://techcrunch.com/2018/01/19/education-technology-is-a-global-opportunity/> (accessed 24.08.2020).
2. *Millennials On Track to be the Most Educated Generation to Date*. Available at: https://www.pewresearch.org/fact-tank/2018/03/16/how-millennials-compare-with-their-grandparents/ft_millennials-education_031715/ (accessed 24.08.2020).
3. Zakharova U.S. Production of MOOK at the University: goals, achievements, barrier. *Universitetskoe upravlenie: praktika i analiz = University Management: practice and analysis*. 2019;23:46–68. (In Russ.)
4. EFMD. *Digital age learning. Special interest group report*. 2018. Available at: http://www.efmd.org/images/stories/efmd/downloadables/Corporate_Advisory/2017/5a_SIG_DAL_Report.pdf (accessed 24.08.2020).
5. Shirinkina E. V. Learning platforms in the context of digital transformation. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2020;1:42–48. (In Russ.)
6. ELearning Inside. Corporate microlearnings examples: real-world case studies, 2017. Available at: <https://news.elearninginside.com/corporate-microlearning-examples/> (accessed 24.08.2020).
7. Metaari: Game-based learning market will reach \$17 billion by 2023. Available at: <https://www.gamesindustry.biz/articles/2018-08-08-metaari-game-based-learning-market-will-reach-usd17-billion-by-2023> (accessed 24.08.2020).
8. Technavio. Online Language Learning Market in the US 2018-2022. Increased Use of VR to Boost Demand. Available at: <https://www.technavio.com/> (accessed 24.08.2020).
9. Kupriyanovskiy V.P., Sukhomlin V.A., Dobrynin A.P. [et al.]. Skills in the digital economy and challenges of the education system. *International Journal of Open Information Technologies*. 2017;5(1):19–25. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Елена Викторовна Ширинкина

кандидат экономических наук, доцент,
заведующий кафедрой менеджмента и бизнеса,
Сургутский государственный университет
(Россия, г Сургут, пр. Ленина, 1)
E-mail: shirinkina86@yandex.ru

Elena V. Shirinkina

Candidate of economical sciences, associate professor,
head of sub-department of management and business,
Surgut State University
(1 Lenin avenue, Surgut, Russia)

БЕЗОПАСНОСТЬ В ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ

SAFETY IN EMERGENCY SITUATIONS

УДК 004.051, 007.51, 004.94

doi:10.21685/2307-4205-2021-1-13

A METHOD FOR EFFICIENCY ASSESSMENT OF MULTI-LEVEL DISTRIBUTED SYSTEM FOR REGIONAL SECURITY SUPPORT

A.V. Masloboev¹, V.N. Tsygichko²

¹ Federal Research Centre "Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences", Apatity, Russia

² Federal Research Center "Computer Science and Control of the Russian Academy of Sciences", Moscow, Russia
¹ masloboev@iimm.ru, ² vtsygichko@inbox.ru

Abstract. *Background.* The study is aimed to development and analysis of models and methods for automation facilities perfection of security organizational management of the socio-economic objects and critical infrastructures. *Materials and methods.* For configuration and quality enhancement problem-solving of the risk management systems of regional socio-economic system security violation a method for efficiency assessment of the multi-level distributed system for regional security support has been developed. The method is based on object categorization of regional socio-economic systems that allows adequate procedures implementation of regional security support conditionally to critical situations on-line context and specification emergent at that objects. *Results and conclusions.* The method distinctive features are human factor accounting under efficiency estimation of regional security support system and operation possibility with decomposed problem statements of that system structural synthesis, which have minor dimensions. That provide structure and composition synthesis problem-solving of regional security support system by means of its parameters direct search at the each level of system functional organization that allows simple and rapid calculation algorithms design of the efficiency technical-economic indexes on the basis of computer simulation.

Keywords: security support system, regional security, efficiency estimation, management, threat, risk analysis, socio-economic system

Acknowledgments: The work was carried out within the framework of the State Research Program of the Institute for Informatics and Mathematical Modeling of the Kola Science Centre of RAS (project No. 0226-2019-0035).

For citation: Masloboev A.V., Tsygichko V.N. A method for efficiency assessment of multi-level distributed system for regional security support. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2021;1:129–143. doi:10.21685/2307-4205-2021-1-13

МЕТОД ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ МНОГОУРОВНЕВЫХ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ СИСТЕМ ОБЕСПЕЧЕНИЯ РЕГИОНАЛЬНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

А. В. Маслобоев¹, В. Н. Цыгичко²

¹ Федеральный исследовательский центр «Кольский научный центр Российской академии наук», Апатиты, Россия

² Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление Российской академии наук», Москва, Россия

¹ masloboev@iimm.ru, ² vtsygichko@inbox.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Работа направлена на разработку и исследование моделей и методов для совершенствования автоматизированных средств организационного управления безопасностью социально-экономических объектов и критических инфраструктур. *Материалы и методы.* Для задач конфигурирования и повышения качества систем управления рисками нарушения безопасности региональных социально-экономических систем разработан метод оценки эффективности многоуровневых распределенных систем обеспечения региональной безопасности. Метод основан на категорировании объектов региональных социально-экономических систем, что позволяет реализовать адекватные процедуры обеспечения региональной безопасности в зависимости от оперативного контекста и спецификации критических ситуаций, возникающих на этих объектах. *Результаты и выводы.* Отличительными особенностями метода являются учет человеческого фактора при оценке эффективности систем обеспечения региональной безопасности и возможность работы с декомпозированными постановками задач структурного синтеза этих систем, имеющими небольшую размерность. Это обеспечивает решение задач синтеза структуры и состава систем обеспечения региональной безопасности путем прямого перебора их параметров на каждом уровне функциональной организации системы, что позволяет построить простые и быстрые алгоритмы расчета технико-экономических показателей эффективности на базе компьютерного моделирования.

Ключевые слова: система обеспечения безопасности, региональная безопасность, оценка эффективности, управление, угроза, анализ рисков, социально-экономическая система

Финансирование: Работа выполнена в рамках государственного задания ИИММ КНЦ РАН (НИР № 0226-2019-0035).

Для цитирования: Masloboev A. V., Tsygichko V. N. A method for efficiency assessment of multi-level distributed system for regional security support // Надежность и качество сложных систем. 2021. № 1. С. 129–143. doi:10.21685/2307-4205-2021-1-13

Introduction

At present, one of the main priorities of public policy in the field of national security is risk-sustainable development support of the country's economy and regional security maintenance. First of all, this implies activities intensification of the state public authorities at all levels of governance in direction to safeguarding of the critical facilities and infrastructures of regional socio-economic systems under the impact of multiple threats of various natures, which are the basic catalyst for emergencies and crisis situations occurrence.

This urgent and important problem for our country can be solved only at the expense of high-quality maintenance of regional security, since the regional socio-economic systems are the most vulnerable with a view to various threats appearance, which can lead to the destabilization of higher-level systems – national and global. This is explained by such specific features of regional systems as weak-formalization, multi-aspect nature and interconnectivity of processes occurring in these systems, structural complexity and spatial distribution, a large number of heterogeneous objects. The specificity is also appended by the individual characteristics of the each region such as low stability of ecological system, underdeveloped infrastructure, population density, remoteness from the federal center, high resource intensity, territory congestion by facilities of the military-industrial complex, the manner of industrial and economic development of territories, at alias. All these features of regional socio-economic systems result to complex problems in the security management of the critically important objects of regional economy and in the system organization of regional security support as a whole.

One of the prospective areas in these problem-solving is the development of a methodology, modeling tools and software to support managerial decision-making in the field of regional security ensuring and control. This is necessary, on the one hand, to improve the management quality of regional socio-economic system sustainable development, and, on the other hand, to meet up-to-date system requirements for security support of socio-economic objects and critical infrastructures in the face of global challenges and new threats. Thus, for example, one of the possible ways to these problem-solving is declared in the National Security Strategy of the Russian Federation¹, which expects system engineering of distributed situational centers [1] in the regions of the country as an effective means of threat monitoring and regional security support at all levels of government. The mission of this multi-level distributed automated system is on-line security monitoring of the both individual socio-economic elements and regional subsystems. At the same

¹ О Стратегии национальной безопасности Российской Федерации : указ Президента РФ № 683 от 31.12.2015. URL: <http://kremlin.ru/acts/bank/40391>

time, security management is implemented on the basis of fulfillment control and compliance monitoring of the safety requirements to critical facilities, bottlenecks analysis in the security support system and risk assessment of the security violation of regional socio-economic system components. This approach based on risk management and categorization of socio-economic objects in the region according to the degree of their potential danger is widely and successfully applied in practice, both in our country and abroad.

The general risk theory defines risk as an activity associated with overcoming uncertainty in a situation of inevitable choice, when we have the opportunity to quantitatively and qualitatively assessment of achieving probability of the estimated result, failure and goal deviation [2]. Risk management is a set of processes associated with identification, risk analysis and decision-making, which include maximizing the positive and minimizing the negative consequences of the risk events occurrence [3]. The risk of security violation of the regional socio-economic system is understood as the probability of potential threat realization regard to critically important objects of its structure under the existing management system of regional security.

The risk of regional security violation is a unified criteria of efficiency assessment for the all levels of security management hierarchy of regional socio-economic systems and meets the systems principles of regional security system engineering (principles of purpose, information unity and criteria coordination). In accordance with the equal protection principle [4], the risk of security violation of the regional subsystems at all levels of regional socio-economic system organization is understood as a probability of security violation of at least one of the elements of these subsystems.

Risk management of regional security violation is carried out by choosing and implementing methods, means and anti-crisis measures (security profiles), predicting and preventing the negative impact of probable threats on elements of regional socio-economic system, based on efficiency assessment and analysis of the existing Management System of Regional Security support (RSMS).

The formation procedure of RSMS requirements is based on the equal protection (equal strength balance protection) principle of critically important objects of the regional socio-economic systems against all manners of possible threats implementing to the object security violation. In this case, the risk assessment of an object security violation is carried out by its most vulnerable element. The object vulnerability assessment is a key point in its security system engineering, because without a correct RSMS efficiency assessment it is impossible to generate rational security profiles for critically important objects of regional socio-economic systems and justify the essential list of requirements and means selection to ensure their security and the system as a whole.

The national security system of the country couldn't be viewed as a unified functionally coupled system. It consists of a set of relatively independent self-contained operational subsystems of regional security support. These subsystems are individual for each separate region and solve their own specific problems. For efficiency assessment of such locally organized systems, in our study we propose a methodology based on practical experience and theoretical developments in the field of risk management of the security violation of critical infrastructures [5–7], decision support systems [8–10] and information technologies to management support of regional, national and international security [11–14].

1. Related work

In current conditions of geopolitical confrontation and escalation aggravation of the international arena, it is quite necessary to constantly enhance the efficiency of the existing support system of regional security and improve its functional potential, focusing on the advanced foreign experience and developments, as well as commensurating with the state economics capabilities.

Most developed foreign countries expand research institutions, studying and engineering support systems of regional and national security with an emphasis solely on identification and counteraction of the potential terroristic threats, e.g. [15, 16], including threats in the information sphere (cyber security). Especially these studies have intensified in recent years on a wide front of directions. It should be noted that all research works in these areas are restricted and, therefore, are not available for detailed analysis. Open-access literary sources often contain only general materials published. Almost all basic research work on the methodology and techniques for development and operation of security support systems used for critical facilities and infrastructures, having regional and national importance, are classified. At the same time, it is known for certain that the foreign systems for regional security support are functioning and based on the principles of network-centric control theory [17], as well as on the basis of risk assessment and analysis tools of the security violation of these facilities.

Our analysis shows that well-known foreign studies of regional security problems are highly odd and basically focus on general analytical models of trends and development scenarios of the individual territorial entities. These researches, e.g. [18–20], consider mainly humanitarian aspects and factors of regional and national security in the socio-economic and military-political spheres. Most of the applied research and developments are focused on forecasting of extreme situations in nature and the technosphere, as well as on studying conflicts and crisis phenomena in public and international relations. In theory and in practice all of that works for the most part for the purpose of sustainable development than in the behalf of population protection and national security support. An independent niche is occupied by research work on anti-terroristic security of critically important facilities and infrastructures. At the same time, comprehensive analysis of the security support methodological, organizational and technical issues of regional socio-economic systems are in the area of responsibility of the foreign-policy and defense departments, as well as authorities and security services. Thereby, foreign research projects and programs in this strategic domain belong to the class of closed scientific developments.

The problem situation is that the security of all elements of socio-economic systems at the regional or federal level couldn't be fully ensured. This would require funds commensurate with the cost of all infrastructure life-support facilities that form these systems. In principle, such assets and funds couldn't be afforded by any country, even the most economically developed country in the world. In reality, only priority or selective security support of certain critically important facilities of the region and regional critical infrastructures is possible. That allows risk and loss minimizing from the impact on these facilities by multiple threats and dangers of various nature typical and specific to the region. The choice of security support facilities is a complex independent problem. Its successful solution largely determines the system efficiency of regional security support.

2. Structure of RSMS

RSMS is a multi-level distributed organizational management structure that implements the set of security measures to critically important elements protection of regional socio-economic systems in accordance with the category, index, safety requirements and security profile of these elements determined on the basis of a categorical approach [5, 7]. This complex (set) constitutes of regulatory, organizational, economic, program-technical and other anti-crisis security measures that cumulatively form a protection profile of regional elements and subsystems. Each type of object has its own specificity, which is determined by its composition, structure and functioning features. Each type of object is affected by a certain set of threats and dangers of various nature implemented in diverse manners. Countermeasures (protection profile) have also a complex character.

In general, the RSMS functional structure of any element of the regional socio-economic system can be represented in a hierarchical form and consists of units at different levels.

The first level of RSMS (elementary unit) is a counteracting means to the specific manner of a certain threat implementation to each type of object of the regional socio-economic system (one implementation manner of one threat – one counteraction means – one object of given type).

The secondary level units of RSMS provide actions organization and coordination of the all counteraction means to a certain manner of threat implementation (one implementation manner of one threat – a set of countermeasures – one object of given type).

The tertiary level units of RSMS provide actions implementation and coordination of the all counteraction means to various manner of threat implementation (all implementation means of one threat – a set of countermeasures – one object of given type).

The fourth-order level units of RSMS provide actions implementation and coordination of the tertiary level units to security support of the object of regional socio-economic system under all expected threats (all implementing manners of all the threats – a set of countermeasures – one object of given type).

The fifth-order level units of RSMS provide operation coordination of the fourth-order level units to security support of all objects of the regional socio-economic system controlled by RSMS (all implementing manners of all the threats – a set of countermeasures – all objects of all the types).

The functioning process of any RSMS can be formally represented in terms of this five-level hierarchical management structure. If necessary, it is possible to define additional levels in RSMS structure. However, it should be borne in mind that this management functional structure usually doesn't correspond to the organizational structure of actually existing RSMS, since the several of functional tasks listed above can be solved at one organizational level.

3. Problem statement

The problem of RSMS efficiency assessment boils down to three tasks. The results of these tasks solving provide a quantitative justification of decisions under procedures of security system requirements formation and rational protection profiles selection of elements of the regional socio-economic systems.

The first task is to estimate the RSMS operation efficiency within the given set of means to security support of the regional socio-economic system.

In essence, this is a task of vulnerability assessment of regional socio-economic system within the given threat model and selected protection profile. As a result of this problem solving, the security violation risk values of the elements of regional socio-economic system by all threat model components and the threat model as a whole are estimated and the bottlenecks in the RSMS are detected. The obtained quantitative risk assessment of security violation by this problem solving should serve as an objective reason for decision-making on reinforcement of protection measures of the regional elements and subsystems.

The second task is to determine the composition and structure of RSMS, which provides the minimum of its cost under the given security level of the regional socio-economic system.

The second problem solving is aimed at the formation of an optimal cost protection profile of regional elements and subsystems under the fixed risk level of security violation, and the development of the rational set of system requirements to their security support.

The third task is to determine the composition and structure of RSMS, which provides the maximum security of the elements of regional socio-economic system under a given value of the protection cost.

The third problem solving is aimed at the formation of an optimally efficient protection profile of the regional system components under the fixed cost of their RSMS, and the development of an appropriate set of system requirements to their security support.

Solving of the assigned tasks requires the following source information for all components of regional socio-economic systems:

- list of possible (probable) threats;
- manners of implementing threats;
- counteraction means to each manner of threat implementation;
- countermeasures efficiency indexes and their functional characteristics;
- countermeasures efficiency estimates as a cost function for the conventional unit security of an element of the regional socio-economic system;
- structure of RSMS;
- dependence of the operation efficiency of regional socio-economic system on the protection rate (for each countermeasure of the threat);
- regulatory restrictions on the elements operation efficiency of the regional socio-economic system;
- list of countermeasures at the disposal of RSMS;
- degree of confidence to RSMS personnel.

The availability of information listed above allows studying and comparative analysis of the RSMS, and identify prospective ways of its enhancement and development.

4. Efficiency assessment of RSMS

4.1. Efficiency assessment of RSMS elementary unit

Let's consider the estimation procedure of the RSMS efficiency for an elementary object of the regional socio-economic system.

The central concept and initial parameter that allows the regulatory base formation for quantitative assessments of the functioning efficiency of RSMS is "the specific efficiency of the counteraction means to a specific manner of the threat implementing", i.e. the efficiency of the elementary unit in the RSMS structure considered above.

The countermeasure H_{ijk} specific efficiency is understood as a level of execution efficiency of the i means normative functions Y_i to counteract the j manner of the k threat implementing. The specific efficiency H_{ijk} can be interpreted as the probability that a given manner of the threat implementing will be prevented.

The dimension of the normative function Y_i is determined by the functioning features of the each i protection means. It can be the size of the protected area by one means per unit time, the number of socio-economic objects diagnosed by one means per unit time, the collected information content of the object security state by one means per unit time, etc. For example, the specific efficiency of a security support means of the transportation or storage of oil products can be defined as the probability of oil spill prevention by one protection means per unit time.

The specific efficiency of the counteraction means allows to put the protection rate index U_{ijk} of an object of the regional socio-economic system against the j manner of the k threat implementing subject to the number (n) of the i (homogeneous) counteraction means (Fig. 1). The protection rate index U_{ijk} is an efficiency characteristic of the counteraction means, that shows the probability how the i counteraction means will protect an object of the regional socio-economic system against the j manner of the k threat implementing.

Let D_0 be the value of the controlled (protected) parameter of any object per unit time t , e.g. the average volume of energy resources or oil products.

Y_i is the normative function of the i protection means, i.e. the value of the object parameter that can be controlled (protected) by the i counteraction means per unit time t .

Full protection of an object is achieved when the number of countermeasures is $n = n'$ and provides a sufficient security level at the current value of the protected object parameter Y_0 , where:

$$n = \frac{Y_0}{Y_i}. \quad (1)$$

In addition, there may occur a lack of protection means D_0 :

$$n < \frac{Y_0}{Y_i}, \quad (2)$$

and duplication of protection means, when:

$$n > \frac{Y_0}{Y_i}. \quad (3)$$

For each of three cases $n < n'$, $n = n'$, $n > n'$ the function $U_{ijk} = f(H_{ijk}, n)$ is calculated subject to the functioning specificity of the protected object.

The type of this function representative for most objects of regional socio-economic systems is shown in Fig. 1.

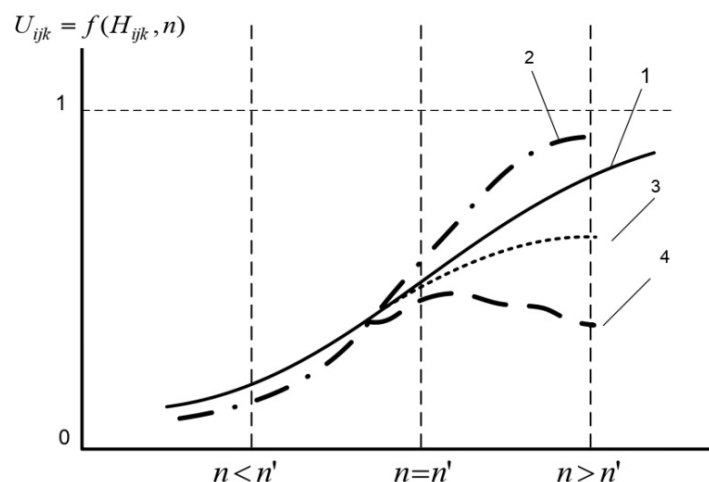


Fig. 1. The dependence of the object protection rate of the regional socio-economic system on the amount of the homogeneous security facilities

The function U_{ijk} is determined by the functioning method of the countermeasure.

Curve 1 represents the dependence U_{ijk} on the amount of anti-crisis countermeasures, the increase in the number of which amplifies the protection rate, e.g. a duplication of control means for the state parameters monitoring of oil storage facilities and pipelines or an increase in the number of control devices at the receipt ports of oil-bulk ore carriers and at the transshipment terminals of oil products.

Curve 1 shows that an increase in the number of anti-crisis security facilities turns out to be rational only up to a certain limit, over which the security efficiency of the object doesn't increase.

Curves 2, 3 and 4 represent the dependences U_{ijk} of the object security on the number n of RSMS personnel.

Curve 2 corresponds to the case when an increase in the number of RSMS employees, performing control and protection functions, leads to an increase of the object security level of the regional socio-economic system. For example, an increase in the number of physical security posts reduces the probability of an intruder entering the object under the stipulation that the security staff performs its functions in good faith.

Curve 3 corresponds to the case when RSMS employees are not fully prepared to perform their functions because of low-skills, negligent performance of duties and other negative factors that determine the operating efficiency of the personnel.

Curve 4 reflects the fact that an increase in the number of RSMS personnel increases the violation probability of RSMS structure by intruders or persons, who can be persuaded to unlawful actions, e.g. to transfer critical information by tampering in terms of object security.

The given dependences represent the most general case of security level estimation of the objects of regional socio-economic system.

For such a extreme case, when security resources are not used (passive monitoring), the time factor doesn't matter at all. For example, the on-line monitoring of public order in a certain area, and the parameter t is missed in the expressions D_o and D_i , and the function U is calculated without taking into account the resource operation time. The analysis shows that all the typical countermeasures, used in existing RSMS, are described in terms of the dependencies shown in Figure 1 as special cases.

Each counteraction means can more or less negatively affect on the functioning quality of the security objects. The assessment of this negative impact of security facilities is usually carried out through changes in any critical parameter of the object functioning. Timing loops of functioning are often used as such a parameter.

In Fig. 2 a hypothetical dependence of the functioning cycle duration T of an object on the amount of the certain security facilities and control means, i.e. on the object protection rate U_{ijk} in the used terminology, is shown.

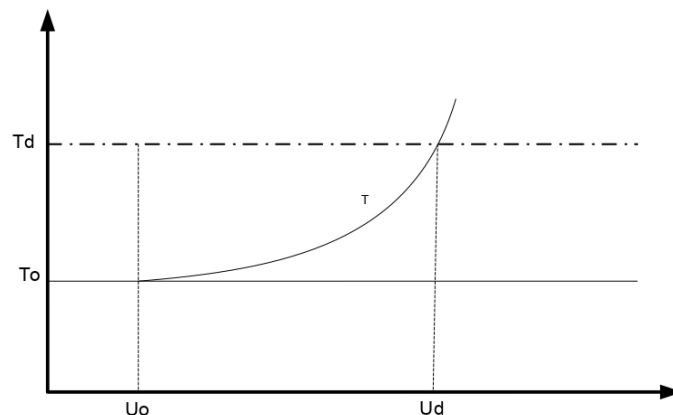


Fig. 2. The duration of the object functioning cycle of the regional socio-economic system on its protection rate

Key legend to Fig. 2: T_o is the normal duration of functioning cycle (without use of the countermeasures); T_d is allowable extension value of the functioning cycle; U_d is the allowable protection rate of the object by the considered counteraction means.

As follows from Figure 2, the allowable protection rate U_d of an object is a bounded region by the values $U_{ijk\min}$ and $U_{ijk\max}$, which in turn determines the amount of countermeasures of the given type n_{\min} and n_{\max} used to protection of the considered object of the regional socio-economic system.

It follows from the tracing that on the assumption of $n = n'$ the extension value of the object functioning cycle will be minimal. However, in this case the security level U_{ijk} may be lower than required.

One of the description parameters of the i countermeasure can be its cost estimate C_{ijk} that includes its production and operation cost. The cost increase estimates of the specific efficiency of countermeasures as a result of its enhancement or replacement by a new one, i.e. the rate per unit of the specific efficiency increase of countermeasures, can also be discussed. The input parameters and dependencies allow the efficiency estimation of the existing countermeasures of various types in a unified metrics and developing a theory of RSMS efficiency on the basis of this measure.

4.2. Efficiency assessment of RSMS secondary unit

The reference data availability of all the i counteraction means to the given j manner of the k threat implementing allows formulating the problems of optimal composition estimation (variant of joint use) of counteraction means.

Counteraction means forming the composition function independently in a sequential mode. Moreover, each means performs its specific function. For example, to prevent the intrusion of a strange person into a closed area, there are employed such countermeasures as an external fence, violation sensors of object boundary, a vision-based inspection system, a physical motion control system over the persons and vehicles across the protected area, etc.

The initial problem at the secondary unit of RSMS is efficiency estimation of the existing composition of all countermeasures used against a certain manner of threat implementing.

The efficiency criterion of the countermeasures composition N_{jk} is the protection rate of the object U_{jk} against the j manner of the k threat implementing, which is evaluated by the expression:

$$U_{jk} = 1 - \prod_{i=1}^I (1 - U_i(n_i)). \quad (4)$$

On the basis of expression (4), the general optimization problem statements of the secondary unit structure of RSMS are formulated.

First problem statement: to estimate the operation efficiency of the RSMS under a given set of means for security support of the element of regional socio-economic system.

Let's estimate the countermeasures composition N_{jk} that provides the maximum security level of the element $\max U_{jk}$ against the j manner of the k threat implementing. In this statement the capabilities limit of a particular set of countermeasures is estimated. It is calculated through the maximum capabilities estimates $U_{id\max}$ of each i countermeasure under accepted constraints.

The composition N_{jk} corresponding to $\max U_{jk}$ is evaluated using the dependence U_{ijk} on n , (Fig. 1) for all $i \in I$ (Fig. 2).

The maximum security of an element of regional socio-economic system can be considered as a composition efficiency criterion and is calculated by the following formula:

$$\max U_{jk} = 1 - \prod_{i=1}^I (1 - U_{id\max}). \quad (5)$$

The problem solution in the first statement allows reasonably setting the required security level U_{jkTP} and estimating the maximum protection cost $\max C_{jk}$.

Second problem statement: to determine the composition and structure of RSMS, providing a minimum of its cost at the given security level of the element of regional socio-economic system.

Let's define a countermeasures composition N_{jk} which provides the given security level U_{jkTP} of an object at the minimum of its cost. In this statement, the cost C_{jk} of composition N_{jk} is used as a criterion of its efficiency:

$$C_{jk} = \min \sum_{i=1}^I C_i * n_i, \quad (6)$$

by the total cost of countermeasures.

The cost C_{jk} of composition N_{jk} is estimated by minimization of the following expression in terms of the total cost of countermeasures:

$$\min \prod_{i=1}^I (1 - U_i(C_i * n_i)) = 1 - U_{jkTP}. \quad (7)$$

The function $U_i(C_i * n_i)$ can be obtained by multiplication of the function $U(n_i)$ values by the cost of one i countermeasure (Figure 1) under the stipulation that $C_i = const$, i.e. the cost C_i doesn't depend on the value n_i .

Third problem statement: to determine the composition and structure of RSMS that provides maximum security of the element of regional socio-economic system at the given cost value of the element protection.

Let's define a countermeasures composition N_{jk} which provides the maximum security level $\max U_{jk}$ of an object at the given costs C_{jkZ} . In this case, the efficiency criterion of the countermeasures composition is the security level U_{jk} of an object, the maximum value of which is estimated by the following expression optimization:

$$\max U_{jk} = 1 - \min \prod_{i=1}^I (1 - U_i(C_i * n_i)) \quad (8)$$

under constraints:

$$\sum_{i=1}^I C_i \leq C_{jkZ}. \quad (9)$$

Under these conditions, the problems of priority countermeasures selection can be stated, the use of which will give the maximum increment of the object security under limited funds for RSMS retrofit.

All the criteria of the RSMS secondary unit can be used to problems statement of efficiency assessment of the tertiary unit, which provides the activities coordination of the secondary unit compositions for the purpose of the object security support against all the manners of threat implementing, i.e. against the threat in tote.

4.3. Efficiency assessment of RSMS tertiary unit

The principal distinction of the tertiary unit functioning is that at this level the counteraction means compositions function simultaneously performing its own task. Another significant feature is that various compositions may contain common countermeasures. E.g. the external protection of the critically important objects of the region or the special operation mode of these objects is a common counteraction means to all possible manners of committing destructive and terrorist acts at objects.

The most significant characteristic of each j countermeasures composition is the dependence of the implementation probability P_{jk} of the j manner of the k threat on the protection rate U_{jk} . The general view of the function $P(U)$ is shown in Fig. 3.

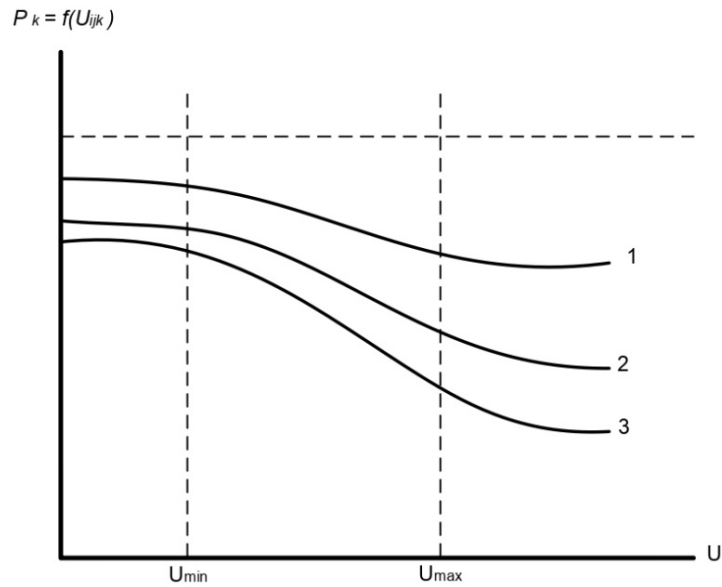


Fig. 3. The dependence of the threat implementation on the object protection rate

Dependency $P(U)$ captures the obvious fact that as more efficient counteraction measures to the threats are, than the less probability of the threat implementation is. E. g., if the territory perimeter of an object is effectively protected from intrusion, then a potential violator will look for another opportunity to terrorist act committing, that isn't related to intrusion through the protected border of this object. In other words, the terrorist will always search for a "bottleneck" in the object protection, through which it is possible to realize his intentions with maximal probability, with less means and with minimal risk. This implies the importance of equal protection principle adherence within the RSMS engineering of the objects of regional socio-economic system.

For example, curves 1, 2 and 3 in Figure 3 illustrates the differences in protected objects according to their estimated "value" for a source of threat, e. g. a public safety violator. The similar curves can be designed taking into account the cost parameters of the threat implementing manners or the other characteristics.

This dependence imposition has a fundamental methodological character, since it reflects the beliefs of persons responsible for the security of regional socio-economic system objects about the threat risk level, the protected object value, the countermeasures efficiency and the risk value when setting one or other object protection rate or countermeasures cost. In fact, the dependencies $P(U)$ can serve as a guideline and expert justification for the choice of composition and structure of the RSMS. On the basis of this dependence, it is possible to define the problems of efficiency assessment and synthesis of the RSMS higher-level units, starting from the tertiary.

Dependencies $P(U)$ calculation is a complex theoretical and practical problem, because the objective information for its design, as a rule, doesn't exist. These dependencies can be designed for each indexed object of the regional system using a specially organized expert procedure based on the various scenarios analysis of critical situation emergence at an object or a group of objects.

As a universal efficiency criterion of all RSMS units, starting from the secondary level, let's introduce the concept of protection reliability – Q_{jkl}, Q_{kl}, Q_l , where $l \in L$ is the object number, L is the amount of protected objects. For short definition of formulas let's setting the index l only under consideration of the problem statements for the fourth-order and the fifth-order units of RSMS.

The protection reliability Q_{jk} of the object of regional socio-economic system by the N_{jk} composition against the j manner of the k threat implementing is determined by the expression:

$$Q_{jk} = 1 - [P_{jk} * (1 - U_{jk})]. \quad (10)$$

As will be shown below, the expression (10) is the basis for the efficiency index estimation of countermeasures at the all following levels of RSMS.

The operation objective of the tertiary unit of RSMS is to support equal protection (strength balanced protection) of an object against all the manners of threat implementing. Within the terms introduced above this means that the object protection reliability Q_k against the k threat is determined by the N_{jk} composition efficiency, which provides the minimum protection reliability among the all j compositions of countermeasures $N_k = \{N_{jk}\}$ against the k threat. In other words, the object protection reliability is equal to the efficiency of the weakest composition of all included in $\{N_{jk}\}$:

$$Q_k = Q_{jk \min} \text{ from } \{Q_{jk}\} \text{ for all } j \in J, \quad (11)$$

where $\{Q_{jk}\}$ is a set of efficiency values of the countermeasures compositions N_k against the k threat.

Another significant efficiency characteristic of the RSMS tertiary unit is the difference dQ_k between the minimum and maximum protection reliability against the variety of compositions $N_k = \{N_{jk}\}$:

$$dQ_k = q_{jk \max} - Q_{jk \min} \text{ from } \{Q_{jk}\} \text{ for all } jk \in JK. \quad (12)$$

The parameter dQ_k is a quality index characterizing the degree of rational use of resources by the tertiary unit of RSMS and the adequacy of its structure to the problem stated.

The problems of protection reliability assessment of the objects of regional socio-economic system against the k threat using the introduced concepts can be defined as follows.

First problem statement: to estimate $Q_{k \min}$ and dQ_k under the given structure of the tertiary unit of RSMS $N_k = \{N_{jk}\}$.

Second problem statement: to determine the structure of the tertiary unit of RSMS $N_k = \{N_{jk}\}$ that meets the given level of reliability $Q_{k \min z}$ and provides its minimal cost $C_k = \min \sum_{j=1}^J C_{jk}$ or $\min dQ_k$, since both problems are identical in the light of hypotheses accepted above.

Third problem statement: to determine the structure of the tertiary unit of RSMS $N_k = \{N_{jk}\}$ that provides $\max Q_{k \min}$ at the given cost $C_k = C_{kz}$. The $\min dQ_k$ is automatically provided when solving this problem.

4.4. Efficiency assessment of RSMS fourth-order unit

The functioning objective of the RSMS fourth-order unit is to support the equal reliability protection of the element against all the threats. This implies that the efficiency criterion of the countermeasures for this unit Q_l is equal to the minimum protection reliability $Q_{kl \min}$ from the set $\{Q_{kl}\}$:

$$Q_l = Q_{kl \min} \text{ from } \{Q_{kl}\} = Q_{jkl \min} \text{ from } \{Q_{jkl}\} \text{ for all } jkl \in JKL, \quad (13)$$

and the quality index:

$$dQ_l = Q_{kl \max} - Q_{kl \min} \text{ from } \{Q_{kl}\} \text{ for all } jkl \in JKL. \quad (14)$$

The problems of functioning efficiency assessment and synthesis of the fourth-order unit are formulated in the same way as for the tertiary unit, but subject to the ranking of threats.

First case: if the object threats are equivalent, i.e. $Q_l = Q_{kl}$, then the formal problem statements are determined by formulas (13) and (14).

Second case: if the threats are ranked according to the risk level by weighting coefficients A_{kl} , then the criterion Q_l is determined by the expression:

$$Q_l = [Q_{kl} * A_{kl}] \min \text{ from } \{Q_{kl} * A_{kl}\} \text{ for all } kl \in KL. \quad (15)$$

$$dQ_l = [Q_{kl} * A_{kl}]_{\max} - [Q_{kl} * A_{kl}]_{\min} \text{ for all } kl \in KL. \quad (16)$$

Threat weights are estimated by comparing the maximum values of functions $P_{jkl} = P_{jkl}(U_{jkl})$ (see Fig. 3) at the point $U_{d \max}$ for all $jkl \in JKL$.

$$A_{jkl} = \frac{P_{jkl \max}}{P_{jkl}} \text{ for all } kl \in KL. \quad (17)$$

The vulnerability assessment of the system object S as the reciprocal value of its security is evaluated by the expression:

$$S = 1 - Q_{kl \min}. \quad (18)$$

In conclusion, let's discuss the methodology for efficiency assessment of the RSMS fifth-order unit.

4.5. Efficiency assessment of RSMS for regional socio-economic system

The operation objective of the RSMS as a whole is to support the equal protection reliability Q of all the objects L of regional socio-economic system subject to their importance B_l .

The efficiency criterion of the RSMS operation Q is determined by the expression:

$$Q = [Q_l * B_l]_{\min} \text{ from } \{Q_l * B_l\} \text{ for all } l \in L. \quad (19)$$

The quality of RSMS is determined by the expression:

$$dQ = [Q_l * B_l]_{\max} - [Q_l * B_l]_{\min} \text{ from } \{Q_l * B_l\} \text{ for all } l \in L. \quad (20)$$

The problems of efficiency estimation and synthesis of the RSMS are formulated in the same way as at the two previous levels.

Formal ranking of RSMS protection objects according to their comparative importance is possible, if there is an objective opportunity to quantitative assessment of the threat implementation consequences of the each object and the system as a whole. Such an opportunity is provided by the method of categorizing critically important objects of socio-economic systems according to their potential risk level. This method is proposed in research work [8].

4.6. Human factor accounting under efficiency assessment of RSMS

The proposed method for efficiency assessment of RSMS and its components is based on an assumption that all safety requirements to the elements of regional socio-economic system, estimated in accordance with element's categories and index, are strictly fulfilled, and all countermeasures compounding their protection profile are functioning in accordance with accepted organizational, regulatory and technical requirements. However, in real practice these requirements can't be almost never fully met, essentially due to the human factor effect.

The support system of regional security should have an identification program that provides estimation of characteristics, reflecting the confidence degree of the RSMS, through the constantly maintained databases, the set of standard identification rules and violation indicators of order and norms established for security management entities.

The regulatory and legal basis for estimates of confidence degree of the performance quality of control actor's functions in the RSMS should be the standard "tables for confidence degree assessment" [6], reflecting the dependence of the confidence degree value on the amount of various violations in the service activities of RSMS personnel and the inspection results. The degree of confidence is estimated by comparing the violation metrics and surveillance inspection data stored in the database with standard tables of confidence degree estimates.

The risk magnitude P_i of the RSMS failure to fulfill its functions under the i violation is evaluated using formula:

$$P_i = (1 - D_i) b_i, \quad (21)$$

where D_i is the confidence degree of the i violation, b_i is the weighting coefficient that determines the impact degree of i violation on the overall assessment of confidence of the RSMS.

The total risk estimation of the security violation of an element of the regional socio-economic system as a result of dysfunction of the responsible for it RSMS actors is carried out according to the following formula:

$$P_{sum} = 1 - \prod_{i=1}^I (1 - P_i). \quad (22)$$

Accordingly, the confidence degree of the RSMS is evaluated as:

$$D_{RSMS} = 1 - P_{sum}. \quad (23)$$

The development of standard tables of the confidence degree also supposes the estimation of a critical value called as an "acceptable degree of confidence" [6]. If the confidence degree of the RSMS of any inspected object turns out to be less than the permissible degree of confidence, then this structure can't be confided and the urgent organizational, personnel, financial and other measures must be undertaken to correct the emergency situation appeared in the management group of RSMS.

If the value of confidence degree of the RSMS by an element does not reach a critical value, then adjustment of the estimated index of object's protection rate Q_i on the value of confidence degree is possible:

$$Q_{i\ pol} = Q_i D_{RSMS}. \quad (24)$$

The value of protection rate index, estimated by taking into account the human factor, gives occasion to the procedure implementation of rational protection profile selection of the elements of regional socio-economic systems, security requirements formation of RSMS objects, planning of defect elimination and security system enhancement in accordance with the categorical approach to regional security support stated in studies [7, 11, 21].

Conclusion

The proposed methodology is essentially a general theory of the security management system efficiency of socio-economic objects, since the developed systemic representation of RSMS allows interpreting the protection mechanisms of all the types of elements of the regional socio-economic system and the system as a whole. There remains only the problem of ensuring the information completeness for calculating of estimates of the RSMS efficiency.

The peculiarity of the stated above theory of RSMS efficiency is that the hierarchical system of formal problem statements proposed in it have a small dimensions. This means that it is possible to solve RSMS synthesis problems by direct enumeration of its parameters at each level of the RSMS functional structure. That allows development of the simple and effective computational algorithms and its application in distributed computing environment.

An important aspect of the proposed theory is the method of taking into account the human factor when assessing the RSMS efficiency. The method allows transferring this complex and ambiguous process into the framework of a standard regulated procedure. The assessment results of RSMS efficiency obtained using the represented method are the main index that makes it possible to implement procedures of regional security support based on facilities categorization of regional socio-economic systems.

The research results are used within the strategy realization of the Arctic region of Russian Federation development and national security ensuring until 2020 in the Murmansk region in terms of enhancement and configuration of RSMS, built on the basis of a network of distributed regional situational centers [22].

References

1. Игнатъев М. Б. [и др.]. Предложения для развития системы распределенных ситуационных центров: отраслевой уровень и проблемно-ориентированные технологии управления рисками // Экономика и предпринимательство. 2018. № 4. С. 1249–1254.
2. Шоломницкий А. Г. Теория риска. Выбор при неопределенности и моделирование риска. М. : Изд. дом ГУ ВШЭ, 2005. 400 с.

3. Цыгичко В. Н., Черешкин Д. С., Смолян Г. Л. Управление рисками в организационных системах. Lambert Academic Press, 2018. 200 с.
4. Цыгичко В. Н. Руководителю о принятии решений. Изд. 3-е, перераб. и доп. М. : Красанд, 2010. 352 с.
5. Стиславский А. Б., Кононов А. А., Цыгичко В. Н. Управление рисками нарушения транспортной безопасности. М. : АС-Траст, 2008. 210 с.
6. Северцев Н. А., Бецков А. В. Системный анализ теории безопасности. М. : МГУ «ТЕИС», 2009. 457 с.
7. Цыгичко В. Н., Черешкин Д. С., Смолян Г. Л. Безопасность критических инфраструктур. М. : УРСС, 2019. 200 с.
8. Remagnino P., Monekosso D. N., Jain L. C. Innovations in Defence Support Systems – 3: Intelligent Paradigms in Security. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag, 2011. 212 p.
9. Ильин Н. И. Эволюция информационных систем государственного управления // Информационные войны. 2017. № 1. С. 54–57.
10. Юрков Н. К. Безопасность сложных технических систем // Вестник Пензенского государственного университета. 2013. № 1. С. 128–134.
11. Маслобоев А. В., Путилов В. А. Информационное измерение региональной безопасности в Арктике. Апатиты : КНИЦ РАН, 2016. 222 с.
12. Соложенцев Е. Д., Карасев В. В. Управление социально-экономической безопасностью России // Материалы X съезда Петровской академии наук и искусств. СПб. : Стратегия будущего, 2017. С. 21–35.
13. Юсупов Р. М. Наука и национальная безопасность. 2-е изд. СПб. : Наука, 2011. 369 с.
14. Шульц В. Л., Кульба В. В., Шелков А. Б., Чернов И. В. Сценарный анализ в управлении геополитическим информационным противоборством. М. : Наука, 2015. 542 с.
15. The Palgrave handbook of security, risk and intelligence / ed. by R. Dover, H. Dylan, M. Goodman. Palgrave Macmillan UK, 2017. 501 p.
16. Recent Advances in Computational Intelligence in Defense and Security / ed. by R. Abielmona, R. Falcon, N. Zincir-Heywood, H. A. Abbass // Studies in Computational Intelligence. 2016. Vol. 621. 752 p.
17. Oleynik A., Fridman A., Maslboev A. Informational and analytical support of the network of intelligent situational centers in Russian Arctic // CEUR Workshop Proceedings. 2018. Vol. 2109. P. 57–64.
18. Young C. S. Risk and the Theory of Security Risk Assessment // Advanced Sciences and Technologies for Security Applications. Springer International Publishing, 2019. 274 p.
19. Sustainable Development and Disaster Risk Reduction / ed. by J. I. Uitto, R. Shaw. Springer, 2016. 287 p.
20. Mazarr M. J. Rethinking Risk in National Security. Lessons of the Financial Crisis for Risk Management. Palgrave Macmillan US, 2016. 246 p.
21. Северцев Н. А., Юрков Н. К., Гришко А. К. К проблеме глобальной оптимизации параметров надежности и безопасности сложных динамических систем инверсным методом // Надежность и качество сложных систем. 2020. № 1. С. 13–23.
22. Маслобоев А. В. Концепция Центра перспективных исследований и обеспечения безопасности Арктики // Арктика: экология и экономика. 2019. № 2. С. 129–143.

References

1. Ignat'ev M.B. [et al.]. Proposals for the development of a system of distributed situation centers: industry level and problem-oriented risk management technologies. *Ekonomika i predprinimatel'stvo = Economics and Entrepreneurship*. 2018;4:1249–1254. (In Russ.)
2. Sholomnitskiy A.G. *Teoriya riska. Vybora pri neopredelennosti i modelirovanie riska = Risk theory. Selection under uncertainty and risk modeling*. Moscow: Izd. dom GU VShE, 2005:400. (In Russ.)
3. Tsygichko V.N., Chereshekin D.S., Smolyan G.L. *Upravlenie riskami v organizatsionnykh sistemakh = Risk management in organizational systems*. Lambert Academic Press, 2018:200. (In Russ.)
4. Tsygichko V.N. *Rukovoditel'yu o prinyatii resheniy = To the manager about decision-making*. 3rd, rev. and suppl. Moscow: Krasand, 2010:352. (In Russ.)
5. Stislavskiy A.B., Kononov A.A., Tsygichko V.N. *Upravlenie riskami narusheniya transportnoy bezopasnosti = Transport security risk management*. Moscow: AS-Trast, 2008:210. (In Russ.)
6. Severtsev N.A., Betskov A.V. *Sistemnyy analiz teorii bezopasnosti = System analysis of security theory*. Moscow: MGU «TEIS», 2009:457. (In Russ.)
7. Tsygichko V.N., Chereshekin D.S., Smolyan G.L. *Bezopasnost' kriticheskikh infrastruktur = Critical infrastructure security*. Moscow: URSS, 2019:200. (In Russ.)
8. Remagnino P., Monekosso D.N., Jain L.C. *Innovations in Defence Support Systems – 3: Intelligent Paradigms in Security*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2011:212.
9. Il'in N.I. Evolution of public administration information systems. *Informatsionnye voyny = Information wars*. 2017;1:54–57. (In Russ.)

10. Yurkov N.K. Security of complex technical systems. *Vestnik Penzenskogo gosudarstvennogo universiteta = Bulletin of the Penza State University*. 2013;1:128–134. (In Russ.)
11. Masloboev A.V., Putilov V.A. *Informatsionnoe izmerenie regional'noy bezopasnosti v Arktike = Information dimension of regional security in the Arctic*. Apatity: KNTs RAN, 2016:222. (In Russ.)
12. Solozhentsev E.D., Karasev V.V. Management of social and economic security of Russia. *Materialy X s"ezda Petrovskoy akademii nauk i iskusstv = Materials of the X Congress of the Petrovsky Academy of Sciences and Arts*. Saint-Petersburg: Strategiya budushchego, 2017:21–35. (In Russ.)
13. Yusupov R.M. *Nauka i natsional'naya bezopasnost' = Science and national security*. 2nd ed. Saint-Petersburg: Nauka, 2011:369. (In Russ.)
14. Shul'ts V.L., Kul'ba V.V., Shelkov A.B., Chernov I.V. *Stsenarnyy analiz v upravlenii geopoliticheskimi informatsionnymi protivoborstvom = Scenario analysis in the management of geopolitical information warfare*. Moscow: Nauka, 2015:542. (In Russ.)
15. Dover R., Dylan H., Goodman M. (eds.) *The Palgrave handbook of security, risk and intelligence*. Palgrave Macmillan UK, 2017:501.
16. Abielmona R., Falcon R., Zincir-Heywood N., Abbass H. A. (eds.) Recent Advances in Computational Intelligence in Defense and Security. *Studies in Computational Intelligence*. 2016;621:752.
17. Oleynik A., Fridman A., Masloboev A. Informational and analytical support of the network of intelligent situational centers in Russian Arctic. *CEUR Workshop Proceedings*. 2018;2109:57–64.
18. Young C.S. Risk and the Theory of Security Risk Assessment. *Advanced Sciences and Technologies for Security Applications*. Springer International Publishing, 2019:274.
19. Uitto J. I., Shaw R. (ed.) *Sustainable Development and Disaster Risk Reduction*. Springer, 2016:287.
20. Mazarr M.J. *Rethinking Risk in National Security. Lessons of the Financial Crisis for Risk Management*. Palgrave Macmillan US, 2016:246.
21. Severtsev N.A., Yurkov N.K., Grishko A.K. On the problem of global optimization of reliability and safety parameters of complex dynamic systems by the inverse method. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2020;1:13–23.
22. Masloboev A.V. Concept of the Center for Advanced Research and Security of the Arctic. *Arktika: ekologiya i ekonomika = Arctic: ecology and economy*. 2019;2:129–143.

Информация об авторах / Information about the authors

Андрей Владимирович Маслобоев

доктор технических наук, доцент,
ведущий научный сотрудник,
Институт информатики и математического
моделирования технологических процессов
Федерального исследовательского центра
«Кольского научного центра
Российской академии наук»
(Россия, Мурманская область, г. Апатиты,
ул. Ферсмана, 14)
E-mail: masloboev@iimm.ru

Виталий Николаевич Цыгичко

доктор технических наук, профессор,
главный научный сотрудник,
Институт системного анализа
Федерального исследовательского центра
«Информатика и управление
Российской академии наук»
(Россия, г. Москва, просп. 60-летия Октября, 9)
E-mail: vtsygichko@inbox.ru

Andrey V. Masloboev

Doctor of technical sciences, associate professor,
leading researcher,
Institute of Informatics and mathematical
modelling of technological processes
of the Federal Research Center
"Kola Science Centre
of the Russian Academy of Sciences"
(14 Fersmana street, Apatity,
Murmansk region, Russia)

Vitaliy N. Tsygichko

Doctor of technical sciences, professor,
chief researcher,
Institute for System Analysis
of the Federal Research Center
"Computer Science and Control
of the Russian Academy of Sciences"
(9 60-letiya Oktyabrya avenue, Moscow, Russia)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СИСТЕМЫ АУДИТА ОПЕРАЦИОННЫХ СИСТЕМ СЕМЕЙСТВА LINUX ПРИ ПРОВЕДЕНИИ СЕРТИФИКАЦИОННЫХ ИСПЫТАНИЙ ПРОГРАММНЫХ ИЗДЕЛИЙ

В. В. Самаров

ООО «16 НИИЦ», Мытищи, Россия
samarov_vladimir@mail.ru

Аннотация. Рассматривается общая проблематика выполнения работ по регистрации событий компиляции и сборки программных изделий, проходящих сертификационные испытания в системе сертификации Минобороны России, при выполнении этапа работ по контролю требований по полноте и отсутствию избыточности исходных текстов на уровне файлов. Для фиксации событий компиляции и сборки проекта из исходных текстов предлагается к использованию универсальный метод, не зависящий от схемы и средств сборки, основанный на механизмах регистрации, предоставляемых системой аудита операционных систем семейства Linux (далее – ОС Linux). Приведен алгоритм по настройке системы аудита ОС Linux и получения записей, фиксирующих события, описывающих процесс регистрации и сборки исследуемого проекта. Рассмотрены выходные данные, генерируемые системой аудита ОС Linux, и дано обоснование возможности и целесообразности использования полученных данных при проведении соответствующего этапа сертификационных испытаний.

Ключевые слова: сертификационные испытания программных изделий, контроль полноты и отсутствия избыточности на уровне файлов, система аудита ОС Linux

Для цитирования: Самаров В. В. Использование системы аудита операционных систем семейства Linux при проведении сертификационных испытаний программных изделий // Надежность и качество сложных систем. 2021. № 1. С. 144–150. doi:10.21685/2307-4205-2021-1-14

USE OF THE LINUX OPERATING SYSTEM AUDIT SYSTEM WHEN CONDUCTING CERTIFICATION TESTS OF SOFTWARE PRODUCTS

V. V. Samarov

LLC "16 NIITS", Mytishchi, Russia
samarov_vladimir@mail.ru

Abstract. The general problematics of the work on the registration of compilation and assembly events of software products undergoing certification tests in the certification system of the Ministry of Defense of Russia, when performing the stage of work to control the requirements for the completeness and absence of redundancy of source texts at the file level, is considered. To record the compilation and build events of a project from source texts, it is proposed to use a universal method that does not depend on the scheme and build tools, based on the registration mechanisms provided by the audit system of operating systems of the Linux family (hereinafter referred to as Linux OS). An algorithm for setting up a Linux OS audit system and obtaining records that record events describing the process of registration and assembly of the project under study is presented. The paper considers the output data generated by the Linux OS audit system and substantiates the possibility and expediency of using the obtained data during the corresponding stage of certification tests.

Keywords: certification testing of software products, control of completeness and lack of redundancy at the file level, Linux OS audit system

For citation: Samarov V.V. Use of the linux operating system audit system when conducting certification tests of software products. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2021;1:144–150. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2021-1-14

При проведении сертификационных испытаний программных изделий испытательными лабораториями, аккредитованными в системе сертификации Минобороны России, выполняется этап работ по оценке полноты и отсутствию избыточности пакетов с исходными текстами контролируемого программного изделия на уровне файлов.

Структурно, согласно руководящему документу «Защита от несанкционированного доступа к информации. Часть 1. Программное обеспечение средств защиты информации. Классификация по уровню контроля отсутствия недекларированных возможностей» (Гостехкомиссия России, Москва, 1999 г.) [1], данный этап входит в группу испытаний «Статический анализ» и является обязательным к проведению для всех уровней контроля отсутствия недекларированных возможностей (далее – НДВ).

При проведении сертификационных испытаний контролируемого программного изделия по четвертому уровню контроля (конфиденциально) отсутствия НДВ, данный этап является одним из двух этапов проверок, проводимых непосредственно над исходными текстами программного изделия. Корректное выполнение проверок, регламентированных данным этапом, также крайне важно при испытаниях программных изделий на соответствие более высоким уровням контроля отсутствия недекларированных возможностей (третий и четвертый уровни контроля).

Действительно, необнаруженные на этапе проверки файловой избыточности файлы, в составе входящих в них функциональных объектов (процедур, функций) станут объектами исследования, выполняемого на последующих за этим этапом, стадиях испытаний в рамках статического и динамического анализа. При корректном проведении испытаний (при последующих испытаниях, проводимых в рамках статического и динамического анализа) файловая избыточность будет выявлена, но ресурсы испытательной лаборатории будут потрачены впустую.

Что касается важности установления полноты исходных текстов (как на уровне файлов, так и на уровне функциональных объектов), то необходимо отметить, что положительные результаты проверок по данному пункту являются критическим условием для дальнейших испытаний программного изделия и возможности формирования положительного заключения по результатам сертификационных испытаний.

Таким образом, важность этапа испытаний по установлению полноты и отсутствию избыточности пакетов с исходными текстами на уровне файлов не вызывает сомнений.

Статистика выполненных испытательной лабораторией ООО «16 НИИЦ» работ, а также участие сотрудников лаборатории в экспертизе материалов сертификационных испытаний, выполненных сторонними организациями, позволяет констатировать, что:

1) программные изделия, заявляемые на контроль соответствия отсутствия НДВ в системе сертификации Минобороны России, в подавляющем большинстве предназначены для функционирования в операционных системах семейства Linux (ОС «Astra Linux», ОС «МСВС», ОС «Заря», ОС «Роса» и некоторых других);

2) большая часть программных изделий разрабатывается на компилируемых языках C/C++/C# и их диалектов, а также на языке Java. При этом разработчиками используется все многообразие существующих средств разработки (в том числе средств компиляции и сборки пакетов с исходными текстами в дистрибутивные пакеты), а унификация этих средств отсутствует.

При проведении этапа контроля полноты на уровне файлов и отсутствия файловой избыточности на практике наиболее широко распространен метод, при котором сравниваются элементы (файлы) двух множеств (списков)^{1*} по определенной маске (расширению), а результаты сравнения сохраняются в два (три) результирующих списка: 1) перечень файлов исходных текстов, имеющийся только в первом множестве; 2) перечень файлов исходных текстов, имеющийся только во втором множестве; 3) перечень совпадающих файлов исходных текстов.

Как было отмечено выше, при компиляции и сборке исходных текстов в бинарные дистрибутивные пакеты (*.deb, *.rpm, *.tar, *.tar.gz, *.spio и др.) используются различные средства и системы сборки. В упрощенном виде схему сборки можно изобразить в следующем виде (рис. 1) [2]:

Исх. код → система сборки → компилятор → исполняемый (-е) файл (-ы)

Рис. 1. Упрощенная схема сборки проекта из исходных текстов

¹ Как правило, первое множество (список) представляет собой перечень файлов с исходными текстами, входящими в проект; второе множество – протокол, формируемый при компиляции исходных текстов из первого множества в соответствующие бинарные файлы и их последующей сборки в дистрибутивные пакеты.

При компиляции и сборке небольших проектов зачастую используются bash-скрипты или скрипты на иных интерпретируемых языках (php, python, ruby и др.), при сборке же более солидных проектов используются специализированные («front-end» и «back-end») средства (smake, qmake, make, ninja, apache ant, apache maven и др.), автоматизирующие этот процесс (рис. 2), либо средства, интегрированные в различные среды разработки.

Исх. код → GNU MAKE → компилятор → исполняемый (-е) файл (-ы)

Исх. код → CMAKE → GNU MAKE или QMAKE или NINJA или... → компилятор → исполняемый (-е) файл (-ы)

Рис. 2. Варианты схем сборки при использовании автоматизированных средств сборки на примере средств сборки GNU MAKE и CMAKE

При использовании перечисленных схем сборки далеко не всегда возможно использовать полученные по результатам их работы протоколы (маршруты) компиляции (сборки) в целях контроля отсутствия файловой избыточности и подтверждения полноты на уровне файлов. Это связано с тем, что перед разработчиками программных изделий не стоит задача написания сборочных скриптов и инструкций (правил) сборочных систем, обеспечивающих детальное протоколирование процесса сборки (включая протоколирование всех обращений компилятора к файлам исходных текстов). Таким образом, зачастую протоколы сборки оказываются неинформативными с точки зрения фиксации факта непосредственной компиляции конкретного файла с исходными текстами (в некоторых случаях без использования специальных отладочных инструкций компилятора (как пример, ключ – v для компилятора gcc [3]) для каждого его вызова, проблематично достоверно установить факт компиляции).

Таким образом, для получения информативных с точки зрения компиляции протоколов экспертам, проводящим испытания, зачастую необходимо выполнить работы по модификации (доработке) сборочных скриптов, инструкций (правил) сборочных систем. Для солидных проектов данная задача может быть нетривиальной и трудоемкой. Далее, после получения протоколов компиляции, требуется их интерпретация и семантический анализ, что с учетом отсутствия унификации в средствах разработки, сборки и, как следствие, в формируемых выходных протоколах компиляции значительно увеличивает трудоемкость проводимых работ в целом.

Для решения обозначенной задачи предлагается использовать систему аудита (сервис auditctl), которая поддерживается операционными системами семейства Linux, начиная с ядра версии 2.6 [4]. Данная система предназначена для отслеживания критичных с точки зрения безопасности системных событий, вместе с тем она может быть использована для получения подробного протокола компиляции и сборки исходных текстов исследуемого проекта в соответствующие бинарные дистрибутивные пакеты. Основным достоинством представленного ниже алгоритма получения протоколов компиляции (сборки) с использованием системы аудита является его универсальность, т.е. представленный ниже алгоритм может быть использован для любых систем разработки и средств сборки.

Алгоритм получения лога аудита на примере команд, совместимых с операционными системами, основанными на дистрибутивах Debian GNU Linux и Mandriva Linux:

1) установка системы аудита (сервис auditctl).

А. Открыть терминал и выполнить команду

```
$ whereis auditd
```

В случае если в результате выполнения команды в терминал будет выведено:

– сообщение вида «auditd:», свидетельствующее о том, что компоненты системы аудита отсутствуют в операционной системе, то выполнить установку службы

```
$ sudo apt-get install auditd ;
```

– сообщение вида «auditd:/sbin/audit.d...», свидетельствующее о том, что компоненты системы аудита развернуты в операционной системе, то перейти к пункту 1 (Б).

Б. Проверка успешности установки службы аудита и контроль ее функционирования.

Выполнить команду

```
$ sudo service auditd status
```

В случае если по результатам выполнения команды в терминал будет выведено сообщение вида “active (running)”, перейти к следующему пункту действий (п. 2), в противном случае (“inactive (dead)”) активировать службу, для чего выполнить команду

```
$ sudo service auditd start
```

- 2) постановка на аудит каталога с анализируемыми исходными текстами
Выполнить команду

```
$ sudo auditctl -w /Dest/for/src -p rwx
```

где */Dest/for/src* – абсолютный путь к каталогу с анализируемыми исходными текстами;

- 3) контроль настройки аудита

```
$ sudo auditdctl -l
```

- 4) выполнение компиляции и сборки программного изделия;
5) фиксация файла на съемный носитель для последующего анализа:

```
$ sudo cat /var/log/audit/audit.log > /media/aud_log.txt.
```

На примере простого тестового проекта (состоящего из двух Си файлов и makefile-а, описывающего схему их сборки в исполняемый файл (рис. 3), убедимся, что система аудита, настроенная в соответствии с приведенным выше алгоритмом, в полном объеме фиксирует последовательность сборки проекта в соответствии со схемой сборки, представленной на рис. 1, 2 (в части GNU MAKE).

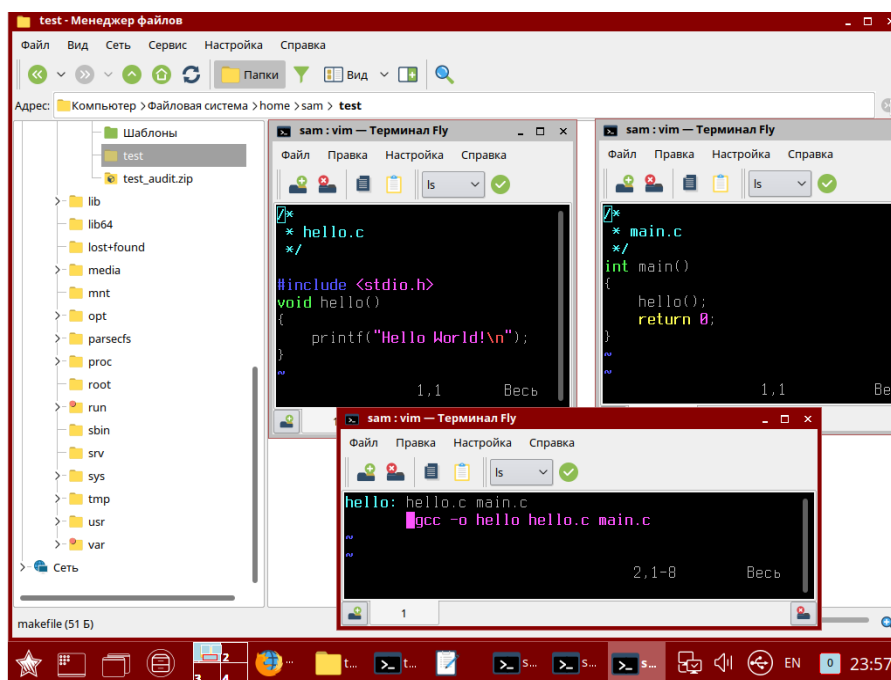


Рис. 3. Видеокадр содержимого файлов исходных текстов (файлы *hello.c*, *main.c*) и соответствующего им *makefile*-а, тестового проекта

Последовательность действий:

- в терминале перейти в каталог с тестовым проектом (предварительно выполнив действия п. 1–3 по настройке системы аудита, как описано выше):

```
$ cd /dest/for/src1
```

- произвести сборку тестового проекта, для чего выполнить команду

```
$ make
```

¹ Далее по тексту будут приведены данные для тестового каталога – */home/sam/test*.

– убедиться, что исполняемый файл сформирован и работоспособен, для чего выполнить команду

```

$ ./hello // проконтролировать появление
в терминале надписи «Hello World»
    
```

– ознакомиться с логом аудита (aud_log.txt), для чего выполнить действия указанные в п. 5 вышеприведенного алгоритма, после чего открыть его для анализа в любом текстовом редакторе, например «Kate» (рис. 4).

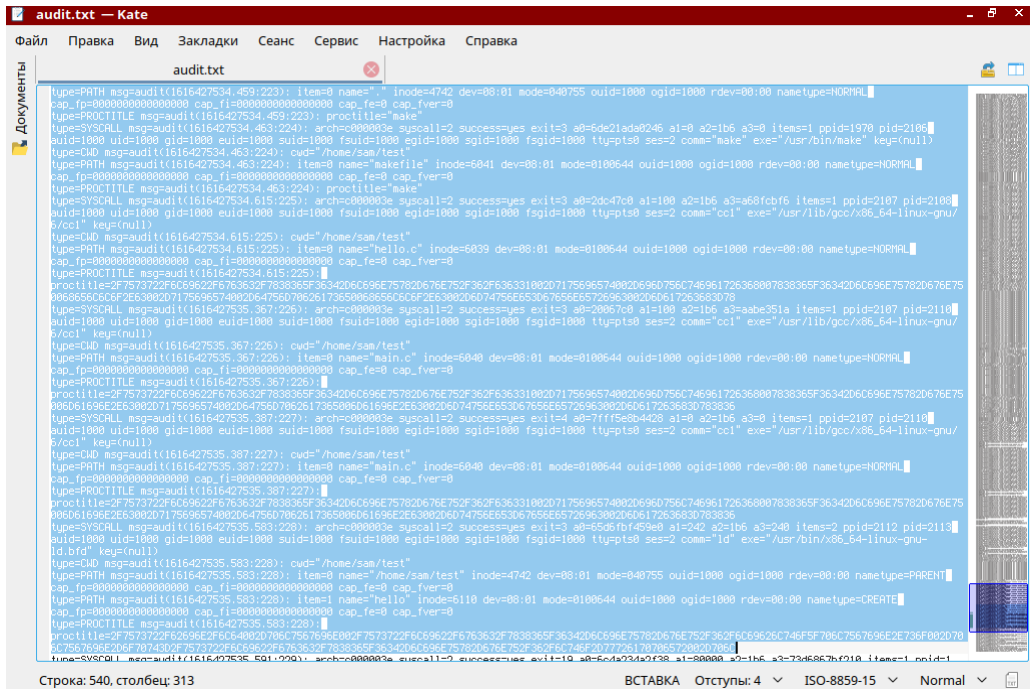


Рис. 4. Видеокадр файла аудита с выделенным фрагментом блоков записей, описывающих сборку

Из анализа содержимого лога аудита видно, что любое фиксируемое при сборке тестового проекта событие аудита состоит из четырех записей (type= SYSCALL, CWD, PATH, PROCTITLE) [5], имеющих одинаковую отметку времени и серийный номер (рис.4). В рассматриваемом примере сборка тестового проекта запрограммирована группами записей с серийными номерами 223–228.

Расшифровка записей:

223 – успешная инициализация системы сборки make (/usr/bin/make);

224 – успешное связывание системы сборки с файлом инструкций makefile, находящимся в каталоге /home/sam/test

225* – успешная компиляция (асемблирование) файла /home/sam/test/hello.c, компилятором gcc (команда /usr/lib/gcc/x86_64-linux-GNU/6/cc1 -quiet -imultiarch x86_64-linux-GNU hello.c -quiet -dumpbase hello.c -mtune=generic -march=x);

226–227* – успешная компиляция (асемблирование) файла /home/sam/test/main.c компилятором gcc (команда /usr/lib/gcc/x86_64-linux-gnu/6/cc1 -quiet -imultiarch x86_64-linux-gnu main.c -quiet -dumpbase main.c -mtune=generic -march=x86);

228, 232* – успешная линковка (связывание) объектных (временных) файлов в исполняемый файл hello, линковщиком ld (команда линковки – /usr/bin/ld -plugin usr/lib/gcc/x86_64-linux-GNU/6/liblto_plugin.so -plugin-opt=/usr/lib/gcc/x86_64-linux-gnu/6/lto-wrapper -pl)

Примечание: * Запись “ PROCTITLE ” частично представлена в виде строки в 16 СС.

Таким образом, фиксация системой аудита протокола сборки тестового проекта подтверждена. Вместе с тем предоставление информации в логе аудита избыточно, а сам он трудночитаем.

Для решения этой проблемы предлагается воспользоваться командой `aureport` [6]

`$ sudo aureport -f -i - success (1)//` выборка из сформированного лога аудита `/var/log/audit/audit.log` успешных записей обращения к файлам интерпретацией значений параметров

Результат выполнения команды для тестового проекта представлен на рис. 5.

```

sam@astra:~/test$ sudo aureport -f -i
File Report
=====
# date time file syscall success exe auid event
=====
1. 22.03.2021 18:38:38 /home/sam/test/ open yes /bin/bash sam 218
2. 22.03.2021 18:38:39 /home/sam/test/ open yes /bin/bash sam 219
3. 22.03.2021 18:38:39 /home/sam/test/ open yes /bin/bash sam 220
4. 22.03.2021 18:38:38 /home/sam/test/ open yes /bin/bash sam 217
5. 22.03.2021 18:38:42 /home/sam/test/ open yes /bin/bash sam 222
6. 22.03.2021 18:38:42 /home/sam/test/ open yes /bin/bash sam 221
7. 22.03.2021 18:38:54 makefile open yes /usr/bin/make sam 224
8. 22.03.2021 18:38:54 . open yes /usr/bin/make sam 223
9. 22.03.2021 18:38:54 hello.c open yes /usr/lib/gcc/x86_64-linux-gnu/6/cc1 sam 225
10. 22.03.2021 18:38:55 main.c open yes /usr/lib/gcc/x86_64-linux-gnu/6/cc1 sam 226
11. 22.03.2021 18:38:55 main.c open yes /usr/lib/gcc/x86_64-linux-gnu/6/cc1 sam 227
12. 22.03.2021 18:38:55 /home/sam/test open yes /usr/bin/x86_64-linux-gnu-ld.bfd sam 228
13. 22.03.2021 18:38:55 /home/sam/test/hello open yes /usr/bin/fly-fm-service sam 229
14. 22.03.2021 18:38:55 /home/sam/test/hello open yes /usr/bin/fly-fm-service sam 230
15. 22.03.2021 18:38:55 /home/sam/test/hello open yes /usr/bin/fly-fm-service sam 231
16. 22.03.2021 18:38:55 hello chmod yes /usr/bin/x86_64-linux-gnu-ld.bfd sam 232
17. 22.03.2021 18:38:55 /home/sam/test/hello open yes /usr/bin/fly-fm-service sam 233
sam@astra:~/test$

```

Рис. 5. Видеокادر выполнения утилиты `aureport` для просмотра успешных событий аудита

Как видно из результатов выполнения утилиты `aureport`, в целом регистрируемая при компиляции тестового проекта последовательность операций над контролируемыми файлами соответствует информации, регистрируемой системой аудита по умолчанию (файл `/var/log/audit.log`). Полученный при выполнении утилиты результат менее детальный, но лучше читаемый и все еще достаточный для интерпретации процесса сборки. Еще одним достоинством применения утилиты `aureport` является объем регистрируемой информации (в среднем более чем в 6 раз меньше, чем генерируемый в части сборки рассматриваемого проекта лог файл (`/var/log/audit/audit.log`)).

Таким образом, предложенный подход может быть использован специалистами испытательных лабораторий, аккредитованных в системе сертификации Минобороны России, при выполнении этапа работ по контролю требований по полноте и отсутствию избыточности исходных текстов на уровне файлов, и позволит в целом снизить трудоемкость проводимых работ. По мнению автора, основываясь на рассмотренных в данной статье результатах и данных, получаемых при использовании системы аудита *ОС Linux*, целесообразно проработать вопрос о возможности автоматизации соответствующего этапа сертификационных испытаний.

Список литературы

1. Защита от несанкционированного доступа к информации. Часть 1. Программное обеспечение средств защиты информации. Классификация по уровню контроля отсутствия недеklarированных возможностей : руководящий документ. М. : Гостехкомиссия России, 1999. URL: <https://fstec.ru/tekhnicheskaya-zashchita-informatsii/dokumenty/114-spetsialnye-normativnye-dokumenty/382-rukovodyashchij-dokument-prikaz-predsedatelya-gostekhkommisii-rossii-ot-4-iyunya-1999-g-n-114> (дата обращения: 26.02.2021).
2. Сборка упаковщика Смаке-ом или тренировка... URL: <https://habr.com/ru/post/178839/> (дата обращения: 26.02.2021).
3. MAN gcc (FreeBSD и Linux). URL: <https://www.opennet.ru/man.shtml?topic=gcc&russian=0&category=&submit=%F0%CF%CB%C1%DA%C1%D4%D8+man> (дата обращения: 26.02.2021).
4. Пингвин под колпаком: Аудит системных событий в линукс // Хакер. URL: <https://xakep.ru/2011/03/30/54897/> (дата обращения: 26.02.2021).

5. UNDERSTANDING AUDIT LOG FILES. RHEL. Security Guide. URL: https://access.redhat.com/documentation/en-us/red_hat_enterprise_linux/7/html/security_guide/sec-understanding_audit_log_files, (дата обращения: 26.02.2021).
6. MAN Aureport. Команды системного администрирования. URL: <https://www.opennet.ru/man.shtml?topic=aureport&category=8&russian=0> (дата обращения: 26.02.2021).

References

1. *Zashchita ot nesanktsionirovannogo dostupa k informatsii. Chast' 1. Programmnoe obespechenie sredstv zashchity informatsii. Klassifikatsiya po urovnyu kontrolya otsutstviya nedeklarirovannykh vozmozhnostey: rukovod-yashchiy document = Protection against unauthorized access to information. Part 1. Information security software. Classification by level of control of the absence of undeclared opportunities : guidance document.* Moscow: Gostekhkomiissiya Rossii, 1999. (In Russ.). Available at: <https://fstec.ru/tekhnicheskaya-zashchita-informatsii/dokumenty/114-spetsialnye-normativnye-dokumenty/382-rukovodyashchij-dokument-prikaz-predsedatelya-gostekhkomiissii-rossii-ot-4-iyunya-1999-g-n-114> (accessed 26.02.2021).
2. *Sborka upakovshchika Cmake-om ili trenirovka...* = *Cmake Packer assembly or training...* (In Russ.). Available at: <https://habr.com/ru/post/178839/> (accessed 26.02.2021).
3. *MAN gcc (FreeBSD i Linux).* Available at: <https://www.opennet.ru/man.shtml?topic=gcc&russian=0&category=&submit=%F0%CF%CB%C1%DA%C1%D4%D8+man> (accessed 26.02.2021).
4. Penguin under the hood: Audit of system events in Linux. *Khaker = Hacker.* (In Russ.). Available at: <https://xakep.ru/2011/03/30/54897/> (accessed 26.02.2021).
5. UNDERSTANDING AUDIT LOG FILES. RHEL. Security Guide. Available at: https://access.redhat.com/documentation/en-us/red_hat_enterprise_linux/7/html/security_guide/sec-understanding_audit_log_files, (accessed 26.02.2021).
6. *MAN Aureport. Komandy sistemnogo administrirovaniya = MAN Aureport. System Administration Commands.* (In Russ.). Available at: <https://www.opennet.ru/man.shtml?topic=aureport&category=8&russian=0> (accessed 26.02.2021).

Информация об авторах / Information about the authors

Владимир Владимирович Самаров

заместитель начальника испытательной лаборатории,
 ООО «16 НИИЦ»
 (Россия, Московская обл., г. Мытищи,
 Олимпийский просп., 29, вл. 2, 7А-4)
 E-mail: samarov_vladimir@mail.ru

Vladimir V. Samarov

deputy head of test laboratory,
 LLC "16 NIITS "
 (7А-4, 2, 29 Olimpiyskiy avenue, Mytischy,
 Moscow region, Russia)