

**СОДЕРЖАНИЕ**

**ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ ПРОБЛЕМ  
НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА**

**Мамонтов Е. В.**  
НЕКОТОРЫЕ ПРОБЛЕМЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ  
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ВОЗДУШНЫМ ДВИЖЕНИЕМ..... 5

**Куатов Б. Ж., Рыбаков И. М., Юрков Н. К.**  
К ПРОБЛЕМЕ СОЗДАНИЯ ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ ТЕПЛОАГРУЖЕННЫХ  
ЭЛЕМЕНТОВ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМЫ ..... 9

**Иванов А. П., Иванов А. И., Малыгин А. Ю., Безяев А. В., Куприянов Е. Н., Банных А. Г.,  
Перфилов К. А., Лукин В. С., Савинов К. Н., Полковникова С. А., Серикова Ю. И.**  
АЛЬБОМ ИЗ ДЕВЯТИ КЛАССИЧЕСКИХ СТАТИСТИЧЕСКИХ КРИТЕРИЕВ  
ДЛЯ ПРОВЕРКИ ГИПОТЕЗЫ НОРМАЛЬНОГО ИЛИ РАВНОМЕРНОГО  
РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДАННЫХ МАЛЫХ ВЫБОРОК .....20

**Китаев В. Н., Афанасьев Р. А., Петров М. В.**  
МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИНЕРЦИОННОГО ВКЛЮЧАТЕЛЯ .....30

**ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ  
НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА СЛОЖНЫХ СИСТЕМ**

**Мамонтов Е. В.**  
ЧЕЛОВЕЧЕСКИЙ ФАКТОР И БЕЗОПАСНОСТЬ ПОЛЕТОВ  
ПРИ УПРАВЛЕНИИ ВОЗДУШНЫМ ДВИЖЕНИЕМ.....41

**Иванов С. В., Зайченко А. В., Хорольский Е. М., Колесников А. А.**  
МЕТОДИКА ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ДВОЙНОГО  
НАЗНАЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ ТРЕХУРОВНЕВОЙ АРХИТЕКТУРЫ СУБД .....46

**Нгуен Тхань Лонг, Кузин Н. А., Юрков Н. К.**  
К ПРОБЛЕМЕ ФОРМИРОВАНИЯ ОБЛИКА ПЕРСПЕКТИВНЫХ  
БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ.....55

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИИ  
В ПРИБОРОСТРОЕНИИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКЕ**

**Агеев А. М., Буков В. Н.**  
ЭФФЕКТИВНОСТЬ РЕЗЕРВИРОВАНИЯ ИЗБЫТОЧНОЙ  
СИСТЕМЫ ПОСРЕДСТВОМ СУПЕРВИЗОРОВ КОНФИГУРАЦИЙ.....67

**Ключников А. В.**  
ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕДУРЫ УРАВНОВЕШИВАНИЯ ДЛИННОМЕРНОГО  
ТЕЛА В ЕДИНСТВЕННОЙ ПЛОСКОСТИ КОРРЕКЦИИ ДИСБАЛАНСОВ  
НА ВЕРТИКАЛЬНОМ БАЛАНСИРОВОЧНОМ СТЕНДЕ .....83

**Савин М. Л., Гришко А. К., Зуев В. Д., Кочегаров И. И., Соловьева Е. М.**  
АНАЛИЗ ОТКАЗОВ ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ ПРИ КОНТРОЛЕ  
РАБОТОСПОСОБНОСТИ УСТРОЙСТВА ПО КОСВЕННЫМ ПАРАМЕТРАМ ..... 91

**Савин М. Л., Зуев В. Д., Кочегаров И. И., Соловьева Е. М., Лысенко А. В.**  
МЕТОДИКА КОНТРОЛЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ  
УСТРОЙСТВА ПО КОСВЕННЫМ ПАРАМЕТРАМ ..... 98

### **ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ**

**Ильин А. С., Карчев И. А., Воронов А. П.**  
ДЕЛИТЕЛЬ НАПРЯЖЕНИЙ ВЫСОКОВОЛЬТНЫЙ ДНВ-140И  
ДЛЯ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ..... 108

### **БЕЗОПАСНОСТЬ В ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ**

**Masloboev A.V.**  
A UNIFIED SYSTEM FOR ENSURING THE REGIONAL SECURITY ..... 115

**CONTENT**

**FUNDAMENTALS OF RELIABILITY AND QUALITY ISSUES**

**Mamontov E.V.**  
SOME PROBLEMS OF IMPROVING THE EFFICIENCY OF AIR TRAFFIC CONTROL SYSTEMS ..... 5

**Kuatov B.Zh., Rybakov I.M., Yurkov N.K.**  
ON THE PROBLEM OF CREATING DIGITAL MODELS  
OF HEAT-LOADED ELEMENTS OF A RADIO-ELECTRONIC SYSTEM..... 9

**Ivanov A.P., Ivanov A.I., Malygin A.Yu., Bezyaev A.V., Kupriyanov E.N., Bannykh A.G.,  
Perfilov K.A., Lukin V.S., Savinov K.N., Polkovnikova S.A., Serikova Yu.I.**  
AN ALBUM OF NINE CLASSICAL STATISTICAL CRITERIA FOR TESTING THE HYPOTHESIS  
OF NORMAL OR UNIFORM DISTRIBUTION OF DATA IN SMALL SAMPLES .....20

**Kitaev V.N., Afanasyev R.L., Petrov M.V.**  
MATHEMATICAL MODEL OF A THRESHOLD INERTIA SWITCH.....30

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

**Mamontov E. V.**  
THE HUMAN FACTOR AND FLIGHT SAFETY WHEN CONTROLLING AIR TRAFFIC .....41

**Ivanov S.V., Zaichenko A.V., Khorolsky E.M., Kolesnikov A.A.**  
METHODOLOGY FOR ASSESSING THE STATE OF DUAL-USE ROBOTIC  
COMPLEXES BASED ON THE USE OF A THREE-LEVEL  
ARCHITECTURE OF A DATABASE MANAGEMENT SYSTEM.....46

**Nguyen Thanh Long, Kuzin N.A., Yurkov N.K.**  
ON THE PROBLEM OF FORMING THE APPEARANCE  
OF PROMISING UNMANNED AERIAL VEHICLES .....55

**DESIGN AND TECHNOLOGY IN INSTRUMENTATION  
AND RADIO ELECTRONICS**

**Ageev A.M., Bukov V.N.**  
EFFICIENCY OF REDUNDANT SYSTEM THROUGH CONFIGURATION SUPERVISORS .....67

**Klyuchnikov A.V.**  
SPECIAL APPROACH FOR A LONG-LENGTH SOLID BALANCING IN THE UNIQUE  
PLANE OF UNBALANCES CORRECTION AT VERTICAL BALANCING STAND .....83

**Savin M.L., Grishko A.K., Zuev V.D., Kochegarov I.I., Solov'eva E.M.**  
ANALYSIS OF FAILURES OF FIELD-EFFECT TRANSISTORS WHEN MONITORING  
THE OPERABILITY OF THE DEVICE BY INDIRECT PARAMETERS .....91

**Savin M.L., Zuev V.D., Kochegarov I.I., Solov'eva E.M., Lysenko A.V.**  
METHODS OF PERFORMANCE MONITORING DEVICES BY INDIRECT PARAMETERS ..... 98

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

**Ilin A.S., Karchev I.A., Voronov A.P.**  
HIGH VOLTAGE DIVIDER DNV-140I FOR INFORMATION-MEASURING SYSTEMS ..... 108

### **SAFETY IN EMERGENCY SITUATIONS**

**Masloboev A.V.**  
A UNIFIED SYSTEM FOR ENSURING THE REGIONAL SECURITY ..... 115

# ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ ПРОБЛЕМ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА

## FUNDAMENTALS OF RELIABILITY AND QUALITY ISSUES

УДК 007.51: 658.52.011.56  
doi:10.21685/2307-4205-2022-1-1

### НЕКОТОРЫЕ ПРОБЛЕМЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ВОЗДУШНЫМ ДВИЖЕНИЕМ

**Е. В. Мамонтов**

НПО «Прибор», Санкт-Петербург, Россия  
E.Mamontov@npo-pribor.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Основными задачами, решаемыми службой управления воздушным движением, являются: обеспечение вылета и приема воздушных судов (ВС) согласно суточному плану; выдача диспетчерских разрешений; своевременное установление ограничений о приеме и выпуске ВС по состоянию аэродромов, наземного оборудования, метеоусловиям; обеспечение вывода ВС на посадку с помощью посадочного радиолокатора; предотвращение посадки на неподготовленные взлетно-посадочной полосы; постоянный контроль за движением ВС с использованием наземных радиотехнических средств; обеспечение экипажей ВС оперативной информацией о воздушной обстановке; предотвращение отклонений ВС от установленных трасс, маршрутов, схем снижения и захода на посадку, коридоров входа и выхода из района аэродрома; обеспечение установления тонких интервалов эшелонирования между ВС; информация экипажей о местонахождении ВС и метеорологической обстановке; сообщение экипажем сведений о наличии и характере опасных метеоявлений в районе полетов и выдача рекомендаций по их обходу; постоянное взаимодействие с диспетчерскими пунктами гражданской авиации и других ведомств для согласования условий полетов и обеспечения их безопасности и регулярности; непрерывное прослушивание радиостанций ВС и ведение радиообмена по установленным правилам и фразеологии. В некоторых аэропортах доставка на посадку также предусматривает запуск самолетов и запуск двигателей. *Материалы и методы.* Эта позиция особенно важна в сильно перегруженных аэропортах, чтобы повысить безопасность. Показано, что система обработки полетных данных управляет всеми данными, относящимися к полетному плану, включая – в низкой или высокой степени – информацию о дорожке после установления корреляции между ними (план полета и трек). *Результаты и выводы.* Вся эта информация распространяется на современные операционные системы отображения, что делает ее доступной для контроллеров.

**Ключевые слова:** воздушное движение, безопасность, управление, надежность, человеческий фактор

**Для цитирования:** Мамонтов Е. В. Некоторые проблемы повышения эффективности систем управления воздушным движением // Надежность и качество сложных систем. 2022. № 1. С. 5–8. doi:10.21685/2307-4205-2022-1-1

### SOME PROBLEMS OF IMPROVING THE EFFICIENCY OF AIR TRAFFIC CONTROL SYSTEMS

**E.V. Mamontov**

NPO Pribor, Saint Petersburg, Russia  
E.Mamontov@npo-pribor.ru

**Abstract. Background.** The main tasks solved by the air traffic control service (ATC) are: ensuring the departure and reception of aircraft (AC) according to the daily plan; issuance of dispatching permits; timely establishment of restrictions on the acceptance and release of aircraft according to the state of airfields, ground equipment, weather conditions; ensuring the withdrawal of the aircraft for landing with the help of a landing radar; prevention of flights on unprepared runways (runways); constant control over the movement of the aircraft using ground-based radio equipment; providing aircraft crews with operational information on the air situation; prevention of aircraft deviations from the established routes, routes, descent and approach patterns, entry and exit corridors from the aerodrome area; provision of established separation intervals between aircraft; crew information about the location of the aircraft and the meteorological situation; reporting by the crew of information about the presence and nature of dangerous weather events in the flight area and issuing recommendations for avoiding them; constant interaction with civil aviation control centers (CA) and other departments to agree on the conditions of flights and ensure their safety and regularity; continuous listening to the radio stations of the Armed Forces and conducting radio exchange according to the established rules and phraseology. At some airports, landing delivery also includes starting aircraft and starting engines. *Materials and methods.* This position is especially important at heavily congested airports to improve safety. The flight data processing system is shown to manage all data related to the flight plan, including – to a low or high degree – track information after correlation between them (flight plan and track). *Results and conclusions.* All of this information is extended to modern display operating systems, making it available to controllers.

**Keywords:** air traffic, safety, management, reliability, human factor

**For citation:** Mamontov E.V. Some problems of improving the efficiency of air traffic control systems. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2022;(1):5–8. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2022-1-1

Имеющийся опыт разработки автоматизированных систем управления воздушным движением показывает, что для решения задачи согласования внешних и внутренних средств системы необходимо исследовать внутренние средства деятельности человека, т.е. концептуальную модель оператора системы.

Концептуальная модель – это система навыков и представлений («образов») оператора о реальной и прогнозируемой обстановке, в которой осуществляется воздушное движение. Содержание этих психологических «образов» позволяет мысленно представить картину нормального протекания процесса и предполагаемых отклонений от него, возможных путей и способов воздействия на движение воздушных объектов в зоне своей ответственности.

Чем сложнее протекающие в объекте процессы, чем больше контролируемых параметров и точек приложения управляющих воздействий, тем более сложная система взаимосвязей между ними, тем шире и разнообразнее должна быть концептуальная модель оператора [1]. Здесь управление воздушным движением приобретает особое положение, обоснованное невозможностью остановить процесс воздушного движения и непредсказуемостью последствий полной выработки топлива на воздушном судне без обеспечения благополучного исхода полета [1].

Исследования показали, что в концептуальную модель входят не только образы и представления, играющие роль обобщенных схем поведения, но и такие субъективные элементы, как побуждающие мотивы деятельности, субъективная значимость, предвидение последствий развития ситуации и реализации управляющих воздействий, знание вероятностей структуры событий и т.п. Следует также отметить, что при управлении воздушным движением предвидение последствий развития ситуаций должно быть соизмеримо со скоростью принимаемых мер по недопущению нанесения ущерба и гибели людей.

На основании получаемой информации и сопоставления ее с психическим образом оператор системы управления воздушным движением (УВД) должен по возможности быстро и точно определить место и характер реального или прогнозируемого нарушения, определить наиболее правильный в сложившейся ситуации способ устранения нарушения, должен оценить опасность и время, которым он вправе располагать для решения текущей задачи [2].

Проведенные эксперименты позволяют сделать выводы о том, что концептуальная модель должна включать несколько уровней, позволяющих работать оператору более быстро или более медленно, более точно или приближенно [2].

К настоящему времени предложено достаточно большое число качественных и количественных моделей разных видов операторской деятельности, которые широко освещены в отечественной и зарубежной литературе. Сделаны попытки классификации этих моделей по разным признакам: используемого математического аппарата, назначения моделей, вида операторской деятельности [3].

Проведенные исследования показали, что методы математического моделирования позволяют решать задачи проектирования деятельности оператора системы УВД наиболее полно, поскольку они отвечают следующим требованиям [3, 4]:

- возможность получения количественных результатов;
- возможность на одном языке описывать и оценивать деятельность человека, работу технической части и функционирование всей АС УВД;
- отсутствие необходимости в непосредственных экспериментальных исследованиях при решении ряда задач инженерно-психологического проектирования;
- возможность перебора и сравнения большого числа альтернативных вариантов решения отдельных задач.

Однако опыт разработки математических моделей демонстрирует, что математические модели являются часто упрощенными, не имеющими достаточной практической ценности, дающими низкую достоверность получаемых результатов. Исследования показали, что основной причиной этого является то, что они построены, как правило, без учета психических процессов деятельности человека на уровне, который соответствует языку и способу описания.

Методы математического описания требуют знания алгоритма решения задач контроля и управления воздушным движением. Проведенный анализ позволяет сделать выводы о том, что в настоящее время алгоритмизация подвергается лишь часть задач контроля и управления из-за сложности анализа протекающих процессов воздушного движения. Экспериментальные исследования показали, что лица группы руководства полетами (ГРП) пользуются не отдельными алгоритмами, а целостной алгоритмической структурой. Поэтому описание с помощью таких моделей процесса решения отдельных задач, без учета выработанной полной структуры процесса контроля и управления, может приводить к существенным ошибкам [5].

Следует отметить, что составленный проектировщиком алгоритм решения задачи и сам реальный процесс проектирования почти никогда не совпадают по числу, номенклатуре и последовательности операций деятельности [6].

В данной статье сделана попытка проанализировать результаты исследования структуры психической деятельности авиационных диспетчеров и лиц ГРП, решающих задачи контроля и управления воздушным движением. На основании полученных экспериментальных данных строения и содержания психической деятельности, выявленных механизмов организации сложных сенсорных, мыслительных и моторных компонентов деятельности в различных конкретных условиях предлагается построить теоретические положения о реальной структуре психической деятельности и о возможности теоретического построения адекватных моделей деятельности, предназначенных для решения задач инженерно-психологического проектирования при модернизации и создании перспективных автоматизированных систем управления воздушным движением (АС УВД) [7, 8].

Следует указать, что в рамках проведенных исследований был выбран подход, предполагающий, что для целей проектирования АС УВД и количественной оценки деятельности лиц ГРП разрабатываются свои модели, а также, что построение моделей, формализация фактически являются приближенными. Они осуществляются с определенной степенью погрешности, а их результаты применимы только в определенном диапазоне условий.

Необходимо учитывать, что формализованная модель строится для описания далеко не всех связей и закономерностей процесса управления воздушным движением. Однако, как правило, она охватывает наиболее существенный круг связей, которыми можно охарактеризовать изучаемые с ее помощью свойства процесса УВД. Поэтому в ряде случаев, особенно при изучении деятельности ГРП, модель может выступать как база, на основе которой анализируется система УВД как сложная система. При этом для других подобных задач требуется изменить модель.

Это привело к необходимости в качестве одной из первых задач при разработке моделей деятельности ГРП решить задачу обоснования требуемого уровня исследования и описания структуры психической деятельности должностных лиц ГРП в соответствии с целевым назначением разрабатываемой модели. Успешное решение этой задачи позволит выявить наиболее существенные связи и взаимозависимости функциональных возможностей технических средств и психофизиологических свойств операторов систем управления воздушным движением, учесть данные факторы при проектировании автоматизированных систем управления воздушным движением и повысить их эффективность.

### Список литературы

1. Андрианова В. Е. Деятельность человека в системах управления (Очерк работы авиадиспетчера). Л. : ЛГУ, 1974.
2. Котик М. А. Саморегуляция и надежность человека-оператора. Таллин : Валгус, 1974.
3. Ахутин В. М., Нафтуньев А. И. Математическое моделирование деятельности человека-оператора при разработке эргатических систем. Л. : ЛГУ, 1972.
4. Сулаев С. А. Роль человеческого фактора в деятельности единой системы организации воздушного движения : учеб. пособие. М. : ИД Академии Жуковского, 2018. 76 с.
5. Козлов В. В. Человеческий фактор: история, теория и практика в авиации. М. : Полиграф, 2002. 280 с.
6. Романов В. В. Юридическая психология : учебник для академического бакалавриата. 6-е изд., перераб. и доп. М. : Юрайт, 2017. 537 с.
7. Артемов А. Д., Лысаков Н. Д., Лысакова Е. Н. Человеческий фактор в эксплуатации авиационной техники : монография. М., 2018. 156 с.

### References

1. Andrianova V.E. *Deyatel'nost' cheloveka v sistemakh upravleniya (Ocherk raboty aviadispatchera) = Human activity in control systems (An essay on the work of an air traffic controller)*. Leningrad: LGU, 1974. (In Russ.)
2. Kotik M.A. *Samoregulyatsiya i nadezhnost' cheloveka-operatora = Self-regulation and reliability of a human operator*. Tallin: Valgus, 1974.
3. Akhutin V.M., Naftul'ev A.I. *Matematicheskoe modelirovanie deyatel'nosti cheloveka-operatora pri razrabotke ergaticheskikh system = Mathematical modeling of human operator activity in the development of ergatic systems*. Leningrad: LGU, 1972. (In Russ.)
4. Sulaev S.A. *Rol' chelovecheskogo faktora v deyatel'nosti edinoy sistemy organizatsii vozdušnogo dvizheniya: ucheb. posobie = The role of the human factor in the activities of the unified air traffic management system : textbook*. Moscow: ID Akademii Zhukovskogo, 2018:76. (In Russ.)
5. Kozlov V.V. *Chelovecheskiy faktor: istoriya, teoriya i praktika v aviatsii = The human factor: history, theory and practice in aviation*. Moscow: Poligraf, 2002:280. (In Russ.)
6. Romanov V.V. *Yuridicheskaya psikhologiya: uchebnik dlya akademicheskogo bakalavriata = Legal psychology : textbook for academic bachelor's degree*. 6th ed., rev. and suppl. Moscow: Yurayt, 2017:537. (In Russ.)
7. Artemov A.D., Lysakov N.D., Lysakova E.N. *Chelovecheskiy faktor v ekspluatatsii aviatsionnoy tekhniki: monografiya = The human factor in the operation of aviation equipment: monograph*. Moscow, 2018:156. (In Russ.)

### Информация об авторах / Information about the authors

#### Евгений Вячеславович Мамонтов

кандидат технических наук,  
заместитель генерального директора по НИОКР,  
НПО «Прибор»  
(Россия, г. Санкт-Петербург, 17-я линия В.О., 4-6)  
E-mail: E.Mamontov@npo-pribor.ru

#### Evgeniy V. Mamontov

Candidate of technical sciences,  
deputy CEO for R&D,  
NPO Pribor  
(4-6 17th line V.O., Saint Petersburg, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /  
The authors declare no conflicts of interests.**

**Поступила в редакцию/Received 27.09. 2021**

**Поступила после рецензирования/Revised 10.10.2021**

**Принята к публикации/Accepted 10.11.2021**

## К ПРОБЛЕМЕ СОЗДАНИЯ ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ ТЕПЛОНАГРУЖЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМЫ

Б. Ж. Куатов<sup>1</sup>, И. М. Рыбаков<sup>2</sup>, Н. К. Юрков<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Военный институт Сил Воздушной обороны Республики Казахстан имени Т. Я. Бегельдинова, Актобе, Казахстан  
<sup>2,3</sup> Пензенский государственный университет, Пенза, Россия  
<sup>1</sup>kuatov.baurjan@mail.ru, <sup>2</sup>rybakov\_im@mail.ru, <sup>3</sup>yurkov\_NK@mail.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Исследование теплообменных процессов в печатных узлах является основополагающей проблемой для обеспечения высокого уровня надежности и работоспособности электронной аппаратуры и сложных систем в общем. Управление температурным режимом, получение достоверной информации о температурах перегрева радиоэлектронных компонентов, выявление критически нестабильных элементов и выработка новых технологических приемов отвода тепла – это те цели, достигнув которые возможно обеспечить высокий уровень надежности современной электронной аппаратуры. *Материалы и методы.* Актуальность поставленной проблемы в работе обуславливается широким использованием в современной электронной аппаратуре микроэлектронных компонентов, имеющих непосредственный контакт с поверхностью печатной платы, что в свою очередь ведет к изменению характера распределения температур, а в совокупности с применением многослойных печатных плат полностью переопределяет существующие методики исследования и анализа тепловых процессов в печатных узлах. *Результаты и выводы.* Работа направлена на исследование теплообменных процессов в печатных узлах, а научная новизна заключается в разработке новой методики прогнозирования надежности электронной аппаратуры за счет измерения и анализа теплового режима печатных узлов, учитывающей не только печатную плату и компоненты, а также влияние на ее тепловой режим топологии печатных проводников, что в совокупности образует сложную систему для измерения и анализа.

**Ключевые слова:** теплообмен, надежность, работоспособность, сложная система, температура, цифровое и имитационное моделирование

**Для цитирования:** Куатов Б. Ж., Рыбаков И. М., Юрков Н. К. К проблеме создания цифровых моделей теплонагруженных элементов радиоэлектронной системы // Надежность и качество сложных систем. 2022. № 1. С. 9–19. doi:10.21685/2307-4205-2022-1-2

## ON THE PROBLEM OF CREATING DIGITAL MODELS OF HEAT-LOADED ELEMENTS OF A RADIO-ELECTRONIC SYSTEM

B.Zh. Kuvatov<sup>1</sup>, I.M. Rybakov<sup>2</sup>, N.K. Yurkov<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Air Defense Forces of the Military Institute of the Republic of Kazakhstan, Aktobe, Kazakhstan  
<sup>2,3</sup> Penza State University, Penza, Russia  
<sup>1</sup>kuatov.baurjan@mail.ru, <sup>2</sup>rybakov\_im@mail.ru, <sup>3</sup>yurkov\_NK@mail.ru

**Abstract.** *Background.* The study of heat exchange processes in printed circuit assemblies is a fundamental problem for ensuring a high level of reliability and performance of electronic equipment and complex systems in general. Temperature control, obtaining reliable information about overheating temperatures of electronic components, identifying critically unstable elements and developing new technological methods for heat removal – these are the goals that can be achieved to ensure a high level of reliability of modern electronic equipment. *Materials and methods.* The relevance of the problem posed in the work is due to the widespread use in modern electronic equipment of microelectronic components that have direct contact with the surface of the printed circuit board, which in turn leads to a change in the nature of the temperature distribution, and in combination with the use of multilayer printed circuit boards, completely redefines the existing methods for studying and analyzing thermal processes in printing units. *Results and conclusions.* The work is aimed at studying heat transfer processes in printed circuit assemblies, and the scientific novelty lies in the development of a new method for predicting the reliability of electronic equipment by measuring and analyzing the thermal regime of printed circuit assemblies, taking into account not only the printed circuit board and components, but also the influence of the topology of printed conductors on its thermal regime, which together form a complex system for measurement and analysis.

**Keywords:** heat transfer, reliability, performance, complex system, temperature, digital and simulation modeling

**For citation:** Kuvatov B.Zh., Rybakov I.M., Yurkov N.K. On the problem of creating digital models of heat-loaded elements of a radio-electronic system. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2022;(1):9–19. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2022-1-2

## Введение

Одна из основных проблем моделирования сложных систем заключается в том, что такие системы являются гибридными. Например, радиоэлектронная система при моделировании представляется совокупностью различных линейных, линеаризованных, нелинейных, цифровых, импульсных и т.п. элементов, при математическом описании которых используется математический аппарат анализа как аналоговых, так и цифровых систем. Для моделирования совместной работы цифровых и непрерывных звеньев систем можно применить метод моделирования, использующий дискретизацию непрерывных процессов. Использование методов цифрового моделирования позволяет привести математические модели всех элементов сложных систем к единой форме, обеспечить моделирование на едином языке, создать единую модель системы в реальном режиме времени, а также формализовать процесс проектирования. В развитие теории цифрового моделирования внесли существенный вклад отечественные и зарубежные ученые: Е. Н. Маквецов, А. М. Тартаковский, Я. З. Цыпкин, Л. Т. Кузин, Э. И. Джури, Ю. Т. Ту, Б. Куо, К. Острем и др.

Дадим некоторые определения. Согласно ГОСТ Р 57188–2016 дискретизация модели – это метод представления дифференциального и/или интегрального оператора выражением, основанным на вычислении значений функции, на которую действует оператор, в конечном числе точек расчетной области. Применение дискретизации к дифференциальной/интегральной задаче приводит к разностной схеме [1].

Численное моделирование – это моделирование поведения объекта, процесса, явления путем получения численного решения уравнений математической модели.

Цифровое моделирование – это процесс создания математического представления трехмерной формы объекта. Результатом этого процесса является то, что называется 3D-моделью, или 3D-сеткой, или 3D-мэшем (3D-mesh).

Можно создавать 3D-модель вручную или автоматически. Наиболее распространенными источниками цифровых моделей являются модели, созданные с использованием программного обеспечения 3D, а также результаты пространственного сканирования реальных физических объектов с использованием специального оборудования (рис. 1).

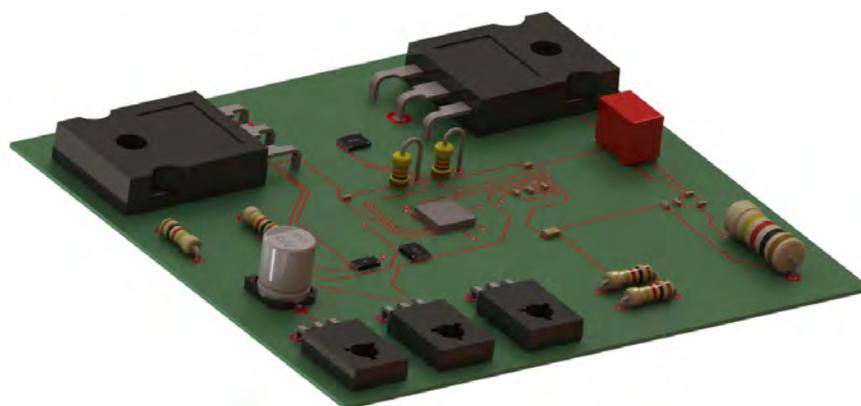


Рис. 1. 3D-модель, созданная с использованием специального программного обеспечения

Цифровое моделирование на современном этапе развивается наиболее динамично. Это связано с интенсивным развитием математического обеспечения, формирующегося в виде пакетов прикладных программ. Использование этих пакетов повышает производительность моделирования и одновременно упрощает его [2].

Родоначальником цифрового моделирования является профессор Е. Н. Маквецов, который так определял термин «Цифровая модель конструкции радиоэлектронной аппаратуры» (ЦМ РЭА) при расчетах вибраций [3, 4], как систему, которая включает в себя геометрическую и алгебраическую части. Геометрическая часть определяет разбивку конструкции на элементы и их взаимную ориентацию. Алгебраическая часть определяет физическое взаимодействие соседних элементов дискретной модели и внешние воздействия на нее.

Программа вычислений для ЭВМ при цифровом моделировании также имеет соответственно две части. Первая часть определяет последовательность обхода элементов модели в процессе вычислений, т.е. организует циклы по координатам и времени. Вторая часть организует вычисления искомых функций во всех узлах модели-сетки в каждом шаге по времени. Первая часть программ представляется на одном из алгоритмических языков и является универсальной, вторая часть, отражающая физику взаимодействия элементов, при постановке задачи на ЭВМ практически каждый раз составляется заново.

Для облегчения описания взаимодействия элементов в цифровой модели формализации составления алгоритмов предлагается часть программы формулировать на языке графов связей, которые в последнее время находят применение при решении различных технических задач [5] для систем с сосредоточенными параметрами. Графы связей могут автоматически вводиться в машину по командам передачи управления из первой программы.

Одной из основных трудностей при цифровом моделировании динамических процессов в сложных конструкциях является наличие в расчетной модели-сетке так называемых особых узлов – узлов сочленения различных элементов конструкции (рис. 2). В соответствии с принципами цифрового моделирования в основу построения расчетных соотношений положено физическое представление о процессе, причем расчетная схема строится непосредственно в конечно-разностной форме. Такой подход полезен со многих точек зрения. Во-первых, и это главное, отчетливо видна физическая сущность процесса, появляется возможность учета в модели всех реальных факторов, влияющих на процесс. Во-вторых, это позволяет строить единую модель для всего объекта в целом.

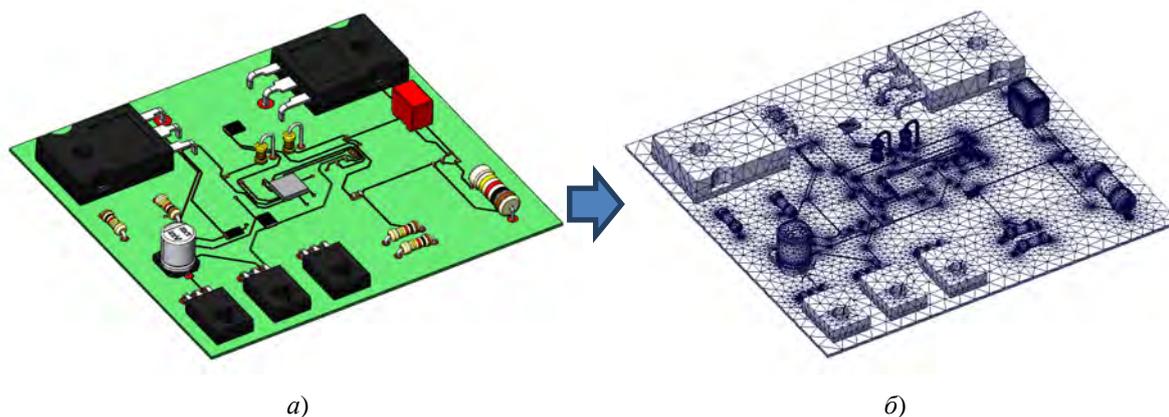


Рис. 2. Переход по стадиям моделирования:  
а – цифровая (имитационная) модель; б – модель-сетка

В общем случае для каждого узла модели, в том числе и для особых узлов, строятся и решаются свои уравнения движения [6]. Это исключает необходимость «сшивания» решений по границам различных областей, что особенно важно, поскольку вид решения заранее неизвестен. В частности, для узлов сочленения строятся шесть уравнений равновесия – проекций сил и моментов. Система уравнений получается довольно громоздкой, в результате чего усложняется программирование задачи. Однако в целом ряде задач можно избежать трудностей вычислительного характера, построив для всех узлов модели практически однотипные уравнения. К таким задачам можно отнести, например, расчет динамики сложных конструкций из пластин или оболочек со стержневыми каркасами.

Не останавливаясь подробно на методике построения модели-сетки и составлении расчетных соотношений для пластин, оболочек и стержней, достаточно полно изложенной в ряде работ [1–4], отметим лишь, что расчетная схема строится с учетом разложения функций напряжения и перемещения по толщине пластин, оболочек и стержней в ряд по полиномам Лежандра.

В современной радиоэлектронной аппаратуре широкое применение находят материалы, упругие, электрические, магнитные и тепловые свойства которых обладают ярко выраженной анизотропией. Такие материалы используются для изготовления различных конструктивных элементов, а также деталей и устройств, обладающих особыми свойствами.

Точные аналитические методы расчета динамических процессов в анизотропных телах весьма сложны и позволяют получить решение лишь в очень немногих частных случаях. Если при описании поведения конструктивных элементов можно ограничиться только учетом анизотропии упру-

гих свойств, то применительно к таким элементам РЭА, как кварцевые резонаторы, пренебрежение анизотропией электрических и тепловых свойств недопустимо. Решение такой задачи возможно, если использовать перспективный метод цифрового моделирования (рис. 3), позволяющий учесть также действие внешних возмущающих факторов.

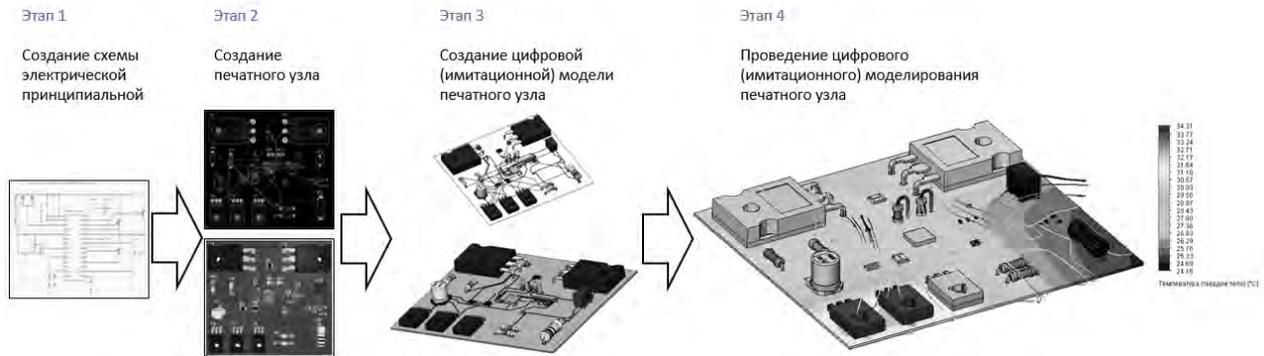


Рис. 3. Схема методики цифрового моделирования

В результате интенсивного развития микроэлектроники в современной РЭА широкое применение находят пластины сложной конфигурации с покрытиями, выполненными из самых различных материалов. При работе таких деталей в нестационарном тепловом режиме и существенном различии механических и тепловых характеристик материалов основы и покрытия возможно возникновение значительных напряжений, приводящих в отдельных случаях к разрушению целостности покрытия.

Динамические процессы в однородном элементе, находящемся в температурном поле, описываются уравнениями Дюамеля – Неймана. Применение этих уравнений для описания поведения неоднородного тела произвольной формы вызывает значительные трудности. Решение подобной задачи существенно упрощается при использовании метода цифрового моделирования.

Учет реального соотношения размеров пластины, толщин покрытия и основы приводит к необходимости введения неравномерной сетки с весьма мелким шагом по толщине, что резко увеличивает объем вычислений и затрудняет выполнение условия устойчивости решения.

Для тонких пластин с покрытием целесообразно применение приближенного метода разложения перемещений по полиномам Лежандра.

Пластину с покрытием заменим ее физической моделью в виде двух слоев сосредоточенных масс, соединенных безынерционными упругими стержнями. Отдельно для узлов основной части пластины и узлов покрытия представим перемещения  $u, v, w$  и изменения температуры  $\theta$  в виде рядов:

$$\begin{aligned}
 u^i &= \sum_m \left(m + \frac{1}{2}\right) u_m^i P_m^i\left(\frac{z}{h_z^i}\right); \\
 v^i &= \sum_m \left(m + \frac{1}{2}\right) v_m^i P_m^i\left(\frac{z}{h_z^i}\right); \\
 \omega^i &= \sum_m \left(m + \frac{1}{2}\right) \omega_m^i P_m^i\left(\frac{z}{h_z^i}\right).
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Здесь индекс  $i = 1$  указывает на принадлежность узла к пластине,  $i = 2 -$  к покрытию;  $P_m^i\left(\frac{z}{h_z^i}\right)$  – полиномы Лежандра;  $h_z^i$  – половина толщины пластины или покрытия.

Приведенный пример расчета совместного воздействия температуры и вибрации на элементарный объем радиоэлектронной аппаратуры позволяет сделать вывод об острой необходимости синтеза обобщенной модели радиоконструкции.

Под совокупной функцией будем рассматривать функцию напряженного деформированного состояния, учитывающую влияние как механических, так и температурных воздействий.

Для связи НДС с внешним воздействием необходимо дополнительно знать граничные условия. Граничные условия – это известные условия на поверхности, выраженные, например, через

напряжения, т.е. на границе (контуре) тела имеется поверхность с заданным распределением напряжений. Кроме статических граничные условия могут быть и кинематическими, и смешанными.

В теории обработки металлов давлением вводятся допущения, позволяющие решаемые задачи с той или иной степенью приближения свести к частным случаям НДС: плоскодеформированному; осесимметричному или плосконапряженному.

НДС представимо в виде некоторой непрерывной многомерной нелинейной функции, математическое представление которой обеспечивает решение множества оптимизационных задач, а также задач оптимального проектирования вновь создаваемых радиоэлектронных устройств.

### Цифровая модель теплонагруженных элементов

Рассмотрим представление непрерывной многомерной нелинейной функции в виде линейной суперпозиции одномерных функций, аргументами которых являются аргументы исходной функции или их линейная комбинация. Такое представление развивает идеи, лежащие в основе теории искусственных нейросетей, а также ряда теорем А. Н. Колмогорова и В. И. Арнольда, в соответствии с которыми любая многомерная непрерывная функция может быть представлена в виде сумм и произведений одномерных функций. Преимущество рассматриваемой аппроксимации состоит в возможности согласования представления со структурой фильтра Калмана – Бьюси, или фильтра второго порядка, т.к. позволяет легко перейти к независимой по каждой координате одномерной сплайн- аппроксимации (линейной или квадратичной). Получаемый при этом субоптимальный фильтр является фильтром с параметрами, значения которых меняются в зависимости от оценки состояния динамической системы.

Проблема аппроксимации функции многих переменных имеет давнюю предысторию и даже входит в состав 23 проблем математики, поставленных в начале XX в. Д. Гильбертом. С точки зрения практики, важность этой проблемы в настоящее время во многом определяется тем, что усложнение математических моделей, описывающих реальные явления так или иначе приводит к появлению в них сложных многоаргументных функций, вычисление которых требует построения громоздких алгоритмов и значительных вычислительных затрат. С другой стороны, она имеет важное теоретическое значение, поэтому ей уделяли внимание многие великие математики. Но только в 50-х гг. прошлого века проблема точного представления функций многих переменных нашла свое решение. Основной вклад внесли советские математики А. Н. Колмогоров и В. И. Арнольд.

В общей постановке задача точного представления функций многих переменных составляет существо 13-й проблемы Гильберта. Гильберт полагал, что точно представить функцию многих переменных в виде суперпозиции функций меньшего числа переменных невозможно.

В ряде своих работ А. Н. Колмогоров и В. И. Арнольд доказали неоднозначность решения проблемы Гильберта, а также получили теоремы, опровергающие тезис Гильберта [7, 8] для класса непрерывных функций. Такими теоремами являются:

- теорема о возможности представления непрерывных функций нескольких переменных суперпозициями непрерывных функций меньшего числа переменных;
- теорема о представлении любой непрерывной функции трех переменных в виде суммы функций не более двух переменных;
- теорема, в соответствии с которой любую непрерывную функцию  $n$  переменных можно получить с помощью операций сложения, умножения и суперпозиции непрерывных функций одного переменного.

Впоследствии эти результаты неоднократно уточнялись и развивались [9–14]. В частности, в работе [15] излагается метод построения аппроксимаций многомерных функций, основанный на линейных преобразованиях ее аффинных сечений. Метод позволяет приближать функцию многих переменных с помощью композиций функций одной переменной, имеющих простую геометрическую интерпретацию. В этом случае удастся формализовать и использовать информацию о качественном поведении сечений многомерной функции. Наряду с полной формой представления функций многих переменных в работе предложен также ряд усеченных форм и, в частности, представления многомерной функции или только в виде суммы одномерных функций, или их произведения. Общее количество функций, участвующих в представлении, определяется выражением  $N = n^2 + n - 1$ , где  $n$  – общее число переменных. Данный подход был положен в основу компьютерной программы, позволяющей решать задачи аппроксимации нелинейных многомерных зависимо-

стей по результатам их неупорядоченных наблюдений в отдельных точках с учетом информации об их поведении вдоль отдельных переменных.

Рассмотрим теорему Колмогорова, которая решает серию исследований для точного предпле- чия многомерных непрерывных функций.

Теорема Колмогорова. Каждая непрерывная функция  $n$  переменных, заданная на единичном кубе  $n$ -мерного пространства представима в виде

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum_{p=1}^{2^{n+1}} h_q \left| \sum_{p=1}^n \varphi_q^p(x_p) \right|, \quad (2)$$

где функции  $h_q(u)$  непрерывны, а функции  $\varphi_q^p(x_p)$ , кроме того, еще и стандартны, т.е. не зависят от выбора функции.

Таким образом, в соответствии с теоремой Колмогорова все непрерывные функции многих переменных могут быть получены из непрерывных функций одного переменного с помощью линейных операций и суперпозиции.

В частности, каждая непрерывная функция двух переменных  $x, y$  может быть представлена в виде

$$f(x, y) = \sum_{q=1}^p h_q [\varphi_q(x) + \psi_q(y)]. \quad (3)$$

До сих пор речь шла о точном представлении функций многих переменных с помощью функций одного переменного. Оказалось, что в классе непрерывных функций такое представление возможно, а в классе дифференцируемых и аналитических функций точного представления не существует. Несмотря на то, что предложенные А. Н. Колмогоровым представления имеют важное теоретическое значение и носят фундаментальный характер, функции, с помощью которых они реализуются, называют «функциями-монстрами», так как, будучи непрерывными, они ни в одной точке не дифференцируемы, и их невозможно даже представить графически.

С другой стороны, известно, что любой многочлен от многих переменных может быть получен из одного произвольного нелинейного многочлена от одного переменного с помощью линейных операций и суперпозиции [16, 17].

Но кроме вопроса о точном представлении существует еще одна задача – об аппроксимации многомерных функций совокупностью одномерных. Несомненно, что для практических нужд эта задача является гораздо более важной и интересной, так как вычисление большинства функций производится приближенно даже при наличии «точных» формул.

Приближение функций многочленами и рациональными функциями имеет историю, еще более давнюю, чем проблема точного представления. Знаменитая теорема Вейерштрасса утверждает, что непрерывную функцию нескольких переменных  $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$  на замкнутом ограниченном множестве  $Q$  можно равномерно приблизить последовательностью полиномов: для любого  $\varepsilon > 0$  существует такой многочлен  $P(x_1, x_2, \dots, x_n)$ , что

$$\text{Sup}_Q |f(x_1, x_2, \dots, x_n) - P(x_1, x_2, \dots, x_n)| < \varepsilon. \quad (4)$$

Чтобы сформулировать обобщения и усиления теоремы Вейерштрасса, необходимо перейти к несколько более абстрактному языку. Рассмотрим компактное пространство  $X$  и алгебру  $C(X)$  непрерывных функций на  $X$  с вещественными значениями.

Обобщением теоремы о возможности равномерного приближения непрерывных функций многочленами является теорема Стоуна.

### Цифровое (имитационное) моделирование печатного узла

Объектом для исследования послужило регулируемое зарядное устройство для литий-ионных и литий-полимерных аккумуляторов (рис. 4), в состав которого входит микросхема BQ24753A – это высокоэффективное синхронное зарядное устройство со встроенной компенсацией и логикой выбора системной мощности для зарядки литий-ионных и литий-полимерных аккумуляторов.

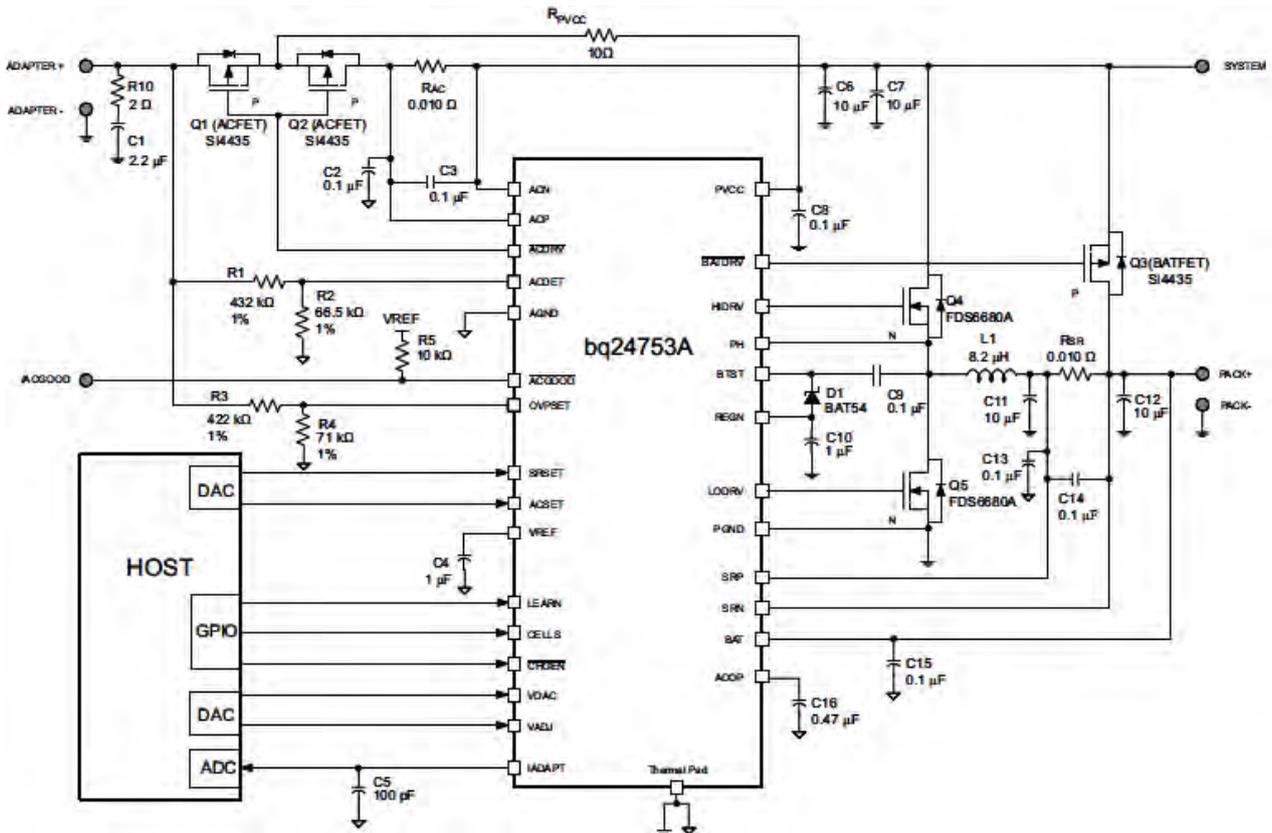


Рис. 4. Схема электрическая принципиальная регулируемого зарядного устройства для литий-ионных и литий-полимерных аккумуляторов

В схеме присутствует элемент с высокой степенью теплового излучения, требующий размещения на нем радиатора. Теплонагруженный элемент в исследуемом печатном узле имеет непосредственный контакт с поверхностью печатной платы. Габаритные размеры печатной платы имеют строго заданные значения. На этапе создания печатного узла имеем возможность корректировать расположение компонентов печатной платы и степени металлизации на различных ее участках. После создания цифровой модели печатного узла (рис. 5,а) было выявлено, что для подключения всех компонентов, согласно схеме электрической принципиальной, потребуется от двух до четырех сигнальных слоев печатной платы. Проведя численное моделирование печатного узла, было выявлено, что в процессе работы печатный узел при максимальной нагрузке рассеивает 6 Вт тепловой мощности и при установке на него радиатора охлаждения.

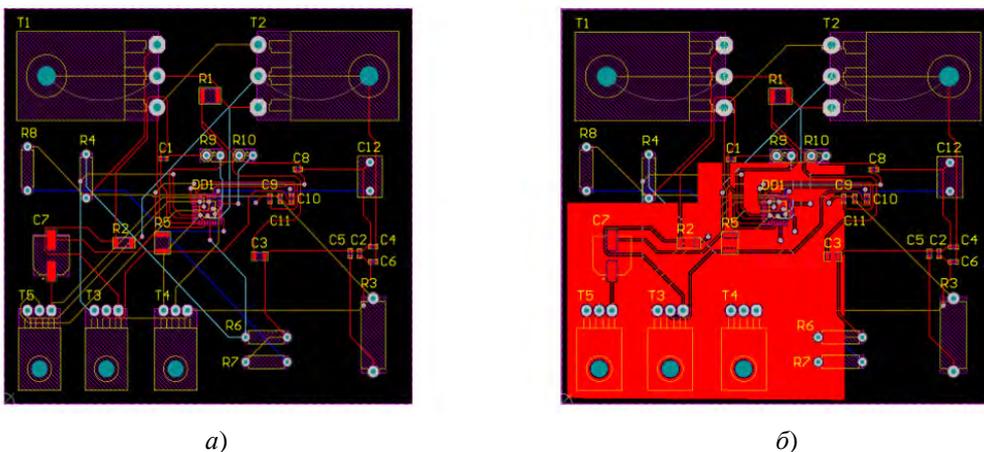


Рис. 5. Создание печатного узла с размещением на нем элементов и проведением трассировки:  
 а – печатный узел без увеличения количества металлизированных участков;  
 б – печатный узел с увеличенным количеством металлизированных участков в предполагаемом месте концентрации высоких температур

Габаритные размеры исследуемого устройства не позволяют разместить на поверхности печатного узла радиатор, в связи с этим было принято решение обеспечить отвод температуры за счет увеличения количества металлизации на данном участке (рис. 5,б).

Для подтверждения принятого решения проведем имитационное моделирование обоих вариантов реализации конструкции печатного узла. Для этого было создано два варианта цифровых (имитационных) моделей, согласно этапу 3 методики цифрового моделирования (рис. 6,а,б) [18].

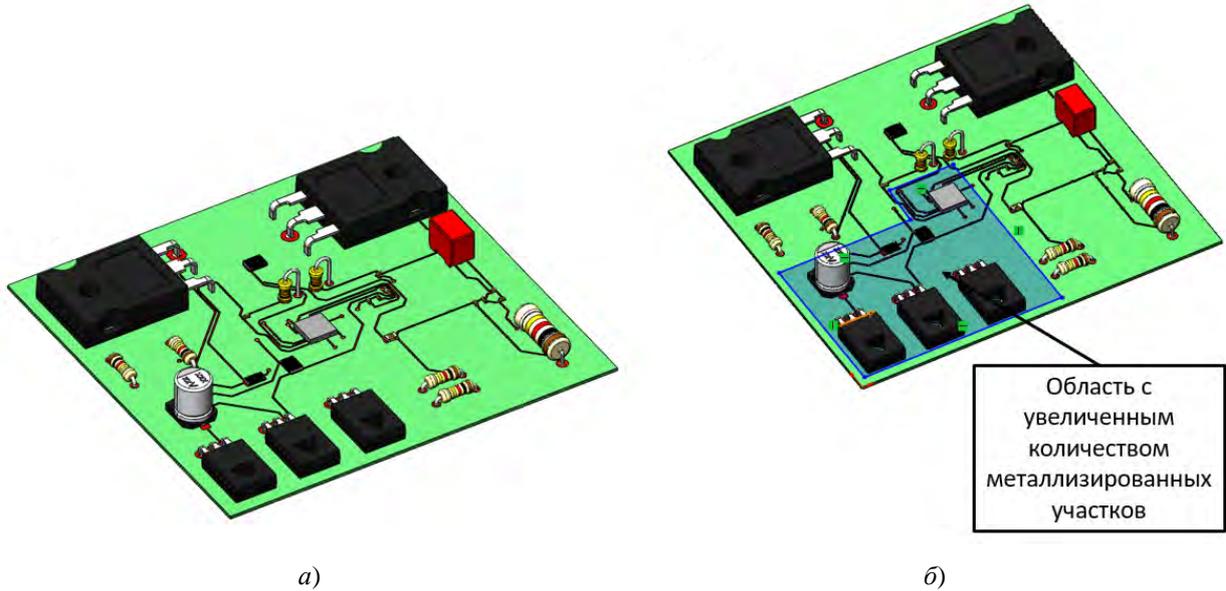


Рис. 6. Имитационная модель печатного узла регулируемого зарядного устройства для литий-ионных и литий-полимерных аккумуляторов:

а – без увеличения металлизации; б – с увеличенным количеством металлизированных участков

Граничными условиями являются задание рассеиваемой мощности с поверхности теплонагруженного элемента, начальной температуры элементов и температуры окружающей среды. В моделях учтены кондуктивный и конвективный способы теплопередачи.

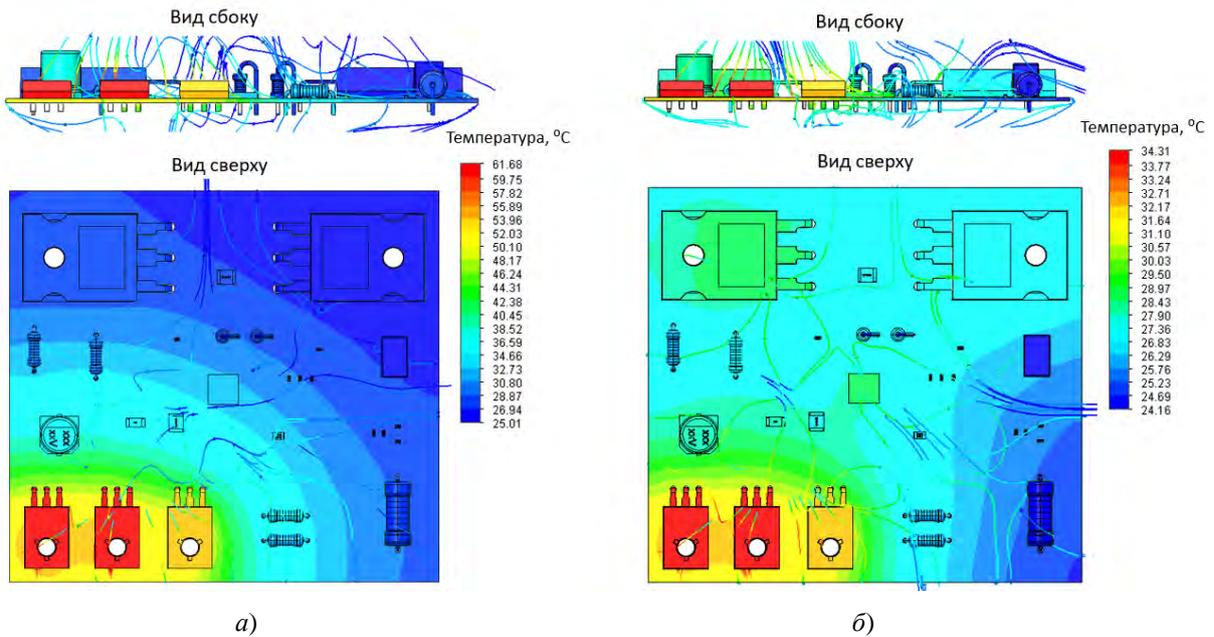


Рис. 7. Моделирование распределения температурных полей и потоков в печатном узле регулируемого зарядного устройства:  
а – распределение температурных полей без учета дополнительной металлизации;  
б – распределение температурных полей с учетом дополнительной металлизации

В результате были получены картины распределения температурных полей для двух вариантов конструкции. На рис. 7,а видно, что основной тепловой фронт сосредоточен в области тепловыделяющих элементов. Передача тепловой энергии без высокотеплопроводных медных проводников затруднительна, вследствие чего рассеивание тепловой энергии происходит с меньшей площади, а на элементе возникает локальный перегрев. В таком режиме работы устройство быстро выйдет из строя, а его надежность характеристики не обеспечат стабильной работы. Из рис. 7,б следует, применив увеличение металлизации в критической зоне перегрева, возможно обеспечить тепловой баланс и отказаться или существенно снизить габаритные размеры радиатора охлаждения. Применение данной методики позволяет сделать вывод о возможности увеличения надежных характеристик устройства, за счет дополнительного способа обеспечения нормального теплового режима.

### Заключение

Поставленная в начале исследования проблема управления температурным режимом печатного узла за счет измерения и анализа теплового режима печатного узла, учитывающая не только печатную плату и компоненты, а также влияния на ее тепловой режим топологии печатных проводников и возможности повышения показателей надежности и работоспособности, решается путем оптимального расположения не только электронных компонентов, но и характером расположения и в нашем случае увеличения количества металлизированных участков. Так же это подтверждается проведенным цифровым (имитационным) моделированием. Представленная в работе методика в большинстве случаев позволяет проводить анализ теплового режима печатных узлов в части влияния на него количества металлизированных участков как элементов системы охлаждения. Применение данной методики позволит достигнуть усовершенствования конструкции на ранних этапах проектирования, способов выявления критичных к температуре элементов и исследовать потенциально возможные технологические приемы отвода тепла, в том числе за счет металлизированных слоев печатной платы.

### Список литературы

1. Арнольд В. И. О представлении функций нескольких переменных в виде суперпозиции функций меньшего числа переменных // Математическое просвещение. 1958. № 3. С. 41–61.
2. Рыбаков И. М. Методика применения печатных проводников в качестве системы охлаждения // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2018. Т. 2. С. 48–51.
3. Маквецов Е. Н. Математические основы цифрового моделирования вибраций в радиоконструкциях // Вопросы проектирования специальных радиоэлектронных устройств / под ред. Е. Н. Маквецова. Пенза : Изд. Пенз. политехн. ин-та, 1972. Вып. 2.
4. Маквецов Е. Н. Цифровое моделирование вибраций в радиоконструкциях. М. : Сов. радио, 1976. 120 с.
5. Применение графов связей в технике / под ред. Д. Кэрнопа и Р. Розенберга ; пер. с англ. М. : Мир, 1974.
6. Маквецов Е. Н. Расчет на ЦВМ вибраций стержневых конструкций // Известия вузов. Нефть и газ. 1974. № 2.
7. Колмогоров А. Н. О представлении непрерывных функций нескольких переменных в виде суперпозиции непрерывных функций одного переменного и сложения // ДАН СССР. 1957. Т. 114, № 5. С. 953–956.
8. Голубков А. Ю. Построение внешних и внутренних функций представления непрерывных функций многих переменных суперпозицией непрерывных функций одного переменного // Фундаментальная и прикладная математика. 2002. Т. 8, № 1. С. 27–38.
9. Круглов В. В., Дли М. И., Годунов Р. Ю. Нечеткая логика и искусственные нейронные сети. М. : Физматлит, 2001. 224 с.
10. Мордашев И. М. Аппроксимация функций нескольких переменных суммой меньшего числа переменных // ДАН СССР. 1968. Т. 183, № 4. С. 778–779.
11. Пospelов В. В. О приближении функций нескольких переменных произведениями функций одного переменного. М. : Институт прикладной математики АН СССР. Препринт № 32, 1978. 72 с.
12. Шура-Бура М. Р. Аппроксимация функций многих переменных функциями, каждая из которых зависит от одного переменного // Вычислительная математика. 1957. Вып. 27. С. 3–19.
13. Терехов В. А., Ефимов Д. В., Тюкин И. Ю., Антонов В. Н. Нейросетевые системы управления. СПб. : Изд-во СПбГУ, 1999. 265 с.
14. Александрова И. М., Проурзин В. А. Метод аффинных преобразований в задаче равномерной аппроксимации функций многих переменных // Вопросы механики и процессов управления. 1995. № 18. С. 19–30.
15. Горбань А. Н. Обобщенная аппроксимационная теорема и вычислительные возможности нейронных сетей // Сибирский журнал вычислительной техники. 1998. Т. 1, № 1. С. 12–24.

16. Терехов В. А. Вейвлеты и нейронные сети : лекции для школы-семинара «Современные проблемы нейроинформатики». М. : МИФИ, 2001.
17. Рыбаков И. М. Модель теплофизического конструирования вариативного анализа сложных управляющих систем // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2019. Т. 1. С. 135–136.

### References

1. Arnol'd V.I. On the representation of functions of several variables in the form of a superposition of functions of a smaller number of variables. *Matematicheskoe prosveshchenie = Mathematical enlightenment*. 1958;(3):41–61. (In Russ.)
2. Rybakov I.M. Method of using printed conductors as a cooling system. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2018;2:48–51. (In Russ.)
3. Makvetsov E.N. Mathematical foundations of digital vibration modeling in radio structures. *Voprosy proektirovaniya spetsial'nykh radioelektronnykh ustroystv = Issues of designing special radio-electronic devices*. Penza: Izd. Penz. politekhn. in-ta, 1972;(2). (In Russ.)
4. Makvetsov E.N. *Tsifrovoye modelirovaniye vibratsiy v radiokonstruktsiyakh = Digital modeling of vibrations in radio structures*. Moscow: Sov. radio, 1976:120. (In Russ.)
5. Kernop D., Rozenberg R. (eds.). *Primeneniye grafov svyazey v tekhnike = Application of connection graphs in engineering*. Transl. from Engl. Moscow: Mir, 1974. (In Russ.)
6. Makvetsov E.N. Calculation of vibrations of rod structures on a digital computer. *Izvestiya vuzov. Neft' i gaz = News of universities. Oil and gas*. 1974;(2). (In Russ.)
7. Kolmogorov A.N. On the representation of continuous functions of several variables in the form of a superposition of continuous functions of one variable and addition. *DAN SSSR = DAN USSR*. 1957;114(5):953–956. (In Russ.)
8. Golubkov A.Yu. Construction of external and internal representation functions of continuous functions of many variables by superposition of continuous functions of one variable. *Fundamental'naya i prikladnaya matematika = Fundamental and applied Mathematics*. 2002;8(1):27–38. (In Russ.)
9. Kruglov V.V., Dli M.L., Godunov R.Yu. *Nechetkaya logika i iskusstvennyye neyronnye seti = Fuzzy logic and artificial neural networks*. Moscow: Fizmatlit, 2001:224. (In Russ.)
10. Mordashev I.M. Approximation of functions of several variables by the sum of a smaller number of variables. *DAN SSSR = DAN USSR*. 1968;183(4):778–779. (In Russ.)
11. Pospelov V.V. *O priblizhenii funktsiy neskol'kikh peremennykh proizvedeniyami funktsiy odnogo peremennogo = On the approximation of functions of several variables by products of functions of one variable*. Moscow: Institut prikladnoy matematiki AN SSSR. Preprint № 32, 1978:72. (In Russ.)
12. Shura-Bura M.R. Approximation of functions of many variables by functions, each of which depends on one variable. *Vychislitel'naya matematika = Computational Mathematics*. 1957;(27):3–19. (In Russ.)
13. Terekhov V.A., Efimov D.V., Tyukin I.Yu., Antonov V.N. *Neyrosetevyye sistemy upravleniya = Neural network control systems*. Saint Petersburg: Izd-vo SPbGU, 1999:265. (In Russ.)
14. Aleksandrova I.M., Prourzin V.A. Method of affine transformations in the problem of uniform approximation of functions of many variables. *Voprosy mekhaniki i protsessov upravleniya = Questions of mechanics and control processes*. 1995;(18):19–30. (In Russ.)
15. Gorban' A.N. Generalized approximation theorem and computational capabilities of neural networks. *Sibirskiy zhurnal vychislitel'noy tekhniki = Siberian Journal of Computer Engineering*. 1998;1(1):12–24. (In Russ.)
16. Terekhov V.A. *Veyvlety i neyronnye seti: lektzii dlya shkoly-seminara «Sovremennyye problemy neyroinformatiki» = Wavelets and neural networks : lectures for the school-seminar "Modern problems of neuroinformatics"*. Moscow: MIFI, 2001. (In Russ.)
17. Rybakov I.M. Model of thermophysical design of variative analysis of complex control systems. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and quality*. 2019;1:135–136. (In Russ.)

### Информация об авторах / Information about the authors

#### Бауржан Жолдыбаевич Куатов

доктор PhD, доцент,  
заместитель начальника по учебной и научной работе,  
Военный институт Сил воздушной обороны  
Республики Казахстан имени Т. Я. Бегельдинова  
(Казахстан, г. Актобе, пр. А. Молдагуловой, 16)  
E-mail: kuatov.baurjan@mail.ru

#### Baurzhan Zh. Kuatov

PhD, associate professor,  
deputy chief for academic and scientific works,  
Air Defense Forces of the Military Institute  
of the Republic of Kazakhstan  
(16 A. Moldagulova avenue, Aktobe, Kazakhstan)

**Илья Михайлович Рыбаков**

кандидат технических наук,  
доцент кафедры конструирования  
и производства радиоаппаратуры,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: rybakov\_im@mail.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

**Ilya M. Rybakov**

Candidate of technical sciences,  
associate professor of the 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 the sub-department  
of radio equipment design and production,  
Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /  
The authors declare no conflicts of interests.**

**Поступила в редакцию/Received 27.09. 2021**

**Поступила после рецензирования/Revised 10.10.2021**

**Принята к публикации/Accepted 10.11.2021**

## АЛЬБОМ ИЗ ДЕВЯТИ КЛАССИЧЕСКИХ СТАТИСТИЧЕСКИХ КРИТЕРИЕВ ДЛЯ ПРОВЕРКИ ГИПОТЕЗЫ НОРМАЛЬНОГО ИЛИ РАВНОМЕРНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДАННЫХ МАЛЫХ ВЫБОРОК

А. П. Иванов<sup>1</sup>, А. И. Иванов<sup>2</sup>, А. Ю. Малыгин<sup>3</sup>, А. В. Безяев<sup>4</sup>,  
Е. Н. Куприянов<sup>5</sup>, А. Г. Банных<sup>6</sup>, К. А. Перфилов<sup>7</sup>, В. С. Лукин<sup>8</sup>,  
К. Н. Савинов<sup>9</sup>, С. А. Полковникова<sup>10</sup>, Ю. И. Серикова<sup>11</sup>

<sup>1, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11</sup> Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

<sup>2</sup> Пензенский научно-исследовательский электротехнический институт, Пенза, Россия

<sup>1</sup> ap\_ivanov@pnzgu.ru, <sup>2</sup> ivan@pniei.penza.ru, <sup>3</sup> mal890@yandex.ru,  
<sup>4, 5, 6, 7, 9</sup> tsib@pnzgu.ru, <sup>8</sup> ibst@pnzgu.ru, <sup>10, 11</sup> vt@pnzgu.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Рассматривается проблема параллельного использования множества статистических критериев, ориентированных на проверку той или иной статистической гипотезы. *Материалы и методы.* Как правило, на малых выборках в 16 опытов статистические критерии дают высокое значение вероятностей ошибок первого и второго рода. Однако если каждому из статистических критериев построить эквивалентный искусственный нейрон и объединить их в большую сеть искусственных нейронов, то мы получим длинный код с высокой избыточностью. Свертывание избыточности таких кодов позволяет корректировать ошибки некоторых статистических критериев. *Результаты.* Приведены функциональные зависимости и пороги, используемые при программной реализации девяти базовых критериев или эквивалентных им искусственных нейронов. *Выводы.* В логарифмическом масштабе вероятностей ошибок первого и второго рода по каждому критерию и в логарифмическом масштабе числа обобщаемых нейросетью критериев самокорректирующийся код исправления ошибок «голосованием по большинству состояний разрядов» хорошо описывается линейной функцией.

**Ключевые слова:** классические и новые статистические критерии, искусственные нейроны эквивалентные статистическим критериям, параллельный статистический анализ малых выборок, корректировка ошибок выходного кода нейросети

**Для цитирования:** Иванов А. П., Иванов А. И., Малыгин А. Ю., Безяев А. В., Куприянов Е. Н., Банных А. Г., Перфилов К. А., Лукин В. С., Савинов К. Н., Полковникова С. А., Серикова Ю. И. Альбом из девяти классических статистических критериев для проверки гипотезы нормального или равномерного распределения данных малых выборок // Надежность и качество сложных систем. 2022. № 1. С. 20–29. doi:10.21685/2307-4205-2022-1-3

## AN ALBUM OF NINE CLASSICAL STATISTICAL CRITERIA FOR TESTING THE HYPOTHESIS OF NORMAL OR UNIFORM DISTRIBUTION OF DATA IN SMALL SAMPLES

A.P. Ivanov<sup>1</sup>, A.I. Ivanov<sup>2</sup>, A. Yu. Malygin<sup>3</sup>, A.V. Bezyaev<sup>4</sup>,  
E.N. Kupriyanov<sup>5</sup>, A.G. Bannykh<sup>6</sup>, K.A. Perfilov<sup>7</sup>,  
V.S. Lukin<sup>8</sup>, K.N. Savinov<sup>9</sup>, S.A. Polkovnikova<sup>10</sup>, Yu.I. Serikova<sup>11</sup>

<sup>1, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11</sup> Penza State University, Penza, Russia

<sup>2</sup> Penza Research Institute of Electrical Engineering, Penza, Russia

<sup>1</sup> ap\_ivanov@pnzgu.ru, <sup>2</sup> ivan@pniei.penza.ru, <sup>3</sup> mal890@yandex.ru,  
<sup>4, 5, 6, 7, 9</sup> tsib@pnzgu.ru, <sup>8</sup> ibst@pnzgu.ru, <sup>10, 11</sup> vt@pnzgu.ru

**Abstract.** *Background.* The problem of parallel use of a set of statistical criteria aimed at testing one or another statistical hypothesis is considered. *Materials and methods.* As a rule, on small samples of 16 experiments, statistical tests give a high value of the probabilities of errors of the first and second kind. However, if we build an equivalent artificial neuron for each of the statistical criteria and combine them into a large network of artificial neurons, then we will get a long code with high redundancy. The reduction of the redundancy of such codes makes it possible to correct the errors of some statistical tests. *Results.* The paper presents functional dependencies and thresholds used in the software implementation of 9 basic criteria or artificial neurons equivalent to them. *Conclusions.* On the logarithmic scale of the probabilities of errors of the first and second kind for each criterion and on the logarithmic scale of the

number of criteria generalized by the neural network, the self-correcting error correction code “by voting on the majority of bit states” is well described by a linear function.

**Keywords:** classical and new statistical criteria, artificial neurons equivalent to statistical criteria, parallel statistical analysis of small samples, error correction of the neural network output code

**For citation:** Ivanov A.P., Ivanov A.I., Malygin A.Yu., Bezyaev A.V., Kupriyanov E.N., Bannykh A.G., Perfilov K.A., Lukin V.S., Savinov K.N., Polkovnikova S.A., Serikova Yu.I. An album of nine classical statistical criteria for testing the hypothesis of normal or uniform distribution of data in small samples. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2022;(1):20–29. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2022-1-3

**Классические статистические критерии, созданные в XX в.**

В начале XX в. в 1900 г. Пирсон создал хи-квадрат критерий [1], во многом определивший идеологию развития математической статистики<sup>1</sup>. К сожалению, хи-квадрат критерий плохо работает при малых выборках в 16 опытов. Ниже на рис. 1 приведена программа, соответствующая нейросетевому эквиваленту хи-квадрат критерия Пирсона и даны плотности распределения значений его выходных состояний.

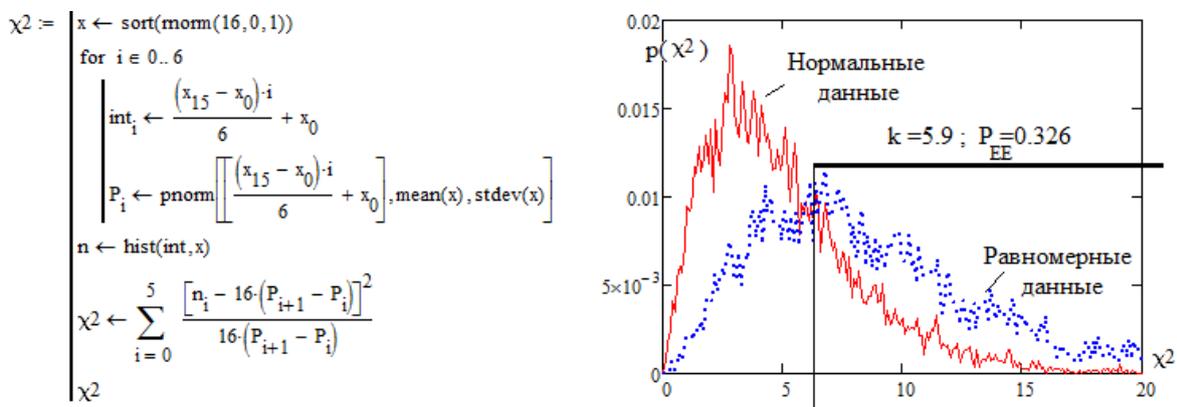


Рис. 1. Программная реализация хи-квадрат нейрона на языке MathCAD и графики его выходных состояний

В случае если порог выходного квантователя хи-квадрат нейрона принять  $k = 5,9$ , то возникает ситуация совпадения ошибок первого и второго рода  $P_1 \approx P_2 \approx P_{EE} \approx 0,326$ , что не позволяет в одиночку использовать этот статистический критерий на практике.

После критерия Пирсона был создан ряд иных параметрических критериев, широко применяемых на практике<sup>2</sup>. В частности, в 1928 г. был создан статистический критерий Крамера – фон Мизеса (KfM) [1]. Фрагмент его программной реализации и соответствующие плотности распределения состояний нейрона KfM иллюстрируются рис. 2.

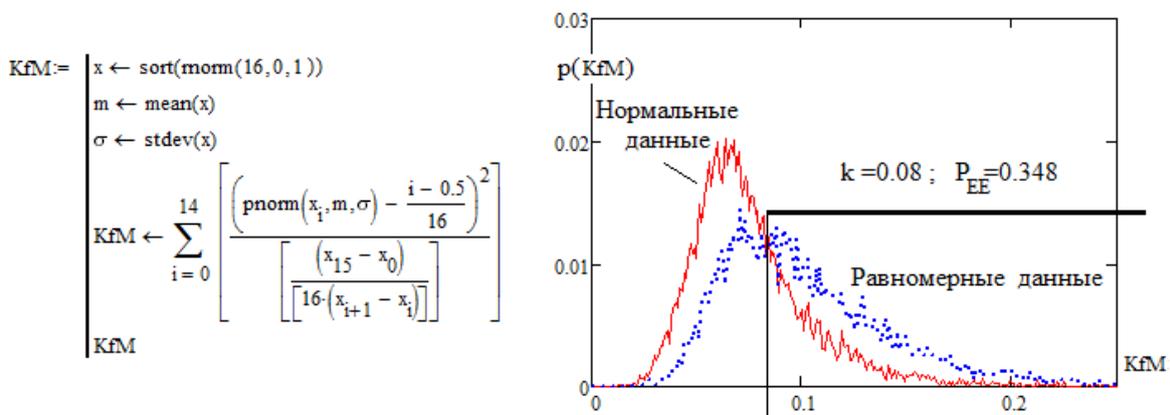


Рис. 2. Нейрон эквивалентный критерию Крамера – фон Мизеса

<sup>1</sup> Р 50.1.037-2002 Рекомендации по стандартизации. Прикладная статистика. Правила проверки согласия опытного распределения с теоретическим. Часть I. Критерии типа  $\chi^2$ .

<sup>2</sup> Р 50.1.037-2002 Прикладная статистика. Правила проверки согласия опытного распределения с теоретическим. Часть II. Непараметрические критерии.

Из рис. 2 видно, что нейрон KfM по вероятностям ошибок первого и второго рода примерно на 7 % оказывается хуже нейрона хи-квадрат критерия Пирсона (рис. 1). Улучшить этот показатель удалось только в 1936 г. в результате соответствующей модификации статистического критерия Смирнова [1, 2]. Модифицированный критерий Смирнова – Крамера – фон Мизеса (SKfM) иллюстрируется данными рис. 3.

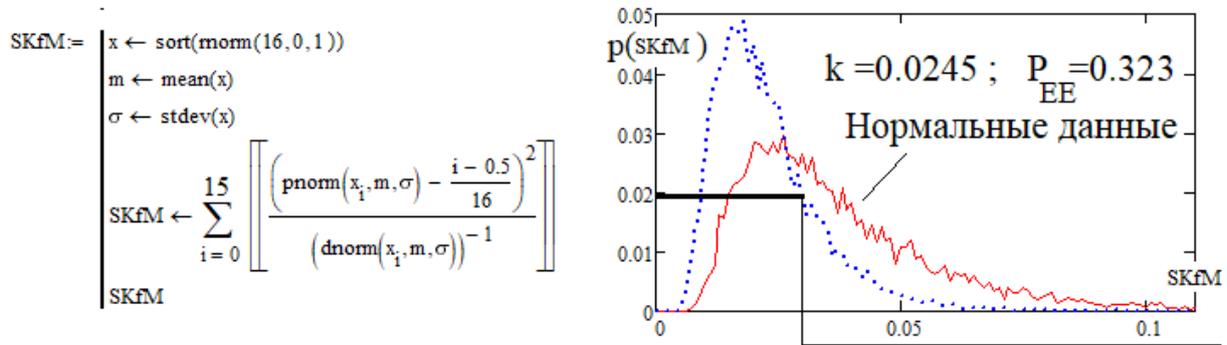


Рис. 3. Нейрон эквивалентный критерию Смирнова – Крамера – фон Мизеса

Следующий значимый шаг в развитии теории был сделан Андерсоном и Дарлингом в 1952 г. [1, 3]. Программная реализация искусственного нейрона Андерсона – Дарлинга (AD) и статистики его выходных состояний для малых выборок с нормальным и равномерным распределением данных отображена на рис. 4.

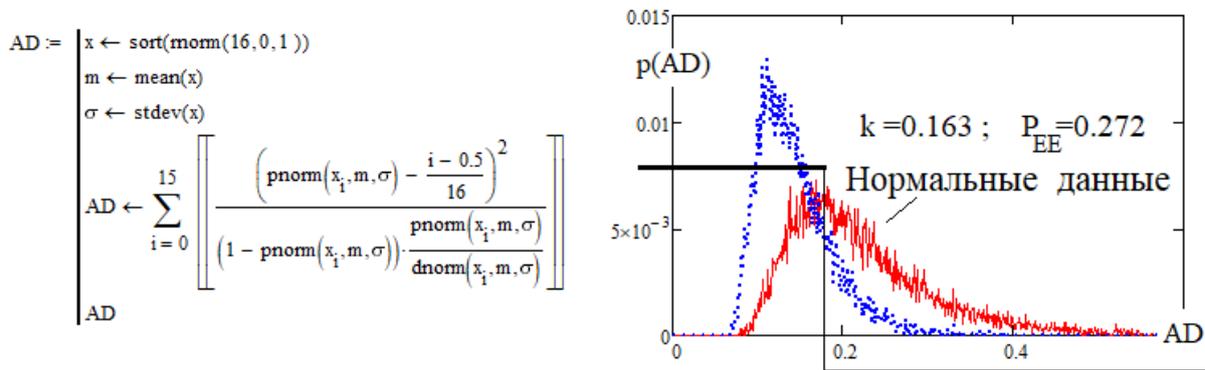


Рис. 4. Нейрон эквивалентный статистическому критерию Андерсона – Дарлинга

Через два года Дэвид, Хартли и Пирсон показали возможность применения критерия, построенного на учете размаха данных, нормированного стандартным отклонением [1, 4].

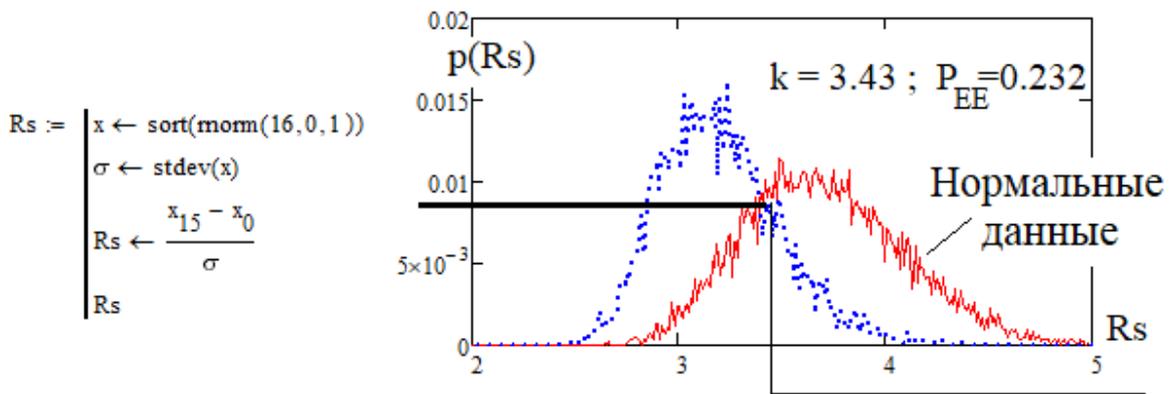


Рис. 5. Нейрон эквивалентный статистическому критерию нормированного размаха

Заметный вклад в исследования внесли Шапиро и Уилк, опубликовавшие свой вариант критерия в 1965 г. [1, 5].

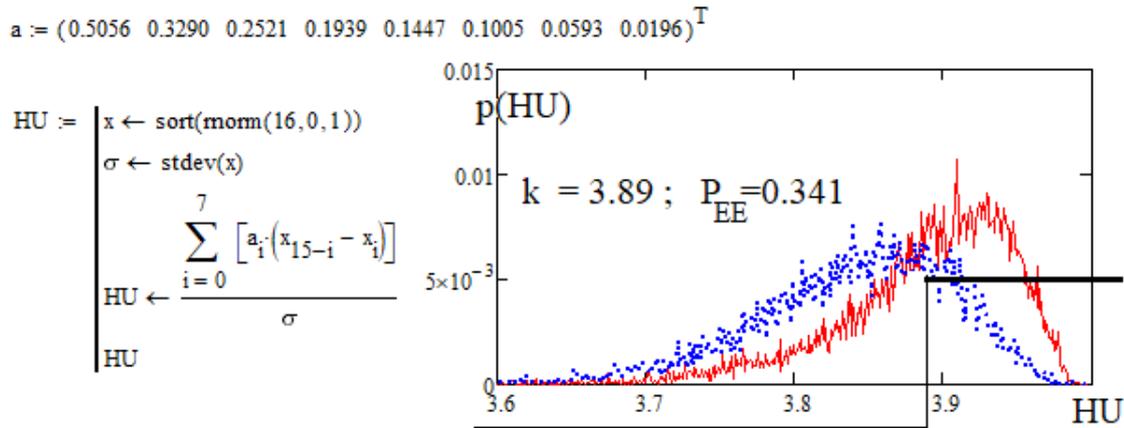


Рис. 6. Нейрон эквивалентный статистическому критерию Шапиро – Уилка

Одной из лучших математических конструкций, синтезированных в прошлом веке, оказался критерий Васичека [1, 6].

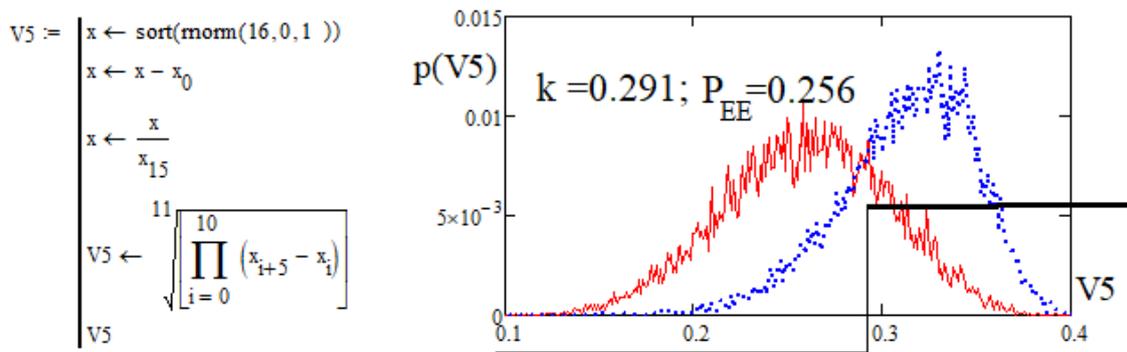


Рис. 7. Нейрон эквивалентный статистическому критерию Васичека 1976 г.

Исследования, выполненные Фроцини в 1978 г., показали, что численное моделирование критерия Андерсона – Дарлинга может быть упрощено. При этом наблюдается даже некоторый рост мощности упрощенного критерия Фроцини (Fr) [1, 7].

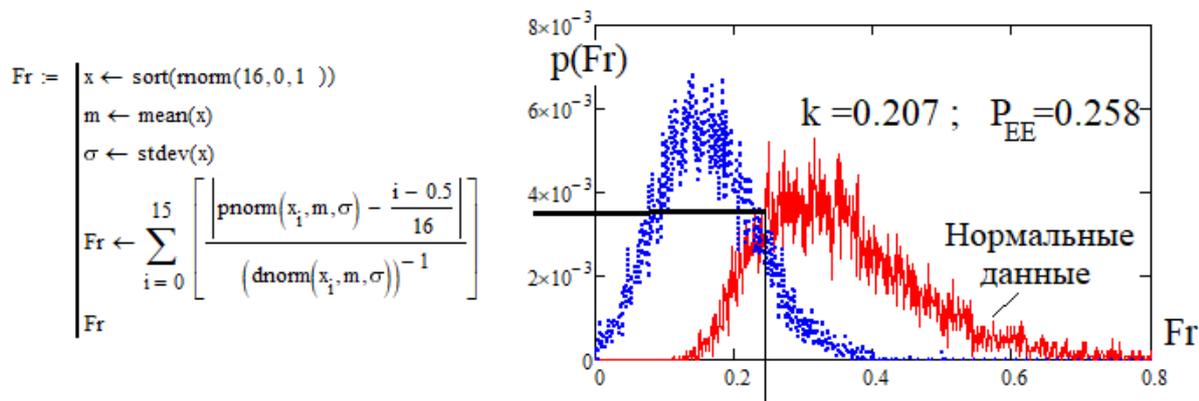


Рис. 8. Нейрон эквивалентный статистическому критерию Фроцини

При решении задачи разделения малых выборок нормально и равномерно распределенных данных хорошие результаты дает критерий четвертого статистического момента, что было показано Анскомбе и Глумом в 1983 г. [1, 8].

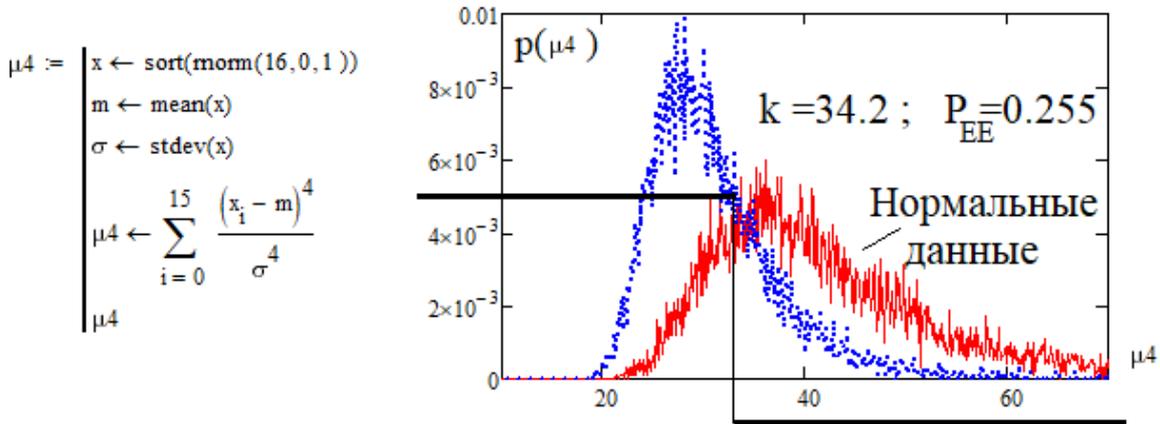


Рис. 9. Нейрон эквивалентный статистическому критерию четвертого статистического момента

### Нейросетевое объединение для совместного использования деяти классических статистических критериев

Таким образом, мы получили коллекцию из девяти статистических критериев [9, 10]. Использование каждого из этих статистических критериев отдельно не дает хороших результатов при анализе малых выборок в 16 опытов. В связи с этим нейроны должны быть объединены в одну нейросеть с 16 входами и 9 выходами, как это отображено на рис. 10.

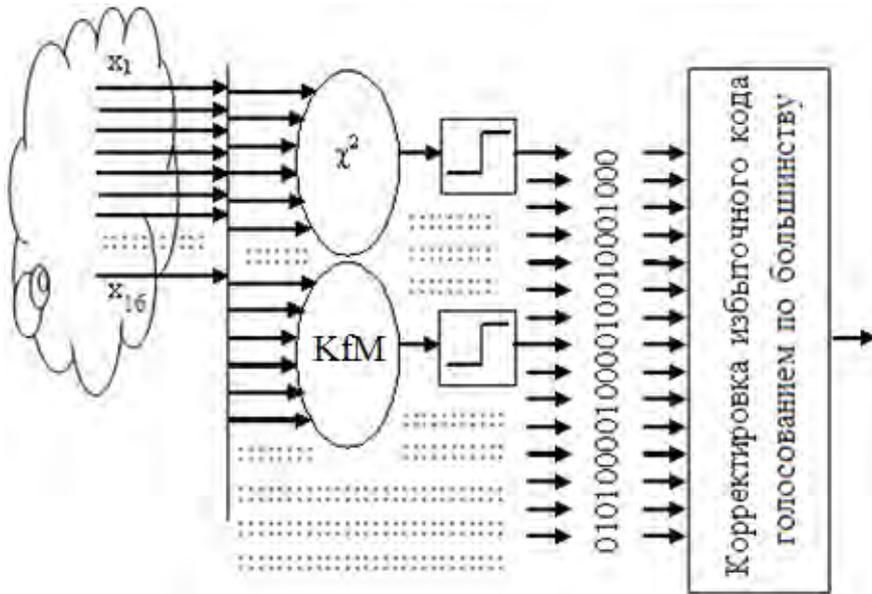


Рис. 10. Параллельная обработка малой выборки в 16 опытов несколькими искусственными нейронами эквивалентными хи-квадрат критерию и иным известным статистическим критериям

В случае, если все отклики нейронов окажутся нулевыми «00000000», мы с высокой вероятностью делаем вывод об обнаружении выборки входных данных с нормальным распределением. Обратная ситуация кода со всеми единицами «11111111» будет свидетельствовать об обнаружении входной выборки с равномерным распределением данных.

В ситуации, когда в разрядах кода присутствуют оба состояния «001001001», свертывание кода происходит по большинству наблюдаемых разрядов. Эффективность самокорректирующихся кодов зависит от корреляционных связей между разрядами. Если корреляционные связи отсутствуют, то состояние «00000000» будет свидетельствовать об обнаружении нормальных данных с доверительной вероятностью 0,996. По мере роста корреляционных связей между разрядами кода доверительная вероятность принятия решений падает. Реальные корреляционные связи между разрядами кода отражены в табл. 1.

Вероятности ошибок и коэффициенты парной корреляции  
между классическими статистическими критериями

$P_1 = P_2 = P_{EE}$	Для малой выборки в 16 опытов									
		1900	1928	1936	1952	1954	1965	1976	1978	1984
	$\chi^2$	KfM	SKfM	AD	Rs	HU	V5	Fr	$\mu_4$	
0.326	$\chi^2$	1	0.562	0.352	0.466	-0.402	-0.678	0.184	0.248	-0.087
0.348	KfM		1	0.485	0.581	-0.339	-0.662	0.088	0.402	-0.08
0.323	SKfM			1	0.951	0.015	-0.502	-0.212	0.931	0.19
0.272	AD				1	-0.102	-0.597	-0.12	0.917	0.113
0.232	Rs					1	0.141	-0.919	0.064	0.829
0.341	HU						1	0.146	-0.374	-0.355
0.256	V5							1	-0.21	-0.876
0.258	Fr								1	0.195
0.255	$\mu_4$									1

Учет влияния корреляционных связей и вероятностей ошибок в каждом разряде выполняется через процедуры симметризации задачи. Для этой цели от девяти вероятностей ошибок первого и второго рода следует перейти к их среднему геометрическому

$$\sqrt[9]{0,326 \cdot 0,348 \cdot 0,323 \cdot 0,272 \cdot 0,232 \cdot 0,341 \cdot 0,256 \cdot 0,258 \cdot 0,255} = 0,287.$$

Если бы корреляционные связи отсутствовали, то 9-кратная избыточность кода должна приводить к снижению вероятности ошибок примерно в три раза до величины 0,096. Для учета влияния реальных корреляционных связей необходимо вычислить средний модуль коэффициентов парных корреляций. В нашем случае он составит  $E(|r|) = 0,399$  [3]. Из-за того, что получаем очень высокие средние значения модулей коэффициентов корреляции, то вместо предполагаемого трехкратного снижения вероятностей ошибок наблюдается только их 33 % снижение; причем вероятность среднего геометрического снижается с величины 0,287 до вероятности 0,216. Это всего на 7 % лучше по сравнению с вероятностью ошибок самого мощного критерия нормированного размаха –Rs. Выгоднее использовать только 3 или 5 самых мощных статистических критериев. Самые слабые критерии с высокими вероятностями ошибок целесообразно отбросить, уменьшая тем самым среднее геометрическое.

Для нас интересна ситуация нейросетевого объединения как можно большего числа статистических критериев. В логарифмическом масштабе вероятностей ошибок первого и второго рода по каждому критерию и в логарифмическом масштабе числа обобщаемых нейросетью критериев самокорректирующийся код исправления ошибок хорошо описывается линейной функцией. Эта ситуация отображена на рис. 11.

Из рис. 11 видно, что при высокой коррелированности данных реальных классических статистических критериев  $r = 0,4$  для снижения вероятности ошибок в три раза потребуется применение порядка 1000 статистических критериев. Если же коэффициенты корреляции удастся снизить в 4 раза до значения  $r = 0,1$ , то уже при использовании 800 статистических критериев вероятности ошибок снижается до приемлемой для практики величины  $P_1 \approx P_2 \approx P_{EE} \approx 0,02$ .

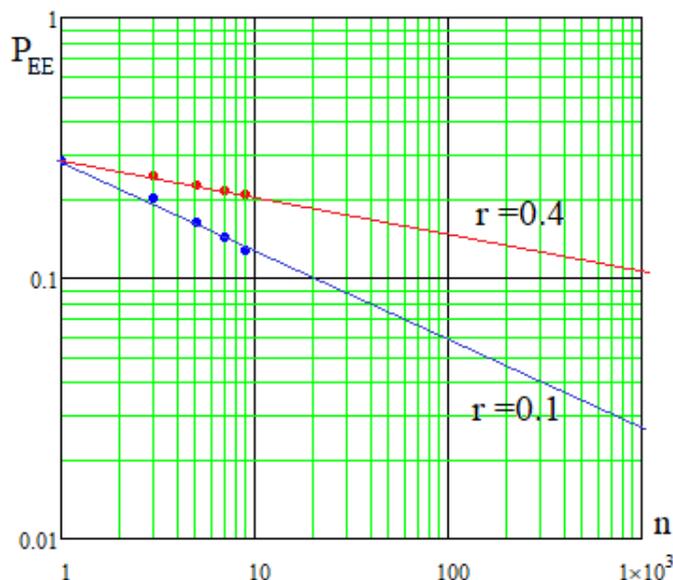


Рис. 11. Линейный прогноз вероятностей ошибок с ростом числа используемых статистических критериев при разных значениях симметричных корреляционных связей между разрядами выходного кода

В прошлом веке было создано порядка 200 различных статистических критериев [1], естественно, что часть из них может быть использована через нейросетевое объединение. Кроме того, уже в этом веке созданы примерно 30 новых статистических критериев [11–13]. Новые и старые критерии могут быть совместно использованы по схеме объединения рис. 10. Естественно, что простейшие коды, исправляющие ошибки «голосованием по большинству», малоэффективны. Необходимо использовать более сложные кодовые конструкции [14]. В этом случае увеличивается наклон экстраполирующих прямых. Более эффективные коды свертывания избыточности [14] должны давать приемлемые для практики результаты при нейросетевом объединении двух-трех десятков наиболее эффективных статистических критериев.

### Список литературы

1. Кобзарь А. И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. М. : Физматлит, 2006. 816 с.
2. Смирнов Н. В. О распределении  $\rho^2$ -критерия Мизеса // Математический сборник. 1937. Т. 2, № 5. С. 973–993.
3. Anderson T. W., Darling D. A. A test for goodness-of-fit // Journal of the American Statistical Association. 1954. Vol. 49. P. 765–769.
4. David H. A., Hartley H. O., Pearson E. S. The distribution of the ration, in signal normal sample // Biometrika. 1954. Vol. 41. P. 482–493.
5. Shapiro S. S., Wilk M. V. An analysis of variance test for normality (complete samples) // Biometrika. 1965. Vol. 52. № 3. P. 591–611.
6. Vasicek O. A test for normality based on sample entropy // Journal of the Royal Statistical Society. 1976. Vol. 38, № 1. P. 54–59.
7. Frozini B. V. A survey of class of goodness-of-fit statistics // Metron. 1978. Vol. 36. № 1-2. P. 3–49.
8. Anscombe F. J., Glynn W. J. Distribution of the kurtosis  $b_2$  for normal samples // Biometrika. 1983. Vol. 70, № 1. P. 227–234.
9. Иванов А. П., Иванов А. И., Безяев А. В. Альбом статистических критериев, ориентированных на совместное использование при проверке гипотезы нормального или равномерного распределения данных малых выборок : препринт. 2022. 22 с. doi: 10.13140/RG.2.2.15891.76324. URL: <https://www.researchgate.net/publication/358280741>
10. 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. doi:10.21683/1729-2646-2020-20-2-28-34
11. Иванов А. И., Банных А. Г., Куприянов Е. Н. [и др.]. Коллекция искусственных нейронов эквивалентных статистическим критериям для их совместного применения при проверке гипотезы нормальности малых выборок биометрических данных // Безопасность информационных технологий : сб. науч. ст. по материалам I Всерос. науч.-техн. конф. (г. Пенза, 24 апреля 2019 г.). Пенза, 2019. С. 156–164.

12. Волчихин В. И., Иванов А. И., Иванов А. П., Лукин В. С. Расширение номенклатуры семейства критериев среднего гармонического полиномами Эрмита при проверке гипотезы нормального распределения малых выборок биометрических данных // Динамика систем, механизмов и машин. 2021. Т. 9, № 4. doi: 10.25206/2310-9793-9-4-3-11
13. Иванов А. И., Малыгин А. Ю., Полковникова С. А. Новый статистический критерий большой мощности, полученный дифференцированием случайных данных малой выборки // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2021. № 3. С. 67–74. doi:10.21685/2072-3059-2021-3-7
14. Безяев А. В. Биометрико-нейросетевая аутентификация: обнаружение и исправление ошибок в длинных кодах без накладных расходов на избыточность : препринт. Пенза : Изд-во ПГУ, 2020. 40 с.

### References

1. Kobzar' A.I. *Prikladnaya matematicheskaya statistika. Dlya inzhenerov i nauchnykh rabotnikov = Applied mathematical statistics. For engineers and researchers*. Moscow: Fizmatlit, 2006:816. (In Russ.)
2. Smirnov N.V. On the distribution of the  $\omega^2$ -criterion of Mises. *Matematicheskii sbornik = Mathematical Collection*. 1937;2(5):973–993. (In Russ.)
3. Anderson T.W., Darling D.A. A test for goodness-of-fit. *Journal of the American Statistical Association*. 1954;49:765–769.
4. David H.A., Hartley H.O., Pearson E.S. The distribution of the ration, in signal normal sample. *Biometrika*. 1954;41:482–493.
5. Shapiro S.S., Wilk M.V. An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika*. 1965;52(3):591–611.
6. Vasicek O. A test for normality based on sample entropy. *Journal of the Royal Statistical Society*. 1976;38(1):54–59.
7. Frozini B.V. A survey of class of goodness-of-fit statistics. *Metron*. 1978;36(1-2):3–49.
8. Anscombe F.J., Glynn W.J. Distribution of the kurtosis  $b_2$  for normal samples. *Biometrika*. 1983;70(1):227–234.
9. Ivanov A.P., Ivanov A.I., Bezyaev A.V. *Al'bom statisticheskikh kriteriev, orientirovannykh na sovmestnoe ispol'zovanie pri proverke gipotezy normal'nogo ili ravnomernogo raspredeleniya dannykh malykh vyborok: preprint = Album of statistical criteria focused on joint use when testing the hypothesis of normal or uniform distribution of small sample data : preprint*. 2022:22. (In Russ.). doi:10.13140/RG.2.2.15891.76324. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/358280741>
10. Ivanov A.I., Bannykh A.G., Serikova Yu.I. Accounting for the influence of correlations through their modulus averaging in neural network generalization of statistical criteria for small samples. *Nadezhnost' = Reliability*. 2020;(20):28–34. (In Russ.). doi:10.21683/1729-2646-2020-20-2-28-34
11. Ivanov A.I., Bannykh A.G., Kupriyanov E.N. [et al.]. Collection of artificial neurons equivalent to statistical criteria for their joint application when testing the hypothesis of normality of small samples of biometric data. *Bezopasnost' informatsionnykh tekhnologiy: sb. nauch. st. po materialam I Vseros. nauch.-tekhn. konf. (g. Penza, 24 aprelya 2019 g.) = Information technology security : collection of scientific articles based on the materials of I All-Russian Scientific-technical. conf. (Penza, April 24, 2019)*. Penza, 2019:156–164. (In Russ.)
12. Volchikhin V.I., Ivanov A.I., Ivanov A.P., Lukin V.S. Expansion of the nomenclature of the family of criteria for the average harmonic Hermite polynomials when testing the hypothesis of the normal distribution of small samples of biometric data. *Dinamika sistem, mekhanizmov i mashin = Dynamics of systems, mechanisms and machines*. 2021;9(4). (In Russ.). doi:10.25206/2310-9793-9-4-3-11
13. Ivanov A.I., Malygin A.Yu., Polkovnikova S.A. A new statistical criterion of high power obtained by differentiating random data of a small sample. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = Izvestia of higher educational institutions. Volga region. Technical sciences*. 2021;(3):67–74. (In Russ.). doi:10.21685/2072-3059-2021-3-7
14. Bezyaev A.V. *Biometriko-neyrosetevaya autentifikatsiya: obnaruzhenie i ispravlenie oshibok v dlinnykh kodakh bez nakladnykh raskhodov na izbytochnost': preprint = Biometric-neural network authentication: detection and correction of errors in long codes without redundancy overhead : preprint*. Penza: Izd-vo PGU, 2020:40. (In Russ.)

### Информация об авторах / Information about the authors

#### Алексей Петрович Иванов

кандидат технических наук, доцент,  
заведующий кафедрой технических средств  
информационной безопасности,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: ap\_ivanov@pnzgu.ru

#### Aleksey P. Ivanov

Candidate of technical sciences, associate professor,  
head of the sub-department of technical means  
of information security,  
Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Александр Иванович Иванов**

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

**Александр Юрьевич Малыгин**

доктор технических наук, профессор,  
начальник межотраслевой лаборатории тестирования  
биометрических устройств и технологий,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: mal890@yandex.ru

**Александр Викторович Безяев**

кандидат технических наук, докторант,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: tsib@pnzgu.ru

**Евгений Николаевич Куприянов**

аспирант,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: evgnkupr@gmail.com

**Андрей Григорьевич Банных**

аспирант,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: tsib@pnzgu.ru

**Константин Александрович Перфилов**

аспирант,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: tsib@pnzgu.ru

**Виталий Сергеевич Лукин**

младший научный сотрудник,  
Региональный учебно-научный центр  
«Информационная безопасность»,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: ibst@pnzgu.ru

**Константин Николаевич Савинов**

старший преподаватель,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: tsib@pnzgu.ru

**Aleksandr I. Ivanov**

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

**Aleksandr Yu. Malygin**

Doctor of technical sciences, professor,  
head of the Intersectoral testing laboratory  
of biometric devices and technologies,  
Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Aleksandr V. Bezyaev**

Candidate of technical sciences,  
doctor's degree student,  
Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Evgeniy N. Kupriyanov**

Postgraduate student,  
Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Andrey G. Bannykh**

Postgraduate student,  
Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Konstantin A. Perfilov**

Postgraduate student,  
Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Vitaliy S. Lukin**

Junior researcher,  
Regional Training and Research Center  
"Information Security",  
Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Konstantin N. Savinov**

Senior lecturer,  
Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Светлана Андреевна Полковникова**

аспирант,

Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: vt@pnzgu.ru

**Svetlana A. Polkovnikova**

Postgraduate student,

Penza State University

(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Юлия Игоревна Серикова**

аспирант,

Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, Красная, 40)

E-mail: vt@pnzgu.ru

**Yuliya I. Serikova**

Postgraduate student,

Penza State University

(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /**

**The authors declare no conflicts of interests.**

**Поступила в редакцию/Received 15.12.2021**

**Поступила после рецензирования/Revised 10.01.2022**

**Принята к публикации/Accepted 15.02.2022**

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИНЕРЦИОННОГО ВКЛЮЧАТЕЛЯ

В. Н. Китаев<sup>1</sup>, Р. Л. Афанасьев<sup>2</sup>, М. В. Петров<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени академика Е. И. Забабахина, Снежинск, Челябинская область, Россия  
<sup>1,2,3</sup> kb2@vniitf.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Инерционные включатели используются в беспилотных летательных аппаратах для коммутации электрических цепей их систем. Срабатывание подобных приборов происходит в основном при наборе интеграла линейного ускорения, с которым аппарат перемещается в пространстве. *Материалы и методы.* Для интегрирования линейного ускорения традиционно используются магнитоиндукционные и гидравлические демпферы. В ряде случаев гидравлические демпферы как упрощающие конструкции инерционных включателей более предпочтительны. *Результаты и выводы.* В работе представлены результаты разработки математической модели инерционного включателя – составленные дифференциальные уравнения, описывающие движения подвижных конструктивных элементов, а также условия начала движения. Разработана математическая модель, позволяющая получать расчетные оценки параметров функционирования и срабатывания инерционного включателя.

**Ключевые слова:** инерционный включатель, гидравлический демпфер, магнитная система, инерционное тело, контактная система, математическая модель, дифференциальные уравнения

**Для цитирования:** Китаев В. Н., Афанасьев Р. Л., Петров М. В. Математическая модель инерционного включателя // Надежность и качество сложных систем. 2022. № 1. С. 30–40. doi:10.21685/2307-4205-2022-1-4

## MATHEMATICAL MODEL OF A THRESHOLD INERTIA SWITCH

V.N. Kitaev, R.L. Afanasyev, M.V. Petrov

<sup>1,2,3</sup> Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Scientific Research Institute of Technical Physics named after Academician E.I. Zababakhin, Snezhinsk, Chelyabinsk region, Russia  
<sup>1,2,3</sup> kb2@vniitf.ru

**Abstract.** *Background.* Inertia switches serve in pilotless vehicles for electrical switching. The switches triggering takes place generally when reached the integral of linear acceleration at which the vehicle travels in the space. *Materials and methods.* For integration of the linear acceleration both magnetic and hydraulic dampers are customary used. In several cases hydraulic dampers are more suitable in the view of inertia switchers design simplification. *Results and conclusions.* The work presents the results of developed mathematical model of the inertia switch: formulated differential equations describing movement of mobile design elements and motion start conditions, as well. A mathematical model is worked up to estimate the parameters of both functioning and triggering the inertia switch.

**Keywords:** inertia switch, hydraulic damper, magnetic system, inertia body, contact system, mathematical model, differential equation

**For citation:** Kitaev V.N., Afanasyev R.L., Petrov M.V. Mathematical model of a threshold inertia switch. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2022;(1):30–40. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2022-1-4

### Введение

При выполнении опытно-конструкторских работ по разработке электромеханических приборов для беспилотных летательных аппаратов целесообразно создание математических моделей приборов, позволяющих уже на начальных стадиях разработки оптимизировать технические решения, заложенные в их конструкции.

В работе представлены результаты разработки математической модели порогового инерционного прибора.

Конструкция прибора в исходном состоянии показана на рис. 1 (продольный разрез).

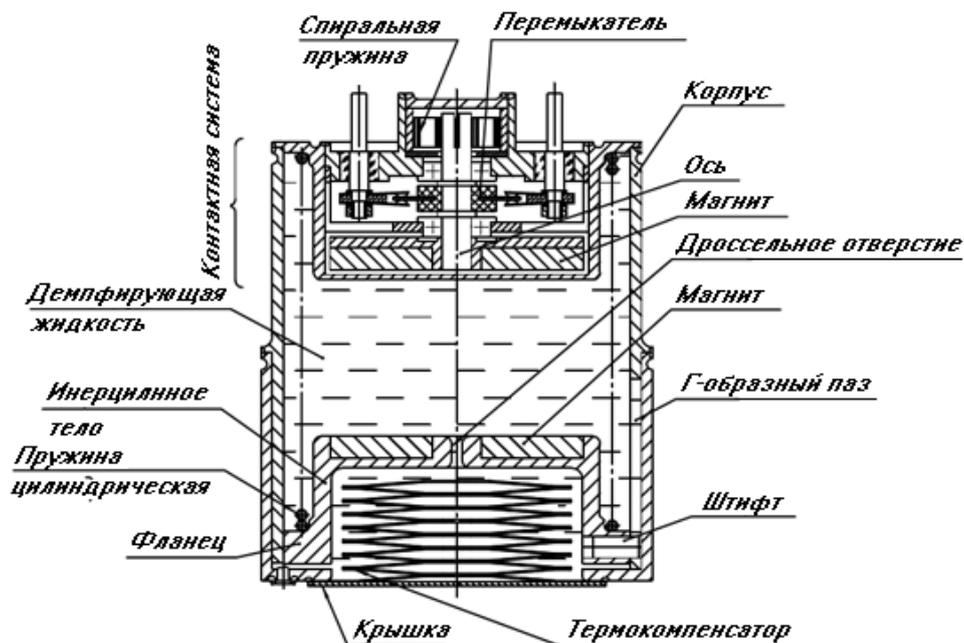


Рис. 1. Конструкция прибора в исходном состоянии

В герметичном корпусе размещено инерционное тело, выполненное в виде полого цилиндра с фланцем, в котором равномерно по окружности размещены три радиальных штифта, входящие в пазы корпуса. Инерционное тело выполнено из «тяжелого» вольфрамового немагнитного сплава типа ВМЗ-2. Внутренняя полость инерционного включателя заполнена демпфирующей полиметилсилоксановой жидкостью по ГОСТ 13032-77. Фланец и корпус сопряжены по диаметру с малым зазором. Фланец инерционного тела поджат цилиндрической пружиной. На торце инерционного тела закреплен постоянный магнит, намагниченный в поперечном направлении.

Контактная система, отделенная от внутренней полости корпуса кожухом, состоит из размещенных на токовыводах упругих контактов и поворотного переключателя с токопроводящими ножами. Токопроводящие ножи, закрепленные на переключателе, взаимодействуют с упругими контактами, закрепленными на токовыводах, формируя требуемые электрические цепи. Токовыводы установлены на изоляторах. Исходное состояние контактной системы обеспечивается спиральной пружиной, удерживающей ось переключателя в исходном угловом положении.

На оси переключателя закреплена подложка с размещенным постоянным магнитом, намагниченным в поперечном направлении.

Постоянные магниты инерционного тела и контактной системы развернуты относительно друг друга, как в исходном, так и в переключенном состоянии контактной системы на определенный угол (рис. 2).

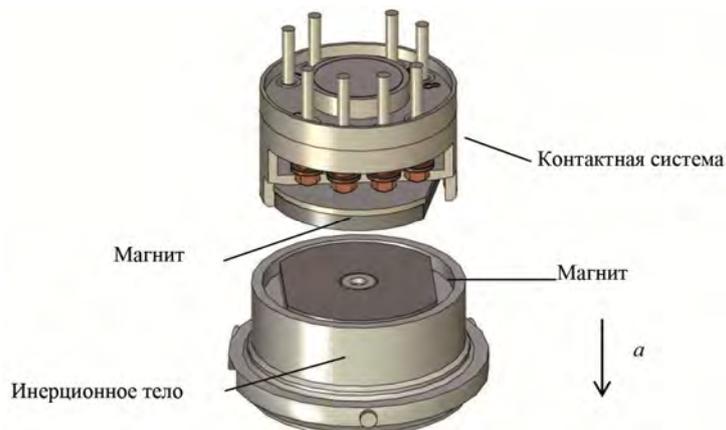


Рис. 2. Расположение магнитов инерционного тела и контактной системы

Переключение контактной системы магнитной системой через герметичную стенку заимствовано из ранее разработанных технических решений [1, 2].

### Принцип действия инерционного включателя

При ускорении  $a$  (рис. 2) в направлении оси чувствительности прибора действует сила инерции с величиной, обеспечивающей превышение усилия предварительного поджатия цилиндрической пружины, инерционное тело начинает перемещаться, сжимая цилиндрическую пружину. Демпфирующая жидкость перетекает через дроссельное отверстие, кольцевой зазор между корпусом и фланцем, а также через зазоры между штифтами и стенками пазов.

Радиальные штифты, установленные во фланце, перемещаются по наклонным Г-образным пазам в корпусе и поворачивают инерционное тело на некоторый угол  $\beta$ .

При приближении постоянного магнита инерционного тела к постоянному магниту контактной системы резко возрастающее усилие взаимодействия полюсов магнитов переключает контактную систему прибора. Переместившись до конца Г-образных пазов, штифты инерционного тела фиксируют переключенное состояние контактной системы.

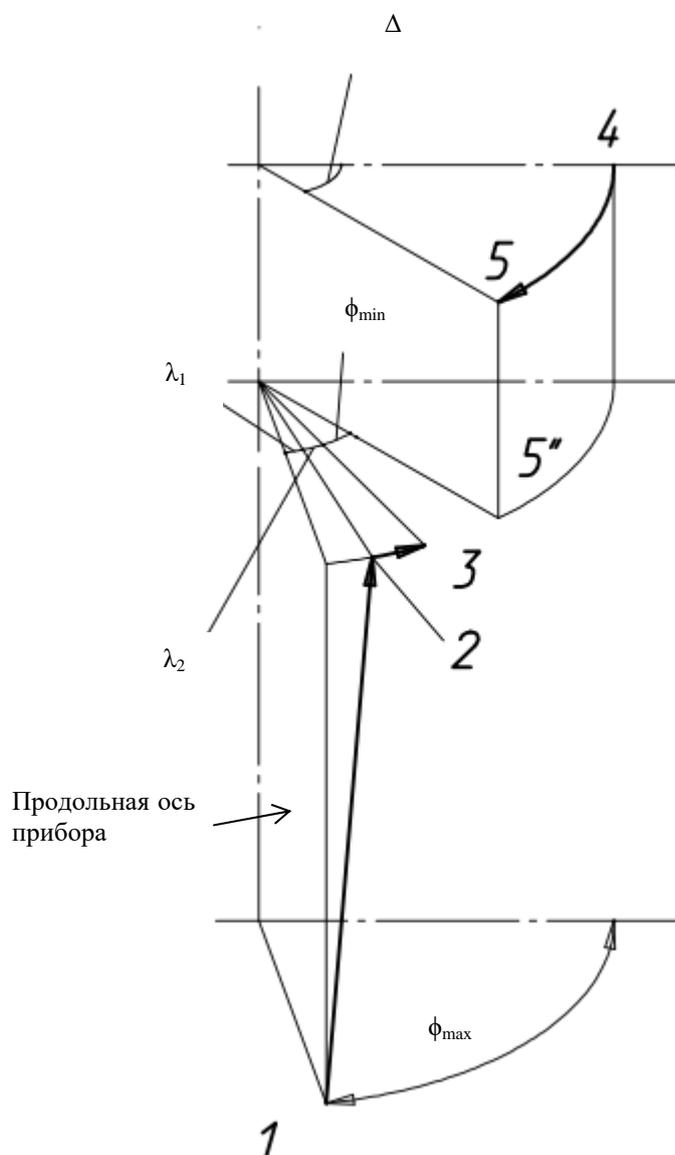


Рис. 2. Схема изменения пространственного положения магнитов при срабатывании инерционного включателя

На схеме изменения пространственного положения магнитов при срабатывании инерционного выключателя:  $1$  – исходное положение магнита инерционного тела;  $1-2$  – поступательно-вращательное движение магнита инерционного тела по винтовой линии;  $2-3$  – вращательное движение магнита инерционного тела в перемещенном положении;  $4$  – исходное положение магнита контактной системы;  $4-5$  – поворот магнита переключателя контактной системы;  $\phi_{\max}$  – угол между магнитами в исходном состоянии инерционного выключателя;  $\phi_{\min}$  – угол между магнитами в сработанном состоянии инерционного выключателя;  $\lambda_1$  – угол поворота магнита инерционного тела на участке  $1-2$ ;  $\lambda_2$  – угол поворота магнита инерционного тела (ИТ) на участке  $2-3$ ;  $\Delta$  – угол поворота переключателя.

### Система координат

Введем прямоугольную правую систему координат  $OXYZ$ , связанную с прибором. Начало  $O$  системы координат – в центре начального положения центра поверхности инерционного тела. Направления осей показаны на рис. 3. Ортты осей являются правой тройкой векторов, т.е. ось  $OZ$  направлена от нас.

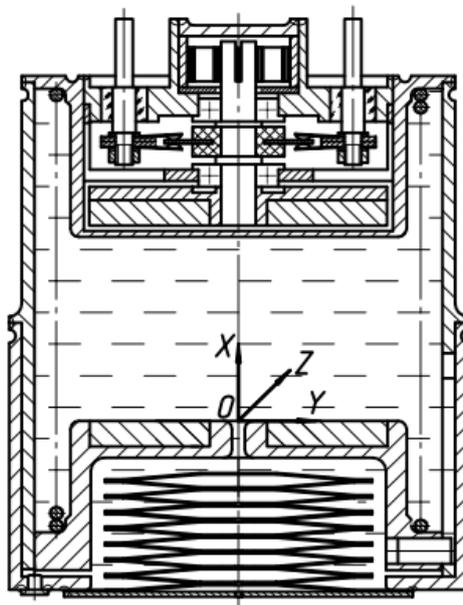


Рис. 3. Ориентация прибора в системе координат  $OXYZ$

Перемещение ИТ от начального положения по оси  $OX$  обозначим через  $X_{\text{ИТ}}$ . Если инерционное тело переместилось в конечное положение, то  $X_{\text{ИТ}} = X_{\text{кон}}$  (рис. 3).

### Дифференциальные уравнения

При составлении дифференциальных уравнений были приняты следующие допущения [3, 4]:

- силами трения в контактной системе пренебрегаем (подшипники на оси переключателя, взаимодействие токопроводящих ножей и упругих контактов);
- жидкость считаем несжимаемой;
- изменения размеров деталей прибора за счет отклонения температуры жидкости от номинальной ( $T_{\text{ж}} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ ) не учитываются;
- взаимодействие цилиндрической поверхности штифтов с угловым элементом в месте изменения направления каждого паза не учитывается. Принимается условие о прохождении штифтами всего наклонного участка пазы.

### Силы, действующие на подвижные части инерционного выключателя

Опишем силы, действующие на подвижные части инерционного выключателя – инерционное тело и переключатель контактной системы.

Сила инерции  $\vec{F}_{ин}$  определяется следующим образом:

$$\vec{F}_{ин} = -m_{ит} \vec{a}, \quad (1)$$

где  $m_{ит}$  – приведенная масса инерционного тела;  $\vec{a}$  – ускорение носителя в месте положения инерционного тела прибора:

$$\vec{a} = (a_x; a_y; a_z), \quad (2)$$

$a_x, a_y, a_z$  – проекция  $\vec{a}$  на оси системы координат OXYZ.

Выражение (1) с учетом соотношения (2) перепишем в следующем виде:

$$\vec{F}_{ин} = -m_{ит} (a_x; a_y; a_z). \quad (3)$$

Приведенная масса инерционного тела определяется по формуле

$$m_{ит} = m_{цил} + m_{маг} + 3m_{шт} + \frac{m_{пр}}{3}, \quad (4)$$

где  $m_{цил}$  – масса полого цилиндра с фланцем;  $m_{маг}$  – масса постоянного магнита инерционного тела;  $m_{шт}$  – масса штифта;  $m_{пр}$  – масса пружины.

Сила Архимеда  $\vec{F}_A$  определяется следующим образом:

$$\vec{F}_A = m_{жит} (\vec{a}_ж - \vec{g}), \quad (5)$$

где  $\vec{a}_ж$  – ускорение прибора в месте положения центра тяжести жидкости, вытесненной инерционным телом (в упрощенной постановке  $\vec{a}_ж = \vec{a}$ );  $g$  – ускорение свободного падения;  $m_{жит}$  – масса жидкости, вытесненной инерционным телом:

$$m_{жит} = m_{жцил} + m_{жмаг} + 3m_{жшт} + \frac{m_{жпр}}{3}, \quad (6)$$

$m_{жцил}$ ,  $m_{жмаг}$ ,  $m_{жшт}$ ,  $m_{жпр}$  – масса жидкости, вытесненная полым цилиндром с фланцем, магнитом инерционного тела, штифтом, пружиной соответственно.

Масса жидкости, вытесненная полым цилиндром с фланцем, определяется следующим образом:

$$m_{жцил} = \rho_ж V_{цил}, \quad (7)$$

где  $\rho_ж$  – плотность жидкости (ГОСТ 13032-77);  $V_{цил}$  – объем полого цилиндра с фланцем, определяется из конструкторской документации.

Аналогичным образом определяются массы  $m_{жмаг}$ ,  $m_{жшт}$ ,  $m_{жпр}$ :

$$m_{жмаг} = \rho_ж V_{маг}, \quad (8)$$

$$m_{жшт} = \rho_ж V_{шт}, \quad (9)$$

$$m_{жпр} = \rho_ж V_{пр}, \quad (10)$$

где  $V_{маг}$ ,  $V_{шт}$ ,  $V_{пр}$  – объемы магнита инерционного тела, штифта, пружины соответственно.

### Сила упругости цилиндрической пружины

Величина силы упругости цилиндрической пружины  $F_ц$  определяется следующим образом [5, 6]:

$$F_ц = F_{ц0} + C_ц (X_{ит} - X_{ит0}), \quad (11)$$

где  $F_{ц0}$  – начальное усилие пружины:

$$F_{ц0} = C_ц (h_{ц0} - h_{ц1}), \quad (12)$$

$C_{пр}$  – коэффициент упругости пружины (жесткость):

$$C_{\text{ц}} = \frac{F_{\text{цк}}}{(h_{\text{ц0}} - h_{\text{ц1}})}, \quad (13)$$

$F_{\text{цк}}$  – контрольное усилие пружины;  $h_{\text{ц0}}$  – высота пружины в свободном состоянии;  $h_{\text{ц1}}$  – высота пружины в исходном состоянии;  $h_{\text{ц2}}$  – контрольная высота пружины;  $X_{\text{ит0}} - X_{\text{ит}}$  в начальном положении инерционного тела.

Величина силы трения  $F_{\text{тр}}$  трех штифтов о стенки в пазах определяется следующим образом:

если  $\frac{dX}{dt} \neq 0$ , то

$$F_{\text{тр}} = -\text{sign}\left(\frac{dX}{dt}\right)\mu_c(N_1 + N_2 + N_3), \quad (14)$$

если  $\frac{dX}{dt} = 0$ , то

$$|F_{\text{тр}}| \leq \mu_n(N_1 + N_2 + N_3), \quad (15)$$

где  $\mu_c, \mu_n$  – коэффициент трения скольжения и покоя соответственно;  $N_1, N_2, N_3 = F_{\text{маг\_вр}} \cos \beta$  (при  $\beta_1 = \beta_2 = \beta_3$ ) – нормальные составляющие реакций, действующих со стороны пазов на штифты (рис. 4).

Силы, действующие со стороны паза на штифт, показаны на рис. 4.

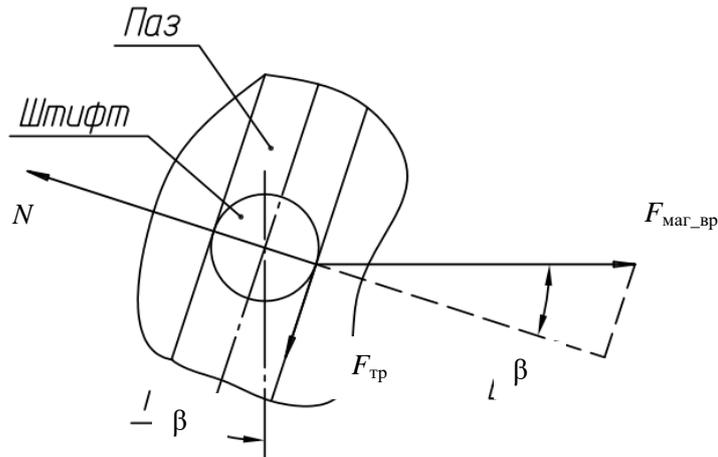


Рис. 4. Силы, действующие на штифт инерционного тела:  
 $F_{\text{маг\_вр}}$  – сила от момента вращения взаимодействующих магнитов инерционного тела и контактной системы

Величину силы гидравлического сопротивления будем определять по следующей формуле

$$F_{\text{гс}} = \Delta p S_{\text{ит}}, \quad (16)$$

где  $\Delta p$  – перепад давления жидкости на инерционном теле (перед и за ним);  $S_{\text{ит}}$  – площадь торцевой поверхности инерционного тела:

$$S_{\text{ит}} = \frac{\pi d_{\text{ит}}^2}{4}; \quad (17)$$

$d_{\text{ит}}$  – диаметр инерционного тела.

Перепад давления жидкости на инерционном теле будем определять из следующих соображений.

При перемещении инерционного тела с площадью поверхности  $S_{\text{ит}}$  на величину  $\Delta X_{\text{ит}}$  происходит вытеснение жидкости объемом  $\Delta V$  [7]:

$$\Delta V = S_{ит} \Delta X_{ит}, \quad (18)$$

которая перетекает за промежуток времени  $\Delta t$  через кольцевой зазор между корпусом и фланцем, через зазоры между штифтами и стенками пазов и через дроссельное отверстие.

С другой стороны, имеем

$$\Delta V = Q \Delta t, \quad (19)$$

где  $Q$  – суммарный расход жидкости через зазоры и дроссельное отверстие.

Приравнявая соотношения (18) и (19), после ряда преобразований получаем следующее соотношение:

$$\frac{\Delta X_{ит}}{\Delta t} = \frac{Q}{S_{ит}}. \quad (20)$$

После предельного перехода в выражении (20) при  $\Delta t \rightarrow 0$  с учетом того, что

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta X_{ит}}{\Delta t} = |v_{ит}|, \quad (21)$$

имеем следующее соотношение для определения величины суммарного расхода жидкости:

$$Q = |v_{ит}| S_{ит}, \quad (22)$$

где  $v_{ит}$  – скорость движения инерционного тела.

С другой стороны, суммарный расход  $Q$  жидкости можно определить следующим образом:

$$Q = Q_d + Q_3, \quad (23)$$

где  $Q_d$  – расход жидкости через дроссельное отверстие;  $Q_3$  – расход жидкости через зазоры между корпусом и фланцем и между штифтами и стенками пазов.

Расход жидкости через дроссельное отверстие [2] будем определять следующим образом:

$$Q_d = \mu S_d \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho_{ж}}}, \quad (24)$$

где  $\mu$  – коэффициент расхода;  $S_d$  – площадь дроссельного отверстия:

$$S_d = \frac{\pi d_d^2}{4}, \quad (25)$$

$d_d$  – диаметр дроссельного отверстия.

Коэффициент расхода жидкости  $\mu$  через дроссельное отверстие будем задавать как функцию числа Рейнольдса  $Re$ :

$$\mu = \mu(Re). \quad (26)$$

Число Рейнольдса определяется выражением

$$Re = \frac{v_d d_d}{\gamma_{ж}}, \quad (27)$$

где  $v_d$  – средняя скорость течения жидкости через дроссельное отверстие:

$$v_d = \frac{Q_d}{S_d}, \quad (28)$$

$\gamma_{ж}$  – коэффициент кинематической вязкости жидкости:

$$\gamma_{ж} = \frac{\eta_{ж}}{\rho_{ж}}; \quad (29)$$

$\eta_{ж}$  – коэффициент динамической вязкости жидкости, задается как функция температуры жидкости  $T_{ж}$ :

$$\eta_{ж} = \eta_{ж}(T_{ж}). \quad (30)$$

Расход жидкости через зазоры [2] определяется выражением

$$Q_3 = \frac{S_3 \delta^2}{12 \eta_{\text{ж}} K L_3} \Delta p + \frac{S_3}{2} |v_{\text{ит}}|, \quad (31)$$

где  $S_3$  – площадь зазора, определяется по 3d-модели прибора или упрощенно:

$$S_3 = \frac{\pi}{4} (d_k^2 - d_\phi^2); \quad (32)$$

$d_k$  – диаметр корпуса;  $d_\phi$  – диаметр фланца;  $\delta$  – величина зазора, определяется по 3d модели прибора или упрощенно:

$$\delta = \frac{d_k - d_\phi}{2}; \quad (33)$$

$K$  – коэффициент несоосности,  $K = 0,4 \div 1$ ;  $L_3$  – длина боковой поверхности фланца диаметром  $d_\phi$ .

После подстановки выражения (22) в формулу (23) с учетом соотношений (24), (31) имеем следующие уравнения для определения перепада давления  $\Delta p$  на инерционном теле:

$$\mu S_d \sqrt{\frac{2 \Delta p}{\rho_{\text{ж}}}} + \frac{S_3 \delta^2}{12 \eta_{\text{ж}} K L_3} \Delta p + \frac{S_3}{2} |v_{\text{ит}}| = |v_{\text{ит}}| S_{\text{ит}}. \quad (34)$$

Выражение (34) перепишем в следующем виде:

$$u^2 + \frac{12 \eta_{\text{ж}} K L_3 \mu S_d \sqrt{2}}{S_3 \delta^2 \sqrt{\rho_{\text{ж}}}} u + \frac{12 \eta_{\text{ж}} K L_3}{S_3 \delta^2} |v_{\text{ит}}| \left( \frac{S_3}{2} - S_{\text{ит}} \right) = 0, \quad (35)$$

где

$$u = \sqrt{\Delta p}. \quad (36)$$

Выражение (35) перепишем в следующем виде:

$$u^2 + 2 B u + C = 0, \quad (37)$$

где

$$B = \frac{6 \eta_{\text{ж}} K L_3 \mu S_d \sqrt{2}}{S_3 \delta^2 \sqrt{\rho_{\text{ж}}}}, \quad (38)$$

$$C = \frac{12 \eta_{\text{ж}} K L_3}{S_3 \delta^2} |v_{\text{ит}}| \left( \frac{S_3}{2} - S_{\text{ит}} \right). \quad (39)$$

Решение уравнения (38) выглядит следующим образом:

$$u = -B \pm \sqrt{B^2 - C}. \quad (40)$$

После подстановки в выражение (36) соотношения (40), выбора знака «–», так как  $\Delta p \geq 0$ , и ряда преобразований получаем следующее выражение для определения перепада давления  $\Delta p$ :

$$\Delta p = (\sqrt{B^2 - C} - B)^2. \quad (41)$$

### Моменты сил, действующие на инерционное тело

Магнитный момент  $\vec{M}_{\text{маг}}$  определяется следующим образом:

$$\vec{M}_{\text{маг}} = \vec{M}_{\text{маг}}(x_{\text{ит}}, \varphi_{\text{маг}}), \quad (42)$$

определяется методами конечно-элементного анализа.

Момент сил  $\vec{M}_N$ , действующих со стороны Г-образных пазов на штифты инерционного тела, определяется следующим образом:

$$\vec{M}_N = R_{кр} (\vec{N}_1, \vec{N}_2, \vec{N}_3), \quad (43)$$

где  $R_{кр}$  – внутренней радиус корпуса инерционного включателя.

### Моменты сил, действующие на контактную систему

#### Момент упругости спиральной пружины контактной системы

Момент упругости спиральной пружины  $\vec{M}_{сп}$  определяется следующим образом:

$$\vec{M}_{сп} = \vec{M}_{сп}(\varphi_{сп}), \quad (44)$$

определяется из конструкторской документации.

#### Уравнения движения подвижных частей инерционного включателя

Уравнение поступательного движения инерционного тела относительно корпуса прибора запишем в следующем виде:

$$m_{ит} \vec{a}_{ит} = \vec{F}_{ин} + \vec{F}_{ц} + \vec{F}_A + \vec{F}_{тр} + \vec{F}_{гс} + \vec{F}_{маг}, \quad (45)$$

где  $\vec{a}_{ит}$  – ускорение инерционного тела относительно корпуса прибора.

#### Уравнение вращательного движения инерционного тела

Уравнения вращения инерционного тела запишем в следующем виде:

$$J_{ит} \vec{\epsilon}_{ит} = \vec{M}_{маг} + \vec{M}_N, \quad (46)$$

где  $J_{ит}$  – осевой момент инерции инерционного тела;  $\vec{\epsilon}_{ит}$  – угловое ускорение инерционного тела, вращающегося вокруг своей оси.

Уравнения вращения переключателя контактной системы запишем в следующем виде:

$$J_{кц} \vec{\epsilon}_{кц} = \vec{M}_{маг} + \vec{M}_{сп}, \quad (47)$$

где  $J_{кц}$  – осевой момент инерции переключателя;  $\vec{\epsilon}_{кц}$  – угловое ускорение переключателя вокруг своей оси.

Система дифференциальных уравнений, описывающих поступательное и вращательное движение подвижных частей прибора вдоль и вокруг оси  $OX$ :

$$\left\{ \begin{array}{l} a_{итх} = (F_{инх} - F_{ц} - F_A - F_{тр} \cos \beta - F_{гс} + F_{маг_пр}) / m_{ит}, \\ a_{итх} = \frac{dv_{итх}}{dt} = \frac{d^2 X_{ит}}{dt^2}, \\ \epsilon_{ит} = (M_{маг} - M_N) / J_{ит}, \\ \epsilon_{ит} = \frac{d\omega_{ит}}{dt} = \frac{d^2 \varphi_{ит}}{dt^2}, \\ \epsilon_{кц} = (M_{маг} - M_{сп}) / J_{кц}, \\ \epsilon_{кц} = \frac{d\omega_{кц}}{dt} = \frac{d^2 \varphi_{кц}}{dt^2}, \end{array} \right. \quad (48)$$

где  $\omega_{ит}$  – угловая скорость инерционного тела вокруг оси  $OX$ ;  $\varphi_{ит}$  – угол поворота инерционного тела вокруг оси  $OX$ ;  $\varphi_{ит} = f(X_{ит})$ , а в простом случае ( $\beta_1 = \beta_2 = \beta_3$ )  $\varphi_{ит} = \frac{X_{ит} \operatorname{tg} \beta}{R_{кр}}$ ;  $\omega_{кц}$  – угловая скорость переключателя контактной системы вокруг оси  $OX$ ;  $\varphi_{кц}$  – угол поворота переключателя контактной системы вокруг оси  $OX$ .

Система (48) решается численно при начальных условиях:  $X_{ит} = 0$ ,  $\varphi_{кв} = 0$  ( $t = 0$ ).

Таким образом, полученное решение математической модели инерционного прибора позволяет оптимизировать процесс его производства.

### Список литературы

1. Патент 2762663 РФ, МПК Н 01 Н 1/42. Концевой выключатель / Китаев В. Н., Филиппов М. А., Екимов Н. В., Тенетилов Г. В. ; № 2021111093 ; заявл. 19.04.2021, зарег. 21.12.2021.
2. Патент 2552349 РФ, МПК Н 01 Н 1/42. Контактная система / Китаев В. Н., Китаева Е. Н., Новоселова Н. В. ; № 2013112091 ; заявл. 18.03.2013, зарег. 10.06.2015.
3. Семенов А. Д., Юрков Н. К. Моделирование систем управления. СПб. : Лань, 2022. 328 с.
4. Юрков Н. К. Технология производства электронных средств : учебник. СПб. : Лань, 2014. 480 с.
5. Петелин К. С., Рыбаков И. М., Юрков Н. К. Модели и метод организации концептуального мультипроектного управления // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. 2014. № 3. С. 10–18.
6. Гришко А. К., Горячев Н. В., Юрков Н. К. Математическое моделирование системы обеспечения тепловых режимов конструктивно-функциональных модулей радиоэлектронных комплексов // Проектирование и технология электронных средств. 2015. № 3. С. 27–31.
7. Жаднов В. В., Юрков Н. К. Особенности конструирования бортовой космической аппаратуры : учеб. пособие. Пенза : Изд-во ПГУ, 2012. 112 с.

### References

1. Patent 2762663 Russian Federation, MPK N 01 N 1/42. Limit switch. Kitaev V.N., Filippov M.A., Ekimov N.V., Tenetilov G.V.; No. 2021111093; appl. 19.04.2021, reg. 21.12.2021. (In Russ.)
2. Patent 2552349 Russian Federation, MPK N 01 N 1/42. Contact system. Kitaev V.N., Kitaeva E.N., Novoselova N.V.; No. 2013112091; appl. 18.03.2013, reg. 10.06.2015. (In Russ.)
3. Semenov A.D., Yurkov N.K. *Modelirovanie sistem upravleniya = Modeling of control systems*. Saint Petersburg: Lan', 2022:328. (In Russ.)
4. Yurkov N.K. *Tekhnologiya proizvodstva elektronnykh sredstv: uchebnik = Technology of production of electronic means : textbook*. Saint Petersburg: Lan', 2014:480. (In Russ.)
5. Petelin K.S., Rybakov I.M., Yurkov N.K. Models and method of organization of conceptual multiproject management. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii = Caspian Journal: Management and High Technologies*. 2014;(3):10–18. (In Russ.)
6. Grishko A.K., Goryachev N.V., Yurkov N.K. Mathematical modeling of the system for providing thermal modes of constructive and functional modules of radioelectronic complexes. *Proektirovanie i tekhnologiya elektronnykh sredstv = Design and technology of electronic means*. 2015;(3):27–31. (In Russ.)
7. Zhadnov V.V., Yurkov N.K. *Osobennosti konstruirovaniya bortovoy kosmicheskoy apparatury: ucheb. posobie = Design features of onboard space equipment : textbook*. Penza: Izd-vo PGU, 2012:112. (In Russ.)

### Информация об авторах / Information about the authors

#### Владимир Николаевич Китаев

начальник конструкторского отдела,  
Российский федеральный ядерный центр –  
Всероссийский научно-исследовательский  
институт технической физики  
имени академика Е. И. Забабахина  
(Россия, Челябинская область,  
г. Снежинск, ул. Васильева, 13)  
E-mail: kb2@vniitf.ru

#### Роман Львович Афанасьев

заместитель начальника отдела  
прикладных исследований,  
Российский федеральный ядерный центр –  
Всероссийский научно-исследовательский  
институт технической физики  
имени академика Е. И. Забабахина  
(Россия, Челябинская область,  
г. Снежинск, ул. Васильева, 13)  
E-mail: kb2@vniitf.ru

#### Vladimir N. Kitaev

Head of the design department,  
Russian Federal Nuclear Center –  
All-Russian Scientific Research  
Institute of Technical Physics  
named after Academician E. I. Zababakhin  
(13 Vasilieva street, Snezhinsk,  
Chelyabinsk region, Russia)

#### Roman L. Afanas'ev

Deputy head of the applied research department,  
Russian Federal Nuclear Center –  
All-Russian Scientific Research  
Institute of Technical Physics  
named after Academician E. I. Zababakhin  
(13 Vasilieva street, Snezhinsk,  
Chelyabinsk region, Russia)

**Максим Владимирович Петров**

инженер-исследователь  
отдела прикладных исследований,  
Российский федеральный ядерный центр –  
Всероссийский научно-исследовательский  
институт технической физики  
имени академика Е. И. Забабахина  
(Россия, Челябинская область,  
г. Снежинск, ул. Васильева, 13)  
E-mail: kb2@vniitf.ru

**Maksim V. Petrov**

Research engineer of the applied research department,  
Russian Federal Nuclear Center –  
All-Russian Scientific Research  
Institute of Technical Physics  
named after Academician E. I. Zababakhin  
(13 Vasilieva street, Snezhinsk,  
Chelyabinsk region, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /  
The authors declare no conflicts of interests.**

**Поступила в редакцию/Received 15.11.2021**

**Поступила после рецензирования/Revised 20.12.2021**

**Принята к публикации/Accepted 10.02.2022**

# ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

## DIAGNOSTIC METHODS FOR ENSURING RELIABILITY AND QUALITY OF COMPLEX SYSTEMS

УДК 007.51: 658.52.011.56

doi:10.21685/2307-4205-2022-1-5

### ЧЕЛОВЕЧЕСКИЙ ФАКТОР И БЕЗОПАСНОСТЬ ПОЛЕТОВ ПРИ УПРАВЛЕНИИ ВОЗДУШНЫМ ДВИЖЕНИЕМ

**Е. В. Мамонтов**

АО «НПО «Прибор», Санкт-Петербург, Россия  
E.Mamontov@npo-pribor.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Дан анализ авиационных происшествий, который показал, что большинство из них связаны с человеческим фактором. К данному фактору принято относить причины, обусловленные неграмотными, ошибочными или несвоевременными действиями операторов, эксплуатирующих авиационную технику, управляющих воздушным движением или обеспечивающих полеты. *Материалы и методы.* Показано, что системы управления воздушным движением относятся к эргатическим системам, т.е. к системам, в которых предусмотрено функционирование человека-оператора. Современные достижения науки и техники привели к тому, что надежность технической составляющей эргатических систем стала выше, чем надежность операторского звена. Однако отказаться от творческих возможностей человека-оператора, его знаний, опыта пока не представляется возможным. *Результаты и выводы.* При этом решающее значение для обеспечения безопасности полетов при управлении воздушным движением имеет функциональная надежность операторов систем управления воздушным движением.

**Ключевые слова:** надежность, человеческий фактор, управление воздушным движением, человек-оператор

**Для цитирования:** Мамонтов Е. В. Человеческий фактор и безопасность полетов при управлении воздушным движением // Надежность и качество сложных систем. 2022. № 1. С. 41–45. doi:10.21685/2307-4205-2022-1-5

### THE HUMAN FACTOR AND FLIGHT SAFETY WHEN CONTROLLING AIR TRAFFIC

**E.V. Mamontov**

NPO Pribor JSC, Saint Petersburg, Russia  
E.Mamontov@npo-pribor.ru

**Abstract.** *Background.* An analysis of aviation accidents is given, which showed that most of them are related to the human factor. It is customary to refer to this factor as reasons due to illiterate, erroneous or untimely actions of operators operating aviation equipment, controlling air traffic or providing flights. *Materials and methods.* It is shown that air traffic control systems are ergatic systems, i.e. to systems in which the functioning of a human operator is provided. Modern achievements in science and technology have led to the fact that the reliability of the technical component of ergatic systems has become higher than the reliability of the operator link. However, it is not yet possible to refuse the creative possibilities of a human operator, his knowledge and experience. *Results and conclusions.* At the same time, the functional reliability of operators of air traffic control systems (ATC) is of decisive importance for ensuring the safety of flights in air traffic control.

**Keywords:** reliability, human factor, air traffic control, human operator

**For citation:** Mamontov E.V. The human factor and flight safety when controlling air traffic. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2022;(1):41–45. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2022-1-5

Результаты анализа авиационных происшествий показывают, что большинство из них связаны с человеческим фактором. К данному фактору принято относить причины, обусловленные неграмотными, ошибочными или несвоевременными действиями операторов, эксплуатирующих авиационную технику, управляющих воздушным движением или обеспечивающих полеты.

Системы управления воздушным движением относятся к эргатическим системам, т.е. к системам, в которых предусмотрено функционирование человека-оператора. Современные достижения науки и техники привели к тому, что надежность технической составляющей эргатических систем стала выше, чем надежность операторского звена. Однако отказаться от творческих возможностей человека-оператора, его знаний, опыта пока не представляется возможным. При этом решающее значение для обеспечения безопасности полетов при управлении воздушным движением имеет функциональная надежность операторов систем управления воздушным движением (УВД).

Под надежностью человека-оператора понимается совокупность психофизиологических свойств, которые обеспечивают работоспособность регулируемой им системы в диапазоне различных условий ее существования [1].

Управление воздушным движением имеет существенные специфические особенности, обусловленные прежде всего невозможностью остановить воздушные суда или обеспечить их дополнительным топливом в воздухе. Это обуславливает, во-первых, относительно небольшой набор возможных управляющих воздействий оператора, во-вторых, высокую цену ошибки оператора, в-третьих, ограниченное время на анализ сложившейся ситуации и принятие решения. Исходя из этого под функциональной надежностью оператора системы УВД предлагается понимать совокупность психофизиологических свойств человека, которые обеспечивают выполнение задач по управлению воздушным движением с таким запасом внимания и возможностей, который позволяет своевременно выявить нештатную ситуацию и успешно ее парировать.

Таким образом, исследования функциональной надежности операторов систем управления воздушным движением (УВД) являются весьма актуальными для обеспечения безопасности полетов [2].

Для обеспечения безопасности важно функциональную надежность оператора выразить количественно. Известно, что единые взгляды и подходы к определению надежности оператора эргатических систем пока не определены, поэтому методы расчета оценки надежности представляют некоторые трудности и составляют одну из актуальнейших проблем теории эргатических систем управления вообще.

В настоящее время в полиэргатических системах, к которым относятся системы УВД, номенклатура показателей, характеризующих функциональную надежность оператора, пока строго не определена. Исходя из особенностей деятельности операторов УВД, можно предложить следующие группы показателей:

- показатели качества функционирования оператора УВД;
- показатели выходных параметров управляющих воздействий;
- показатели состояния оператора.

Первая группа показателей отражает поведение объекта управления (ОУ) как результат действий оператора. Они характеризуют конечный результат деятельности оператора и его влияние на выполнение объектом управления заданных функций.

Вторая группа показателей характеризует действия оператора, т.е. отвечает на вопрос, насколько рациональными являются действия (операции), выполняемые оператором.

Третья группа показателей характеризует психофизиологическое состояние оператора.

В качестве показателей качества функционирования оператора УВД можно использовать терминальные критерии. Они позволяют оценить выдерживание заданных параметров элементарных операций в контрольных точках. Степень соответствия фактического параметра  $R_i$  заданному характеризуется показателем вида [3]

$$R_i = \frac{1}{m} \sum \frac{|x_{эij} - x_{тij}|}{\sigma_{ij}}, \quad (1)$$

где  $x_{Эij}$  – эталонное значение  $i$ -го параметра в  $j$ -й точке;  $x_{Тij}$  – текущее значение  $i$ -го параметра (определяемое действиями оператора);  $\sigma_{ij}$  – нормативное отклонение (определяется условиями обеспечения безопасности);  $i = 1, 2, \dots, n$  – номер оцениваемого параметра;  $j = 1, 2, \dots, m$  – номер точки контроля.

Основной недостаток терминальных критериев заключается в том, что они предполагают дискретный контроль.

Этого недостатка нет у частотно-временных и интервальных критериев. Для непрерывной оценки функционирования можно применить интервальные критерии, в качестве которых предлагается среднее значение  $\Delta x_{\text{ср.м}}$  модуля отклонения параметра  $x$  от заданного значения:

$$\Delta x_{\text{ср.м}} = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} |\Delta x| dt \quad (2)$$

и среднее квадратическое отклонение

$$\sigma_x = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} \Delta x^2 dt, \quad (3)$$

где  $\Delta x = x_i - x_0$ ;  $x_i$  – значение параметра в  $i$ -й момент;  $x_0$  – заданное значение выдерживаемого параметра;  $t_2 - t_1$  – длительность интервала.

Показателями качества функционирования также являются терминальный  $K_T$  и интервальный  $K_H$  показатели, которые вычисляются по следующим соотношениям [4]:

$$K_T = |x_T - x_0|, \quad (8)$$

$$K_H = \frac{1}{n} \sum |x_i - x_0|, \quad (9)$$

где  $x_T$  – текущее значение параметра в фиксированной точке;  $x_i$  – текущее значение параметра на  $i$ -м интервале;  $x_0$  – заданное значение параметра;  $n$  – количество измерений на оцениваемом интервале.

В зависимости от характера контролируемого параметра (например, высота) отражается степень безопасности отклонения текущего значения параметра, что позволяет управлять рисками, обусловливающими допустимое отклонение.

Кроме того, в качестве показателей первой группы целесообразно ввести три  $R$ -показателя, характеризующих относительные затраты оператора при функционировании по времени, загрузке и их средний  $R$ -показатель.

$R$ -показатель по загрузке  $R_G$  определяется соотношением

$$R_G = \frac{G_0}{G_p}, \quad (10)$$

где  $G_0$  – оптимальное значение загрузки;  $G_p$  – текущее значение загрузки;  $R$  – показатель по быстродействию  $R_t$ , определяющийся соотношением

$$R_t = \frac{t_0}{t_p}, \quad (11)$$

где  $t_0$  – оптимальное время выполнения операции;  $t_p$  – реальное время выполнения операции.

Общий показатель можно определить по выражению

$$R = \frac{R_t + R_G}{2}. \quad (12)$$

Показатели второй группы. Показателем выходных параметров управляющих воздействий может быть величина, характеризующая непродуктивные или ошибочные действия. Непродуктивные («лишние») действия определяются соотношением [5]

$$N(t) = Q(t) - U(t), \quad (4)$$

где  $U(t)$  – управляющее воздействие с минимально возможным количеством элементарных операций;  $Q(t)$  – управляющее воздействие с фактическим количеством элементарных операций.

Таким образом, величина  $N(t)$  будет характеризовать качество деятельности оператора. Информацию о структуре управляющих воздействий оператора предполагается получать с помощью корреляционно-спектрального анализа процессов управления, что позволяет детально исследовать их. Формулы для определения математического ожидания  $m_i$  и корреляционной функции  $R_i(\tau)$  зависимости отклонений от частоты управляющих воздействий оператора, спектральной плотности  $S_i(\omega)$  имеют вид

$$m_i = \frac{1}{T} \int_0^T x_i(t) dt, \quad (5)$$

$$R_i(\tau) = \frac{1}{T-\tau} \int_0^{T-\tau} [x_i(t) - m_i][x_i(t+\tau) - m_i] dt, \quad (6)$$

$$S_i(\omega) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} R_i(\tau) \cos \omega \tau \cdot dt, \quad (7)$$

где  $T$  – длительность реализации процесса;  $x_i(t)$  – управляющее воздействие (максимально допустимое количество элементарных операций в воздействии);  $\tau$  – аргумент корреляционной функции;  $\omega$  – частота спектра управляющих воздействий.

Данный метод позволяет определить среднее, среднеквадратическое отклонение процесса от оптимального, степень колебательности процесса управления.

Включение показателей психофизиологического состояния (ПФС) оператора в комплекс показателей, характеризующий его подготовку, необходимо для оценивания их влияния на его функциональную надежность [6].

Любая профессиональная деятельность сопряжена с определенной степенью нервно-эмоциональной напряженности, вызывающей вегетативные сдвиги в организме. В рамках рассматриваемого вопроса предлагается считать, что отсутствие или низкий уровень эмоциональных реакций свидетельствует о достаточной тренированности, а значит, и надежности оператора.

В качестве таких показателей, например, можно предложить: частоту сердечных сокращений; частоту дыхания; минутный объем дыхания; кожно-гальваническую реакцию. Для оценки психофизиологической напряженности (ПФН) оператора в период подготовки достаточно учесть изменение таких вегетативных показателей, как частота сердечных сокращений (ЧСС) и частота дыхания (ЧД). Кроме того, необходимо учесть индивидуальные особенности, что возможно лишь при определении зависимости между исходными значениями показателей (фоновыми значениями) и их значениями при функционировании оператора.

Таким образом, предлагаемый перечень показателей может характеризовать не только качественную сторону деятельности специалиста УВД, но и оценивать, какими затратами достигнут этот результат. Это очень важно как для оценки результатов подготовки и опосредованного определения функциональной надежности, которая оказывает непосредственное влияние на безопасность полетов при управлении воздушным движением, так и для безопасности полетов в целом.

### Список литературы

1. Зинченко В. П., Вдовина М. И. Исследования функциональной структуры решения комбинаторных задач // Моторные компоненты зрения. М. : Наука, 1975.
2. Галактионов А. И. Представление информации оператору. М. : Энергия, 1969.
3. Сулаев С. А. Роль человеческого фактора в деятельности единой системы организации воздушного движения : учеб. пособие. М. : ИД Академии Жуковского, 2018. 76 с.
4. Козлов В. В. Человеческий фактор: история, теория и практика в авиации. М. : Полиграф, 2002. 280 с.
5. Романов В. В. Юридическая психология : учебник для академического бакалавриата. 6-е изд., перераб. и доп. М. : Юрайт, 2017. 537 с.
6. Артемов А. Д., Лысаков Н. Д., Лысакова Е. Н. Человеческий фактор в эксплуатации авиационной техники : монография. М., 2018. 156 с.

## References

1. Zinchenko V.P., Vdovina M.I. Studies of the functional structure of solving combinatorial problems. *Motornye komponenty zreniya = Motor components of vision*. Moscow: Nauka, 1975. (In Russ.)
2. Galaktionov A.I. *Predstavlenie informatsii operatoru = Presentation of information to the operator*. Moscow: Energiya, 1969. (In Russ.)
3. Sulaev S.A. *Rol' chelovecheskogo faktora v deyatelnosti edinoy sistemy organizatsii vozdušnogo dvizheniya: ucheb. posobie = The role of the human factor in the activities of the unified air traffic management system : textbook*. Moscow: ID Akademii Zhukovskogo, 2018:76. (In Russ.)
4. Kozlov V.V. *Chelovecheskiy faktor: istoriya, teoriya i praktika v aviatsii = The human factor: history, theory and practice in aviation*. Moscow: Poligraf, 2002:280. (In Russ.)
5. Romanov V.V. *Yuridicheskaya psikhologiya: uchebnik dlya akademicheskogo bakalavriata = Legal psychology : textbook for academic bachelor's degree*. 6th ed., rev. and suppl. Moscow: Yurayt, 2017:537. (In Russ.)
6. Artemov A.D., Lysakov N.D., Lysakova E.N. *Chelovecheskiy faktor v ekspluatatsii aviatsionnoy tekhniki: monografiya = The human factor in the operation of aviation equipment: monograph*. Moscow, 2018:156. (In Russ.)

## Информация об авторах / Information about the authors

**Евгений Вячеславович Мамонтов**

кандидат технических наук,  
заместитель генерального директора по НИОКР,  
НПО «Прибор»  
(Россия, г. Санкт-Петербург, 17-я линия В.О., 4-6)  
E-mail: E.Mamontov@npo-pribor.ru

**Evgeniy V. Mamontov**

Candidate of technical sciences,  
deputy CEO for R&D,  
NPO Pribor  
(4-6 17th line V.O., Saint Petersburg, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /  
The authors declare no conflicts of interests.**

**Поступила в редакцию/Received 27.09. 2021**

**Поступила после рецензирования/Revised 10.10.2021**

**Принята к публикации/Accepted 10.11.2021**

## МЕТОДИКА ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ДВОЙНОГО НАЗНАЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ ТРЕХУРОВНЕВОЙ АРХИТЕКТУРЫ СУБД

С. В. Иванов<sup>1</sup>, А. В. Зайченко<sup>2</sup>, Е. М. Хорольский<sup>3</sup>, А. А. Колесников<sup>4</sup>

<sup>1,2</sup> Краснодарское высшее военное училище имени С. М. Штеменко, Краснодар, Россия  
<sup>3,4</sup> Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Россия  
<sup>1</sup> sta399@yandex.ru, <sup>2</sup> zaichenko.an@yandex.ru, <sup>3</sup> horolskii@mail.ru, <sup>4</sup> sergo1778@mail.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* В условиях современных военных конфликтов актуализируется проблема эффективного управления большими группами роботов. Большой объем данных, связанный с работой робототехнических комплексов (РТК), обуславливает наличие ограничений на эффективное управление группами роботов, разработка, эксплуатация и создание которых требуют больших материальных затрат. Все эти факторы оказывают сильное влияние на возможность создания новых технологий и способов повышения живучести систем, важной частью которых является оценка технического состояния. *Материалы и методы.* Внедрение технологий, позволяющих с высокой точностью определить состояние как отдельных единиц, так и целых РТК, позволяет существенно повысить скорость и эффективность управления РТК двойного назначения, а также повысить живучесть системы в целом. Рассматриваются способы оценивания состояния робототехнических комплексов двойного назначения и проблемы, связанные с ними. *Результаты и выводы.* В данной работе предложен подход к определению состояния робототехнических комплексов с использованием трехуровневой архитектуры системы управления базами данных.

**Ключевые слова:** анализ состояния, робототехнические комплексы, обработка данных, трехуровневая архитектура СУБД, марковские процессы

**Для цитирования:** Иванов С. В., Зайченко А. В., Хорольский Е. М., Колесников А. А. Методика оценки состояния робототехнических комплексов двойного назначения на основе применения трехуровневой архитектуры СУБД // Надежность и качество сложных систем. 2022. № 1. С. 46–54. doi:10.21685/2307-4205-2022-1-6

## METHODOLOGY FOR ASSESSING THE STATE OF DUAL-USE ROBOTIC COMPLEXES BASED ON THE USE OF A THREE-LEVEL ARCHITECTURE OF A DATABASE MANAGEMENT SYSTEM

S.V. Ivanov<sup>1</sup>, A.V. Zaichenko<sup>2</sup>, E.M. Khorolsky<sup>3</sup>, A.A. Kolesnikov<sup>4</sup>

<sup>1,2</sup> Krasnodar Higher Military School. S. M. Shtemenko, Krasnodar, Russia  
<sup>3,4</sup> Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia  
<sup>1</sup> sta399@yandex.ru, <sup>2</sup> zaichenko.an@yandex.ru, <sup>3</sup> horolskii@mail.ru, <sup>4</sup> sergo1778@mail.ru

**Abstract.** *Background.* In the conditions of modern military conflicts, the problem of effective control of large groups of robots is actualized. The large amount of data associated with the operation of robotic systems (RC) determines the existence of restrictions on the effective management of groups of robots, the development, operation and creation of which requires large material costs. All this greatly actualizes the creation of technologies and ways to increase the survivability of the system, an important part of which is the assessment of the technical condition. *Materials and methods.* The introduction of technologies that allow to determine with high accuracy the state of both individual units and entire complexes of robots can significantly increase the speed and efficiency of dual-use RTC control, as well as increase the survivability of the system as a whole. The article discusses methods for assessing the state of dual-use robotic systems and the problems associated with them. *Results and conclusions.* This paper proposes an approach to determining the state of robotic systems using a three-level architecture of a database management system.

**Keywords:** state analysis, robotic systems, data processing, three-tier DBMS architecture, markov processes

**For citation:** Ivanov S.V., Zaichenko A.V., Khorolsky E.M., Kolesnikov A.A. Methodology for assessing the state of dual-use robotic complexes based on the use of a three-level architecture of a database management system. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2022;(1):46–54. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2022-1-6

## Введение

В настоящее время идет стремительное развитие военной отрасли в области применения робототехнических комплексов. Одна из сложных задач, которую необходимо решать разработчикам, – оценка состояния РТК. Решением данной задачи может являться осуществление трехуровневой архитектуры программного обеспечения (ПО) РТК, которая позволяет устранить ряд недостатков классической системы оценки состояния на борту беспилотного аппарата (БЛА). Независимо от того, имеет ли оператор контроль над РТК или же РТК, действует в полностью автономном режиме вследствие применения средств РЭП противником, оценка состояния крайне необходима для функционирования всей системы управления и поэтому требует новых и эффективных подходов к выполнению данной функции.

## Постановка задачи

Рассматриваемая задача сформулирована следующим образом.

Пусть имеется: РТК двойного назначения, техническое состояние которого необходимо оценить. Данный комплекс содержит на борту систему датчиков для сбора данных, позволяющих посредством анализа определить состояние  $J$  из всех состояний  $W = \{J_1, J_2, \dots, J_n\}$ . На основе этих данных оператор или искусственный интеллект (ИИ), его замещающий (при временном отсутствии управления), может сделать предположение о возможности выполнения боевой задачи, учитывая следующие показатели:  $P_{\text{готов}}$  – коэффициент готовности РТК к выполнению боевой задачи;  $P_{\text{бр}}$  – коэффициент боевой готовности;  $P_{\text{мест}}$  – коэффициент влияния местности на видимость;  $P_{\text{разв}}$  – коэффициент готовности средств разведки;  $P_{\text{рес}}$  – коэффициент готовности топлива для выполнения задачи;  $P_{\text{метео}}$  – влияние метеоусловий на выполнение боевой задачи.

Количество состояний согласно нормативной базе задается вектором ограничений  $\{V_1, V_2, \dots, V_n\}$ , где  $n$  – число всех возможных технических состояний  $\{J_1, J_2, \dots, J_n\}$ .

## Решение задачи

Совокупность данных, собираемых с датчиков, является базой данных (БД), которая ввиду своего объема и неоднородности не позволяет с достаточной оперативностью обрабатывать измерения, поступающие с датчиков [1]. В качестве решения этой проблемы предлагается алгоритм, реализующий трехуровневую архитектуру СУБД [1, 2]. Структурная схема такого решения представлена на рис. 1. Такая структура позволяет осуществлять обмен информацией между пунктом управления и РТК с достаточной эффективностью в различных условиях работы системы управления.

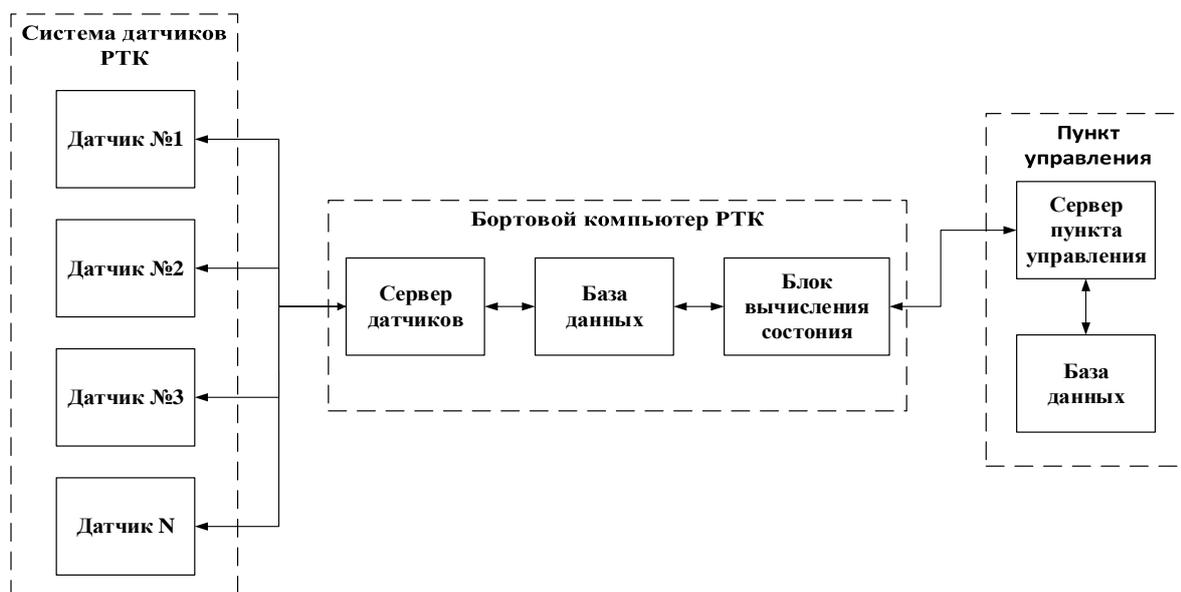


Рис. 1. Структурная схема трехуровневой архитектуры СУБД в РТК

Построение математической модели решения задачи. Для анализа состояний РТК удобно представить модель состояний РТК в виде графа (рис. 2).

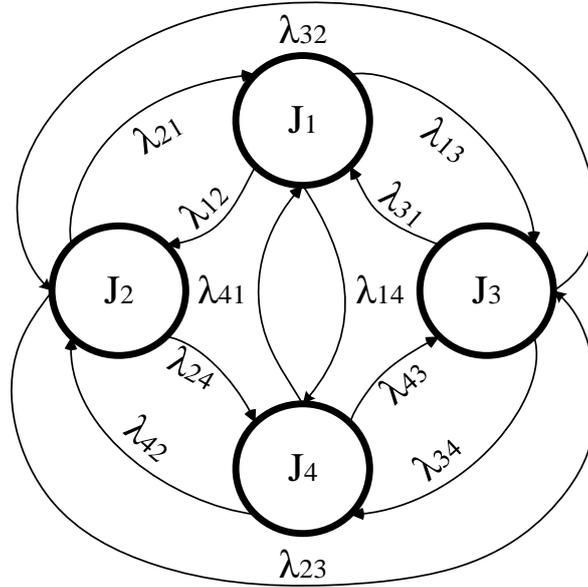


Рис. 2. Размеченный граф возможных состояний РТК:  $\lambda_i$  – плотность вероятности перехода между состояниями, вершины представляют собой различные состояния РТК:  $J_1$  – «исправен»,  $J_2$  – «работоспособен»,  $J_3$  – «неработоспособен»,  $J_4$  – «неисправен»

Для определения состояния РТК в наглядном виде удобно представить числовые значения  $P_{\text{готов}}$  в их словесном эквиваленте (табл. 1), для чего диапазонам значений  $P_{\text{готов}}$  ставится в соответствие одно из возможных состояний РТК [3]. Для примера были взяты рассчитанные диапазоны состояния условного РТК.

Таблица 1

Зависимость состояния РТК от числового значения  $P_{\text{готов}}$

Значение $P_{\text{готов}}$	[0 ; 0,3]	(0,3 ; 0,5]	(0,5 ; 0,75]	(0,75 ; 1,0]
Эквивалентное состояние	Неисправен	Неработоспособен	Работоспособен	Исправен

Обозначим через  $P_i(t)$  вероятность того, что в момент времени  $t$  РТК будет находиться в одном из состояний  $\{J_1, J_2, \dots, J_n\}$ . Очевидно, что

$$\forall t : \sum_{i=1}^n P_i(t) = 1. \tag{1}$$

Предположим, что у данного РТК существуют предельные вероятности. Тогда в соответствии с рис. 2 построим систему дифференциальных уравнений (ДУ) Колмогорова:

$$\begin{cases} 0 = -(\lambda_{12} + \lambda_{13} + \lambda_{14})P_1(t) + \lambda_{21}P_2(t) + \lambda_{31}P_3(t) + \lambda_{41}P_4(t), \\ 0 = -(\lambda_{21} + \lambda_{23} + \lambda_{24})P_2(t) + \lambda_{12}P_1(t) + \lambda_{32}P_3(t) + \lambda_{42}P_4(t), \\ 0 = -(\lambda_{31} + \lambda_{32} + \lambda_{34})P_3(t) + \lambda_{13}P_1(t) + \lambda_{23}P_2(t) + \lambda_{43}P_4(t), \\ 0 = -(\lambda_{41} + \lambda_{42} + \lambda_{43})P_4(t) + \lambda_{14}P_1(t) + \lambda_{24}P_2(t) + \lambda_{34}P_3(t), \\ 1 = P_1(t) + P_2(t) + P_3(t) + P_4(t). \end{cases} \tag{2}$$

Пусть значения интенсивностей отказа будут заданы постоянными (табл. 2).

Таблица 2

Числовые значения интенсивностей отказа  $\lambda_i$

Интенсивность отказа	$\lambda_{12}$	$\lambda_{21}$	$\lambda_{13}$	$\lambda_{31}$	$\lambda_{14}$	$\lambda_{41}$	$\lambda_{23}$	$\lambda_{32}$	$\lambda_{24}$	$\lambda_{42}$	$\lambda_{34}$	$\lambda_{43}$
Числовое значение $\lambda_i$	100	20	30	5	30	40	70	10	25	60	50	15

В соответствии с выражением (2) и табл. 2 были рассчитаны вероятности состояния РТК от времени  $t$  в среде математического моделирования «Mathcad 15». Результат представлен в табл. 3.

Таблица 3

Расчет вероятности состояний РТК

Вероятность состояния	$P_1(t)$	$P_2(t)$	$P_3(t)$	$P_4(t)$
Значение $P_i(t)$	0,107	0,257	0,385	0,251

В соответствии с условием нормировки имеем

$$\sum_{i=1}^4 p_i(10) = P_1(t) + P_2(t) + P_3(t) + P_4(t). \quad (4)$$

Подставив данные из табл. 3 в формулу (4), получим, что условие нормировки выполняется

$$\sum_{i=1}^4 p_i(10) = 0,107 + 0,257 + 0,385 + 0,251 = 1. \quad (5)$$

График зависимости вероятности состояния РТК от времени для заданных в табл. 3 значений интенсивности отказа представлен на рис. 3.

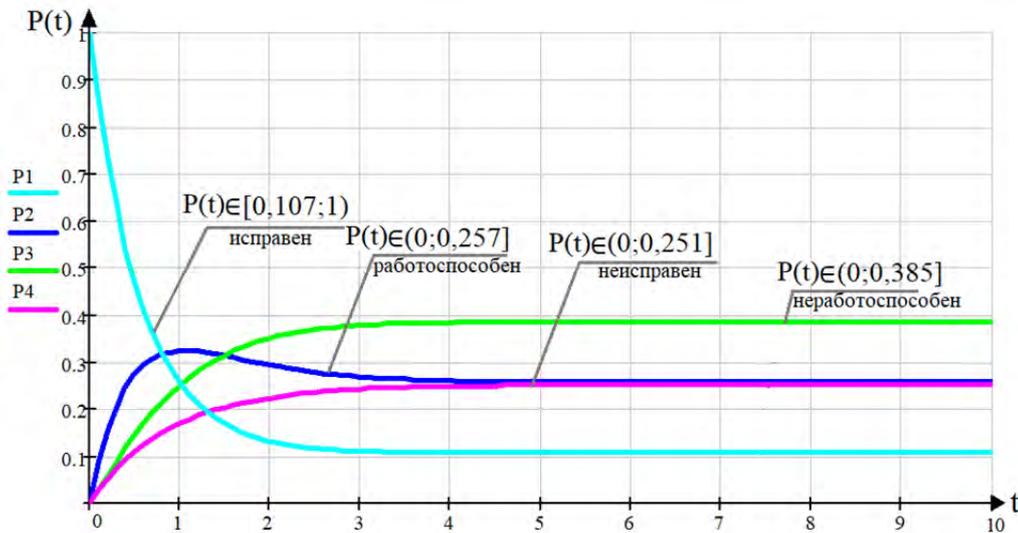


Рис. 3. Вероятностно-временные характеристики возможных состояний РТК

Для построения графика, представленного на рис. 3, была использована среда математического моделирования «Mathcad 15». На интервале времени [0; 3] система оценки состояния РТК находится в стадии переходной работы, затем вероятности перехода достигают финальных состояний и не зависят от времени  $t$ , что дает возможность корректировать возможности комплекса, оказывая воздействие на отдельные характеристики РТК [1, 2].

Коэффициент боевой готовности к выполнению задачи можно получить исходя из потребности к текущему наличию боеприпасов:

$$P_{\text{бр}} = \frac{S}{P}, \quad (6)$$

где  $S$  – ресурс ракет и боеприпасов, рассчитываемый по формуле  $S = w + W$ ,  $w$  – наличие на начало боевых действий,  $W$  – планируемое поступление;  $P$  – потребность в боеприпасах, рассчитываемая по формуле  $P = w + V$ ,  $V$  – объем поступления.

Коэффициент видимости будет иметь следующие значения [4, 5] (табл. 4).

Таблица 4

Коэффициенты видимости для различных типов местности

Тип местности	Рельеф	Относит. превышение высот (м)	$P_{\text{местн}}$
открытая	равнинная	До 25	0,75
полузакрытая	холмистая	25–200	0,5
закрытая	холм. горная	200–1000	0,25

Коэффициент готовности средств разведки вычисляется по следующей формуле [6]:

$$P_{\text{разв}} = \frac{LT}{AT}, \quad (7)$$

где  $LT$  – дальность разведки, применяемой разведывательными средствами РТК в данных условиях видимости;  $AT$  – максимальная дальность разведки, возможная с помощью технических средств.

Коэффициент готовности топлива для прохождения выполнения задачи передвижения можно вычислить по следующей формуле [7, 8]:

$$P_{\text{рес}} = \frac{S_{\text{пути}}}{S_{\text{всего}}}, \quad (8)$$

где  $S_{\text{пути}}$  – путь, который может преодолеть РТК исходя из расчетов топлива;

$$S_{\text{пути}} = U \cdot T_{\text{полета}}, \quad (9)$$

где  $S_{\text{пути}}$  – путь, который необходимо преодолеть;  $U$  – скорость полета беспилотного аппарата;  $T_{\text{полета}}$  – время, необходимое на прохождение всего пути.

Максимальное время нахождения БЛА в воздухе:

$$T_{\text{полета}} = \frac{V_{\text{топлива}}}{Q_{\text{топлива}}}, \quad (10)$$

где  $Q_{\text{топлива}}$  – расход топлива (литров/час);  $V_{\text{топлива}}$  – объем топлива в баке.

При этом стоит учитывать возможность преодоления расстояния:

$$P_{\text{рес}_i} = f(x_i) = \begin{cases} P_{\text{рес}_{i0}}, & x_i < 1, \\ P_{\text{рес}_{i1}}, & x_i \geq 1, \end{cases} \quad (11)$$

где  $P_{\text{рес}_{i0}}$  – состояние, когда РТК не способен преодолеть расстояние [7], необходимое для выполнения боевой задачи;  $P_{\text{рес}_{i1}}$  – состояние, когда РТК способен преодолеть расстояние, необходимое для выполнения боевой задачи.

Коэффициенты влияния метеоусловий на РТК представлены в табл. 5 [4, 5].

Таблица 5

Коэффициенты влияния метеоусловий на проходимость

Рельеф местности	При нормальных погодных условиях	В дождь, снег, распутицу
2	3	4
Равнинная	1,0	0,7
Открытая	0,9	0,63
Полузакрытая	0,8	0,56
Холмистая	0,7	0,49
Холмисто-горная	0,5	0,35
Горная	0,3	0,15

Совокупность всех этих факторов оказывает сильное влияние на возможности РТК, т.е. на коэффициент готовности РТК к выполнению задачи:

$$P_{\text{готовн}} = P_{\text{бг}} \cdot P_{\text{разв}} \cdot P_{\text{местн}} \cdot P_{\text{рес}} \cdot P_{\text{метео}} \quad (12)$$

### Оценка эффективности разработанной методики

Пусть необходимо оценить состояние РТК, для чего сначала нужно рассчитать все составные коэффициенты  $P_{\text{готовн}}$  равенства (12). В качестве исходных данных для расчета составных коэффициентов используются пять различных наборов параметров  $\{N_1, N_2, \dots, N_i\}$  одного РТК [7, 9]. Указанные данные представлены в табл. 6.

Таблица 6

Исходные наборы параметров РТК

$N_i$ / параметр	$N_1$	$N_2$	$N_3$	$N_4$	$N_5$
$w$ (%)	100	100	100	100	100
$W$ (%)	20	20	20	20	20
$V$ (%)	30	30	30	30	30
$LT$ (м)	180	180	180	180	180
$AT$ (м)	200	200	200	200	200
$S_{\text{всего}}$ (км)	200	200	200	200	200
$U$ (км/ч)	70	70	70	70	70
$V_{\text{топлива}}$ (л)	9	10	11	12	13
$Q_{\text{топлива}}$ (л/ч)	5	5	5	5	5
Погода	норма	норма	норма	норма	норма
Высота (м)	175	175	175	175	175
Тип местности	закрытая	полузакр.	полузакр.	открытая	открытая
Рельеф местности	горная	холмистая	холмистая	откр.	равнина
Коэфф. видимости	0,25	0,5	0,5	0,75	0,75
$T_{\text{полета}}$ (ч)	1,8	2	2,2	2,4	2,6

На основе этих данных были рассчитаны коэффициенты в соответствии с формулами (6)–(12), а также данными из табл. 4–6. Результаты расчета представлены в табл. 7.

Таблица 7

Расчет коэффициентов по заданным наборам параметров

$N_i$ / коэффициент	$N_1$	$N_2$	$N_3$	$N_4$	$N_5$
$P_{\text{бг}}$	0,9230769	0,9230769	0,9230769	0,9230769	0,9230769
$P_{\text{разв}}$	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
$P_{\text{местн}}$	0,25	0,5	0,5	0,75	0,75
$P_{\text{рес}}$	0,63	0,7	0,77	0,84	0,91
$P_{\text{метео}}$	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
$P_{\text{готовн}}$	0,091592308	0,203538462	0,223892308	0,366369231	0,3969

На основе данных из табл. 7 были построены графики зависимости коэффициента готовности РТК, представленные на рис. 4.

Анализ зависимостей, представленных на рис. 4 позволяет сделать следующие выводы. Повышение значений отдельных параметров БЛА отражается на коэффициенте готовности  $P_{\text{готовн}}$ , что в свою очередь положительно сказывается на управлении РТК, позволяя своевременно и точно анализировать техническое состояние РТК с БЛА [9].

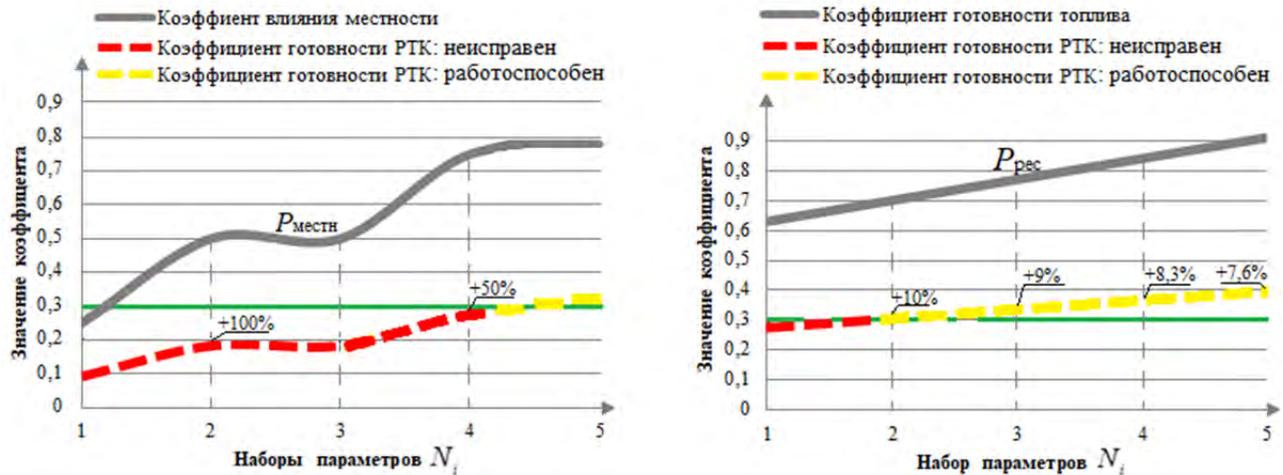


Рис. 4. Результаты влияния входных данных на коэффициент готовности РТК

### Заключение

Из проведенного анализа результатов следует отметить, что диапазон значений  $P_{готов}$  для различных состояний может отличаться в зависимости от множества условий и является уникальным для каждого отдельного типа РТК. Данные из табл. 5, 6 можно разделить на три различных ситуации:

1.  $P_{местн}$  находится в значении 0,25, тогда при любых значениях исходных параметров РТК будет оценен как «неисправен» ( $P_{готов} < 0,3$ ), что не в полной мере будет отражать действительную обстановку в наборах данных  $N_1, N_2$ .

2. В наборе данных  $N_3$  коэффициент влияния местности имеет значение, равное 0,5. Соответственно, значение 0,223892308 недостаточно для достижения технического состояния «работоспособен».

3. В случае данных из наборов  $N_4, N_5$  видно, что повышение  $P_{местн}$  до значения 0,75 привело к повышению значения  $P_{готов}$  (0,366369231 – 0,3969) и переходу РТК в техническое состояние «неработоспособен».

Предложенный в статье метод оценки состояния РТК является универсальным и позволяет РТК успешно диагностировать свое техническое состояние в различных условиях, а использование трехуровневой архитектуры ПО в РТК позволит эффективнее использовать ресурсы управления беспилотными аппаратами в ходе выполнения поставленных задач.

### Список литературы

1. Иванов С. В., Петрова О. В., Запороженко М. Р. [и др.]. Методика оценки оперативности процесса сбора и обработки информации в ходе выполнения полетного задания группой беспилотных летательных аппаратов // Надежность и качество сложных систем. 2021. № 4. С. 64–73.
2. Иванов С. В., Хорольский Е. М. Обработка информационных потоков в мультиагентных робототехнических комплексах в условиях решения разноплановых задач // Вестник Воронежского института МВД России. 2020. № 2. С. 116–124.
3. Ушаков И. А. Оптимальные задачи. М., 1968. 292 с.
4. Гулевич С. П. Обеспечение безаварийного применения беспилотных летательных аппаратов в условиях горного рельефа местности // Проблемы безопасности полетов. 2003. № 9. С. 20–26.
5. Воробьев И. Н. Тактика – искусство боя : учебник. М., 2002. 863 с.
6. Меньшаков Ю. К. Виды и средства иностранных технических разведок. М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2009. 655 с.
7. Гулевич С. П., Исаев С. А. Методика определения гарантийного технического запаса топлива и практической дальности полета беспилотного летательного аппарата // Проблемы безопасности полетов. 2000. № 5. С. 14–21.
8. Гулевич С. П., Александровский Б. В. Обеспечение безаварийного применения беспилотного летательного аппарата по топливу при выполнении полетов в условиях холмистой местности // Проблемы безопасности полетов. 2001. № 7. С. 13–17.

9. Петрова О. В., Иванов С. В., Королев И. Д., Белоножко Д. Г. Математическая модель оценки вероятности безотказной работы системы обработки информации мультиагентного робототехнического комплекса в условиях неопределенности // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2019. Т. 15, № 3. С. 7–15.

### References

1. Ivanov S.V., Petrova O.V., Zaporozhchenko M.R. [et al.]. Methodology for assessing the efficiency of the process of collecting and processing information during the performance of a flight task by a group of unmanned aerial vehicles. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2021;(4):64–73. (In Russ.)
2. Ivanov S.V., Khorol'skiy E.M. Processing of information flows in multi-agent robotics complexes in conditions of solving diverse tasks. *Vestnik Voronezhskogo instituta MVD Rossii = Bulletin of the Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia*. 2020;(2):116–124. (In Russ.)
3. Ushakov I.A. *Optimal'nye zadachi = Optimal problems*. Moscow, 1968:292. (In Russ.)
4. Gulevich S.P. Ensuring trouble-free use of unmanned aerial vehicles in conditions of mountainous terrain. *Problemy bezopasnosti poletov = Problems of flight safety*. 2003;(9):20–26. (In Russ.)
5. Vorob'ev I.N. *Taktika – iskusstvo boya: uchebnik = Tactics – the art of combat : textbook*. Moscow, 2002:863. (In Russ.)
6. Men'shakov Yu.K. *Vidy i sredstva inostrannykh tekhnicheskikh razvedok = Types and means of foreign technical intelligence*. Moscow: MGТУ im. N. E. Bauman, 2009:655. (In Russ.)
7. Gulevich S.P., Isaev S.A. Methodology for determining the guaranteed technical fuel reserve and practical flight range of an unmanned aerial vehicle. *Problemy bezopasnosti poletov = Problems of flight safety*. 2000;(5):14–21. (In Russ.)
8. Gulevich S.P., Aleksandrovskiy B.V. Ensuring trouble-free use of an unmanned aerial vehicle for fuel when performing flights in hilly terrain. *Problemy bezopasnosti poletov = Problems of flight safety*. 2001;(7):13–17. (In Russ.)
9. Petrova O.V., Ivanov S.V., Korolev I.D., Belonozhko D.G. A mathematical model for estimating the probability of trouble-free operation of an information processing system of a multi-agent robotic complex under uncertainty. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Voronezh State Technical University*. 2019;15(3):7–15. (In Russ.)

### Информация об авторах / Information about the authors

#### Станислав Валерьевич Иванов

кандидат технических наук, доцент,  
старший преподаватель,  
Краснодарское высшее военное училище  
имени генерала армии С. М. Штеменко  
(Россия, г. Краснодар, ул. Красина, 4)  
E-mail: sta399@yandex.ru

#### Антон Вадимович Зайченко

курсант,  
Краснодарское высшее военное училище  
имени генерала армии С. М. Штеменко  
(Россия, г. Краснодар, ул. Красина, 4)  
E-mail: zaichenko.an@yandex.ru

#### Евгений Михайлович Хорольский

кандидат технических наук, доцент, доцент  
кафедры автоматизации  
производственных процессов,  
Донской государственный технический университет  
(Россия, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1)  
E-mail: horolskii@mail.ru

#### Stanislav V. Ivanov

Candidate of technical sciences,  
associate professor, senior lecturer,  
Krasnodar Higher Military School  
named after Army General S. M. Shtemenko  
(4 Krasina street, Krasnodar, Russia)

#### Anton V. Zaichenko

Cadet,  
Krasnodar Higher Military School  
named after Army General S. M. Shtemenko  
(4 Krasina street, Krasnodar, Russia)

#### Evgeny M. Khorolsky

Candidate of technical sciences, associate professor,  
associate professor of the sub-department  
of automation of production processes,  
Don State Technical University  
(1 Gagarin square, Rostov-on-Don, Russia)

**Антон Александрович Колесников**

магистрант,

Донской государственной технической университет  
(Россия, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1)

E-mail: sergo1778@mail.ru

**Anton A. Kolesnikov**

Master degree student,

Don State Technical University

(1 Gagarin square, Rostov-on-Don, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /**

**The authors declare no conflicts of interests.**

**Поступила в редакцию/Received 09.09.2021**

**Поступила после рецензирования/Revised 15.12.2021**

**Принята к публикации/Accepted 16.01.2022**

## К ПРОБЛЕМЕ ФОРМИРОВАНИЯ ОБЛИКА ПЕРСПЕКТИВНЫХ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Тхань Лонг Нгуен<sup>1</sup>, Н. А. Кузин<sup>2</sup>, Н. К. Юрков<sup>3</sup>

<sup>1,3</sup> Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

<sup>2</sup> Московский автомобильный институт (технический университет), Москва, Россия

<sup>1</sup>kipra@pngu.ru, <sup>2</sup>sputnik1985nk3y@mail.ru, <sup>3</sup>yurkov\_NK@mail.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Широкое применение беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) как отдельных изделий, так и в комплексе решения сложной многоцелевой задачи обеспечивается развитием техники и технологий. Однако именно множественность вариантов применения БПЛА порождает проблему формирования не избыточной, но достаточной конфигурации каждого отдельного изделия, что связано с проблемой формирования так называемого облика перспективных БПЛА. В работе с учетом принятых начальных условий, ограничений и допущений решена задача оптимизации выбора облика многоцелевой системы БПЛА по признаку стоимости выполнения целевых задач, решаемых в ходе эксплуатации БПЛА. Дается определение базового варианта многоцелевой системы БПЛА в виде набора (вектора) проектных параметров БПЛА, входящих в состав системы. *Материалы и методы.* Поставленная задача относится к классу задач многокритериальной многопараметрической многофакторной идентификации показателей и характеристик сложных организационно-технических систем и их структурно-параметрической оптимизации. Задача решается на основе системного анализа условий функционирования БПЛА методом математического моделирования (в том числе имитационного). Проводятся обоснование и выбор облика проектных векторов параметров и определение ключевых характеристик (вариантов) создания (модернизации) многоцелевой системы БПЛА в условиях многомерного неоднородного множества целевых народно-хозяйственных задач. *Результаты.* Выбор вектора проектных параметров многоцелевой системы БПЛА двойного назначения (ДН) позволяет определить модификацию каждого отдельного типа БПЛА, а именно конструктивные особенности и тактико-технические характеристики БПЛА ДН. *Выводы.* На основе анализа функционирования системы из нескольких типов БПЛА, предназначенной для обслуживания множества целей, определена конфигурация (облик) данной системы, позволяющая в условиях принятых допущений и начальных условий функционирования решить целевые задачи с максимальной вероятностью и минимальной стоимостью. Задача решена с учетом структурных особенностей, конструктивных и функциональных ограничений на параметры применяемых БПЛА.

**Ключевые слова:** беспилотный летательный аппарат, базовый вариант многоцелевой системы, функция распределения целевых задач, целеуказание, начальные условия, ограничения, допущения, стоимость целевых задач

**Финансирование.** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-20318, <https://rscf.ru/project/22-29-20318/>

**Для цитирования:** Нгуен Тхань Лонг, Кузин Н. А., Юрков Н. К. К проблеме формирования облика перспективных беспилотных летательных аппаратов // Надежность и качество сложных систем. 2022. № 1. С. 55–66. doi:10.21685/2307-4205-2022-1-7

## ON THE PROBLEM OF FORMING THE APPEARANCE OF PROMISING UNMANNED AERIAL VEHICLES

Thanh Long Nguen<sup>1</sup>, N.A. Kuzin<sup>2</sup>, N.K. Yurkov<sup>3</sup>

<sup>1,3</sup> Penza State University, Penza, Russia

<sup>2</sup> Moscow Road Institute (Technical University), Moscow, Russia

<sup>1</sup>kipra@pngu.ru, <sup>2</sup>sputnik1985nk3y@mail.ru, <sup>3</sup>yurkov\_NK@mail.ru

**Abstract.** *Background.* The widespread use of unmanned aerial vehicles (UAVs) as individual products, and especially in the complex solution of a complex multi-purpose task, is provided by the development of technology and technology. However, it is the multiplicity of options for the use of UAVs that gives rise to the problem of forming a not redundant, but sufficient configuration of each individual product, which is associated with the problem of forming the so-called appearance of promising UAVs. In the work, taking into account the accepted initial conditions, restrictions and assumptions, the problem of optimizing the choice of the appearance of a multi-purpose UAV system

was solved on the basis of the cost of fulfilling the target tasks that are solved during the operation of the UAV. The definition of the basic version of the multi-purpose UAV system is given in the form of a set (vector) of UAV design parameters that are part of the system. *Materials and methods.* The problem posed belongs to the class of problems of multi-criteria multi-parametric multi-factor identification of indicators and characteristics of complex organizational and technical systems and their structural and parametric optimization. The problem is solved on the basis of a system analysis of the operating conditions of the UAV by the method of mathematical modeling (including simulation). The substantiation and choice of the appearance of design vectors of parameters and the definition of key characteristics (options) for the creation (modernization) of a multi-purpose UAV system in the conditions of a multidimensional heterogeneous set of target national economic tasks are carried out. *Results.* The choice of the vector of design parameters of the multi-purpose dual-purpose UAV (DN) system makes it possible to determine the modification of each individual type of UAV, namely the design features and performance characteristics of the UAV DN. *Conclusions.* Based on the analysis of the functioning of a system of several types of UAVs designed to serve a variety of purposes, the configuration (appearance) of this system is determined, which, under the conditions of the assumptions made and the initial conditions of operation, allows solving target tasks with maximum probability and minimum cost. The problem is solved taking into account the structural features, design and functional restrictions on the parameters of the UAVs used.

**Keywords:** unmanned aerial vehicle, basic variant of a multi-purpose system, target task distribution function, target designation, initial conditions, restrictions, assumptions, cost of target tasks

**Acknowledgments.** The research was carried out at the expense of the grant of the Russian Science Foundation No. 22-29-20318, <https://rscf.ru/project/22-29-20318/>

**For citation:** Nguen Thanh Long, Kuzin N.A., Yurkov N.K. On the problem of forming the appearance of promising unmanned aerial vehicles. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2022;(1):55–66. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2022-1-7

## Введение

БПЛА обычно имеют те же элементы, что и системы на базе пилотируемых летательных аппаратов, но с бортовым элементом, т.е. летательные аппараты изначально проектируются для эксплуатации без экипажа на борту. Экипаж (как подсистема) с его интерфейсами с органами управления самолетом и его жилым помещением заменяется электронной подсистемой разведки и управления.

Другие элементы, т.е. запуск, посадка, восстановление, связь, поддержка и т.д., имеют свои эквиваленты как в пилотируемых, так и в беспилотных системах.

Беспилотный летательный аппарат должен будет летать вне поля зрения оператора, но у него будет нулевой интеллект, он просто будет запущен в заранее запрограммированную миссию по заранее запрограммированному курсу и вернется на базу. Он не общается и результаты миссии, т.е. фотографии, как правило, не получают от него, пока он не будет восстановлен на базе.

С другой стороны, БПЛА будет иметь большую или меньшую степень «автоматического интеллекта». Он сможет связываться со своим контроллером и возвращать данные о полезной нагрузке, такие как электрооптические или тепловизионные и/или телевизионные изображения, вместе с информацией о своем основном состоянии – положением, воздушной скоростью, курсом и высотой. Он также будет передавать информацию о своем состоянии, которую часто называют «служебными данными», включая такие аспекты, как количество топлива, температура компонентов и т.д. двигателей или электроники.

Разработка и эксплуатация беспилотных авиационных систем (БАС) как технологии быстро развивались за последние 30 лет, и, как и в случае со многими новыми технологиями, используемая терминология часто менялась в течение этого периода.

Инициалы RPV (*Remotely piloted vehicle*) дистанционно-пилотируемый аппарат первоначально использовались для обозначения беспилотных летательных аппаратов, но с появлением систем, развешиваемых на наземные или подводные транспортные средства, были приняты другие аббревиатуры или инициалы для уточнения ссылки на бортовые транспортные системы. В прошлом они включали UMA (*Unmanned air vehicle* – беспилотный летательный аппарат), но теперь аббревиатура UAV (*Unmanned (or uninhabited) aerial vehicle* – беспилотный летательный аппарат) обычно используется для обозначения авиационного элемента UAS (*Unmanned aircraft system* – беспилотный летательный аппарат). Однако БПЛА иногда интерпретируют как «необитаемый летательный аппарат».

К современным, а тем более, к перспективным системам беспилотной авиации предъявляются повышенные требования как по количеству, так и по качеству решаемых задач военного и/или гражданского назначения. Поскольку в общем случае все задачи, решаемые системами беспилотной авиации, можно свести к задаче доставки груза в заданную точку и благополучного возвращения на исходную позицию, то рассмотрим пример перспективных беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), представленный на рис. 1.

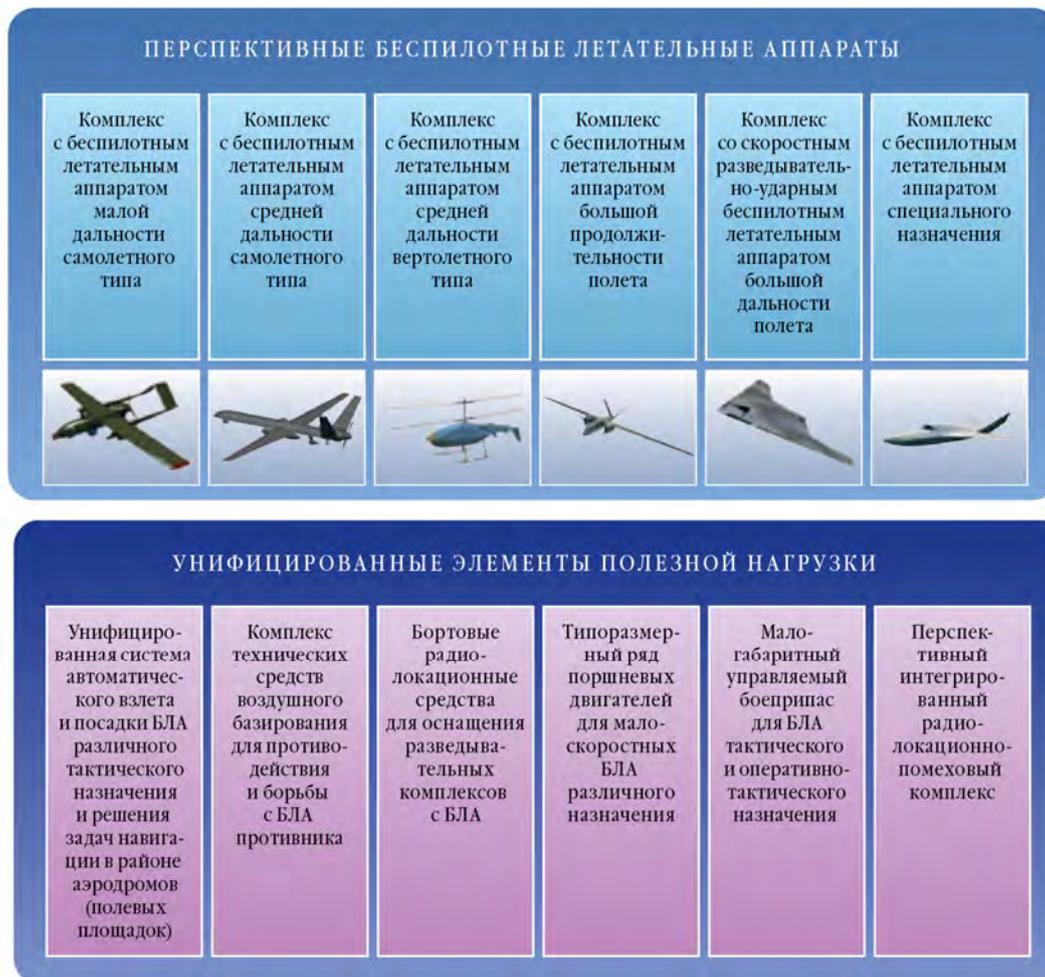


Рис. 1. Ряд перспективных БПЛА, разрабатываемых по заказу Управления перспективных межвидовых исследований и специальных проектов Минобороны России [1]

Даже краткий анализ указанных образцов дает нам право на разработку некоторой методики формирования облика (набора тактико-технических характеристик), который включает в себя большое количество параметров, лежащих в очень широких пределах. В математической постановке подобная проблема сводится к многопараметрической оптимизации динамических структур в условиях неопределенности.

### Постановка задачи

Беспилотный летательный аппарат (сокращенно БПЛА; также известный как дрон) – это любой летательный аппарат, на борту которого нет человека-пилота. БПЛА бывают разных размеров, конструкций и назначений. Первоначально БПЛА просто управлялись дистанционно; однако автономное управление становится все более широко используемым.

Отметим, что индуктивное сопротивление  $D$  крыла самолета зависит от квадрата нагрузки на размах (созданная подъемная сила,  $LN$ , деленная на длину размаха  $[b]$ ), обратной величины плотности воздуха  $\rho$  кг/м<sup>3</sup> и квадрата обратной

$$D_i = k_i(L/b)^2 / q\pi \quad \text{или} \quad D_i = k_i(L/b)^2 / \frac{1}{2}\rho\pi V^2, \quad (1)$$

где  $A_i$  – безразмерный коэффициент, больший единицы, который увеличивает сопротивление в зависимости от потери эффективности крыла из-за плохого распределения подъемной силы, т.е. от идеального эллиптического распределения;  $A$  обычно составляет порядка 1,1 (1);  $L/b$  – нагрузка на пролет в Н/м,  $q$  – аэродинамический напор:  $q = \frac{1}{2}\rho\pi V^2$ .

Другие факторы также создают сопротивление самолета. Эти другие источники сопротивления, которые можно вместе сгруппировать как «паразитное сопротивление», включают сопротивление поверхностного трения, сопротивление формы, интерференционное сопротивление, сопротивление импульса и сопротивление при охлаждении. Их происхождение подробно обсуждается в большинстве книг по аэродинамике самолетов. Необходимо сделать предварительную оценку полного лобового сопротивления самолета путем расчета лобового сопротивления составных частей и их суммирования.

Достаточно сказать, что паразитное сопротивление изменяется в первом порядке на самолете определенной конфигурации в зависимости от плотности воздуха и квадрата воздушной скорости.

На ранних этапах проектирования самолета его сопротивление, наряду с другими аэродинамическими характеристиками, будет измеряться в аэродинамической трубе.

То есть коэффициент паразитного лобового сопротивления  $C_{D_p} = D_p / \frac{1}{2} \rho V^2 S$  так, что паразитное лобовое сопротивление можно оценить для любых условий горизонтального полета с помощью выражения

$$D_p = q C_{D_p} S, \quad (2)$$

где  $S$  – площадь крыла,  $q$  – аэродинамический напор:  $q = \frac{1}{2} \rho V^2$ .

Однако существует еще один термин, который представляет собой повышенное сопротивление, возникающее в результате того, что крыло работает с более высоким углом падения. Этот срок обычно невелик до тех пор, пока крыло не приближается к сваливающемуся состоянию, когда оно становится чрезвычайно большим. Это вызвано повышенным поверхностным трением и сопротивлением формы по мере увеличения угла наклона крыла либо для увеличения подъемной силы, либо для более медленного полета. Увеличение обычно имеет тенденцию к зависимости от квадрата коэффициента подъемной силы  $C_L$ , так что уравнение паразитного сопротивления принимает следующий вид:

$$D_p = (C_{D_p} + C_L^2) q S. \quad (3)$$

Сочетание индуктивного сопротивления и паразитного сопротивления дает общее сопротивление самолета.

Учитывая, что для фиксированной конфигурации индуктивное сопротивление уменьшается пропорционально квадрату обратной величины скорости вращения, в то время как паразитное сопротивление изменяется пропорционально квадрату воздушной скорости, то для получения уменьшения индуктивного сопротивления самолет должен лететь быстрее, но при этом увеличивается паразитное сопротивление. Таким образом, существует промежуточная воздушная скорость, при которой индуктивное сопротивление равно паразитному сопротивлению, а полное сопротивление минимально. Мощность, используемая самолетом, равна произведению полного сопротивления на воздушную скорость, поэтому существует другая воздушная скорость, при которой используемая мощность минимальна.

Существует еще одна скорость полета, обычно превышающая любую из первых, при которой самолет наиболее экономичен с точки зрения расхода топлива на пройденное расстояние. Все эти значения различны на разных высотах и могут иметь большое значение при проектировании самолета в зависимости от его эксплуатационных функций и условий.

Два основных критерия полета с любой заданной воздушной скоростью заключаются в том, что крыло создает достаточную подъемную силу, чтобы противостоять весу самолета и что тяга двигателя (винтового или реактивного) равна или превышает полное сопротивление самолета. С неподвижным крылом, если есть скорость, ниже которой не выполняется ни один из этих критериев, самолет не может поддерживать полет. Эта скорость является абсолютной минимальной скоростью полета. Однако для самолета нецелесообразно пытаться лететь с этой абсолютно минимальной скоростью, поскольку любая турбулентность воздуха или маневр самолета могут увеличить лобовое сопротивление и/или уменьшить подъемную силу, что приведет к сваливанию самолета. Запас скорости выше этого необходим для определения практической минимальной скорости полета  $V_{\min}$ . Эта важная концепция минимальной скорости полета также будет определять скорость, необходимую для взлета или запуска самолета.

Подъемная сила, создаваемая крылом, определяется уравнением

$$L = \frac{1}{2} \rho V^2 S C_L, \quad (4)$$

где  $C_L$  – коэффициент, определяющий способность крыла площадью  $S$  отклонять воздушный поток. Этот коэффициент сам по себе является функцией конструкции сечения крыла, числа Рейнольдса, при котором оно работает, и угла наклона крыла, увеличиваясь по значению с углом наклона и достигая пика при значении  $C_{L_{\max}}$ , выше которого он резко возрастает.

Значение абсолютной минимальной скорости полета получается путем преобразования уравнения (4) в виде

$$V = (2L / \rho S C_{L_{\max}})^{\frac{1}{2}}, \quad (5)$$

но это не дает запаса, как обсуждалось выше. Более реалистичное значение  $V_{\min}$  может быть определено либо путем предоставления запаса по скорости, либо по коэффициенту подъемной силы. Последний подход принят автором:

$$V = (2L / \rho S C_{L_0})^{\frac{1}{2}}. \quad (6)$$

Другие факторы также создают сопротивление самолета. Эти другие источники сопротивления, которые можно вместе сгруппировать как «паразитное сопротивление», включают сопротивление поверхностного трения, сопротивление формы, интерференционное сопротивление, сопротивление импульса и сопротивление при охлаждении. Их происхождение подробно обсуждается в большинстве книг по аэродинамике самолетов.

Проекты создания перспективных мини- и микро-БПЛА требуют решения следующих основных проблем [2]:

а) физического комплексирования: многие из функций системы будут обеспечиваться микроэлектроникой и компонентами на основе МЭМС-технологий.

Перспективные электронные технологии позволяют скомплексировать бортовой процессор и линии связи как ядро системы, которое обеспечивает основные (критические) связи между бортовыми датчиками и наземной станцией, а также с системой управления двигателем. Многофункциональные возможности, потребность в которых определяется ограничениями веса и мощности, могут быть достигнуты только высоко интегрированной конструкцией с физическими компонентами, выполняющими многие функции. Например, крыло может служить в качестве антенны или апертуры датчика. Источник питания может быть интегрирован с конструкцией фюзеляжа и т.д. Подобная степень конструктивной синергетики ранее не требовалась в конструкции традиционных летательных аппаратов;

б) устойчивого управляемого полета – главная технологическая проблема с большим числом неизвестных для проектировщиков малоразмерных БПЛА.

Относительно большие аэродинамические силы и моменты, создаваемые в полете, трудно предсказуемы, но существенны для обеспечения устойчивого полета. Неустойчивые потоки как результат атмосферных порывов или маневрирования аппарата особенно сильно проявляются для летательных аппаратов масштаба мини и микро с несущественным моментом инерции и малой нагрузкой на крыло. Для малогабаритных БПЛА требуется полностью учитывать трехмерную аэродинамику обтекания при более низких числах Рейнольдса, отличную от двумерного обтекания пластины. Интересно отметить, что естественные «летуны» того же масштаба используют другой источник неустойчивой аэродинамики – машущие крылья для создания подъемной силы и тяги.

Стабилизация и управление такими аппаратами требуют быстродействующих автономных систем управления;

в) высокого КПД двигательной установки.

Двигательные установки малого масштаба должны удовлетворять экстраординарным требованиям по энергетической емкости и удельной мощности [3].

Низкие числа Рейнольдса приводят к низкому аэродинамическому качеству, что увеличивает требуемую мощность и снижает КПД винта. При этом необходима высокая энергоемкость источников питания. Потребуется нетрадиционные технологии топливных элементов. Кроме того, для гарантирования скрытности должны быть разработаны акустически тихие двигатели;

г) навигации. Навигация с использованием систем GPS слишком тяжела и энергозатратна для мини- и микро-БПЛА. Применение инерциальной навигации потребует разработки микрогироскопов с низким дрейфом и соответствующих акселерометров.

Полеты в городских кварталах с сужающимися коридорами улиц сложной геометрии, наличие движущихся препятствий определяют условия и ограничения, которые делают неэффективным оперативное участие оператора в управлении полетом для большого количества приложений;

д) надежной связи с пользователем – малые размеры БПЛА приводят к ограничению располагаемой мощности, в том числе для поддержания быстродействия передачи изображений (порядка 2–4 Мбит/с). Сжатие изображений уменьшает требования к быстродействию, но увеличивает бортовую обработку и потребность в энергии. Кроме того, ограничение по электрической мощности исключает использование всенаправленного сигнала из-за его слабости, что требует, в свою очередь, направленных наземных антенн для сопровождения аппарата по линии визирования. Но прямая видимость в городских условиях затруднена, что приводит к необходимости исследования других подходов, например, использования систем связи сотовой архитектуры;

е) полезной нагрузки [4].

Широкий класс динамических систем, в том числе и КБЛА ДН, описывается обобщенной моделью динамической стохастической системы в виде [5]

$$D(t) = \begin{pmatrix} d_{11}(t), d_{12}(t), \dots, d_{1n}(t) \\ d_{21}(t), d_{22}(t), \dots, d_{2n}(t) \\ \dots \\ d_{n1}(t), d_{n2}(t), \dots, d_{nn}(t) \end{pmatrix}; \Psi(Y) = \begin{pmatrix} \Psi_1(Y_1) \\ \Psi_2(Y_2) \\ \dots \\ \Psi_n(Y_n) \end{pmatrix}; G(t) = \begin{pmatrix} g_{11}(t), g_{12}(t), \dots, g_{1m}(t) \\ g_{21}(t), g_{22}(t), \dots, g_{2m}(t) \\ \dots \\ g_{n1}(t), g_{n2}(t), \dots, g_{nm}(t) \end{pmatrix}; Y_0 = \begin{pmatrix} Y_1(t_0) \\ Y_2(t_0) \\ \dots \\ Y_n(t_0) \end{pmatrix}, \quad (7)$$

где выходной и входной векторы  $Y(t)$  и  $X(t)$  – векторы (матрицы-столбцы) размерами  $n \times 1$  и  $m \times 1$ ;  $Y_0$  – матрица начальных условий в  $\lambda$  структуре;  $X(t)$  – входной вектор (матрица-столбец) является случайным,  $Y(t)$  – выходной вектор (матрица-столбец) полагается случайным, т.к. он является реакцией на случайный входной сигнал;  $\Lambda$  – число переключений динамической системы с одной структуры на другую за время  $T = t_k - t_0$ . В каждой структуре динамическая система (1) работает в течение времени  $T_\lambda = t_k^\lambda - t_0^\lambda$ , в котором  $t_0^\lambda$  и  $t_k^\lambda$  – моменты включения и выключения объектов

$\lambda$ -й структуры; при этом следует учесть, что [6]  $t_0 = t_0^1, t_k = t_k^\Lambda, t_k^\lambda = t_0^{(\lambda+1)}, T = \sum_{\lambda=1}^{\Lambda} T_\lambda$ .

Дисперсионные «бортовые» уравнения СУ в скалярной форме (для одной из плоскостей наведения в инерционной системе координат) программного средства обработки информации сигналов измерителя имеют вид [7]

$$\begin{aligned} \dot{P}_{11} &= 2P_{12} - (P_{11} \cdot P_{11}) / Q, & P_{11}(t_0) &= \theta_{11}, \\ \dot{P}_{12} &= P_{22} - P_{13} - (P_{11} \cdot P_{12}) / Q, & P_{12}(t_0) &= \theta_{12}, \\ \dot{P}_{13} &= P_{23} - (P_{11} \cdot P_{13}) / Q - P_{13} / T_{\text{ц}}, & P_{13}(t_0) &= \theta_{13}, \\ \dot{P}_{22} &= 2P_{23} - (P_{12} \cdot P_{12}) / Q, & P_{22}(t_0) &= \theta_{22}, \\ \dot{P}_{23} &= P_{33} - (P_{12} \cdot P_{13}) / Q - P_{23} / T_{\text{ц}}, & P_{23}(t_0) &= \theta_{23}, \\ \dot{P}_{33} &= -2P_{33} / T_{\text{ц}} - (P_{13} \cdot P_{13}) / Q + G / (T_{\text{ц}} \cdot T_{\text{ц}}), & P_{33}(t_0) &= \theta_{33}, \end{aligned} \quad (8)$$

где  $P_{11}, \dots, P_{33}$  – корреляционные моменты ошибок оценивания вектора состояния;  $P_{11}(t_0), \dots, P_{33}(t_0)$  – начальные моменты.

Применение беспилотных летательных аппаратов позволяет распределить многомерные векторы целеуказаний для комплекса БПЛА ДН, что дает уникальную возможность обеспечить реакцию системы на множество управляющих факторов практически одновременно, что крайне важно во многих практически важных случаях и позволяет осуществлять последовательные запуски БПЛА через заданные интервалы времени с требуемой периодичностью [8].

Перспективные системы КБПЛА многоцелевого назначения представляются как некоторая совокупность взаимосвязанных вариантов беспилотных летательных аппаратов, являющихся элементами одного объединяющего их комплекса (многоцелевые системы БПЛА) или нескольких комплексов, которые представляют собой принципиально новый объект проектирования. Основным

требованием при проектировании универсальных многоцелевых систем БПЛА является выбор такого проектного решения, которое дает варианты системы БПЛА, наиболее полно удовлетворяющие требованиям различных целевых задач комплексов. Удовлетворение этих требований достигается на основе проведения системного анализа условий функционирования БПЛА в различных вариантах применения, использования процедур математического моделирования (в том числе и имитационного моделирования), в обосновании и выборе такого проектного решения, которое в наибольшей степени удовлетворяет всем возможным вариантам применения БПЛА и условиям их реального функционирования [9].

Основным преимуществом многоцелевых систем является способность системы БПЛА ДН гибко реагировать на изменение тактической ситуации и компенсировать имеющуюся неопределенность характеристик конкретных целевых заданий. Выигрыш в эффективности достигается при массовом применении многоцелевых систем БПЛА.

Рассмотрим табл. 1, в которой оцениваются технические характеристики мультикоптеров [10].

Таблица 1

Основные технические характеристики привязных мультикоптеров.

Наименование мультикоптера (фирма, страна)	Число винтов, ММК	Максимальная взлетная масса ММК-ВЗЛ, кг	Максимальная масса полезной нагрузки ММК-ПН, кг	Максимальная высота подъема ММК-П, м	Продолжительность полета ТМК-П, м	Максимально допустимая скорость ветра $V_{МК-вд}$ , м/с	Время развертывания ТМК-Р, мин	Максимальная скорость полета $V_{МК-П}$ , км/ч	Геометрические размеры (длина, ширина, высота) / диагональ, м
1. "Tether Eye" (AeroVironment, Inc., США)	4	5	–	45	120	–	–	10	0,8 · 0,8 · 0,3
2. PARC (CyPhy, США)	6	4,2	2,7	152	12	12,8	–	–	0,4 · 0,5 · 0,25
3. UMAR (Dragonfly Pictures Inc., США)	4*	–	–	150	400	–	–	–	–
4. "Flying COW" (AT&T, США)	4*	–	–	91	–	–	–	–	–
5. "Orion" (Elistair, Франция)	6	12,7	3	100	24	9,72	1	35	∅ 1,65
6. "HoverMast-100" (Sky Sapience, Израиль)	5	10	6	50	–	–	15	35	∅ 0,72
7. ETOP (Israel Aerospace Indistries, Израиль)	4	–	20	100	Не ограничено	–	0,5	–	1,6 · 1,6 · 0,2
8. "Matrice 600" (Dajiang Innovation Technology, Китай)	6	15,5	6	100	5	8	–	65	0,72 · 0,8 · 0,36
9. "Альбатрос" Skulle (Micro Multi Copters, КНР)	6	23	12	150	1,5	12	3	50	

Анализ приведенной таблицы показывает, что за рубежом достаточно интенсивно и успешно развивается новый класс моделей для привязных высотных платформ на базе традиционных мультикоптеров, представленных в основном квадрокоптерами и гексакоптерами для решения, в первую очередь, задач мониторинга, разведки и наблюдения, целеуказания, ретрансляции и обеспечения телекоммуникации объектов, обеспечения систем связи и задач управления.

Проведенный анализ основных тактико-технических характеристик представленных моделей мультикоптеров показал, что они имеют ограничения и характеризуются следующими показателями [11]:

- геометрические размеры не превышают 1,65 м;
- максимальная взлетная масса находится в пределах от 4,2 до 23 кг;
- максимальная полезная нагрузка составляет диапазон 2,7–20 кг;
- максимальная высота подъема платформы пока не превышает 152 м;
- максимальная продолжительность работы лежит в пределах от нескольких часов до сотни часов и определяется энергетическими возможностями источников питания и ресурсами основных элементов мультикоптера;
- максимальное значение скорости для порывов ветра не должно превышать 12,8 м/с.

Системы БПЛА имеют много разновидностей и могут подразделяться по следующим признакам [12, 13]:

- параметрический ряд – закономерно построенная в определенном диапазоне совокупность объектов одинакового функционального назначения с регламентированными параметрами и градациями параметров;
- типоразмерный ряд – разновидность параметрического ряда, в качестве главного параметра которого принимается размер изделия (его массогабаритные характеристики). Элементы параметрического (типоразмерного) ряда конструктивно подобны (однотипны);
- конструктивно-унифицированный ряд – параметрический ряд технических объектов, имеющих общие унифицированные элементы.

Наиболее распространенными системами по их конструктивному исполнению в настоящее время являются следующие типы систем БПЛА: адаптивные, групповые и многоцелевые системы.

### ***Постановка задачи формирования облика перспективных КБЛА ДН***

Для создания перспективных многофункциональным КБЛА ДН необходимо решить важную научно-практическую проблему совершенствования методологии создания облика (набора тактико-технических характеристик) многофункциональных КБЛА ДН. Проблема решается на основе совокупности методов, моделей и алгоритмов разработки, оценки эффективности, надежности и качества.

Будем рассматривать многоцелевую систему БПЛА, предназначенную для доставки специальных грузов в заданную точку пространства. Поскольку главной функциональной задачей многоцелевой системы БПЛА является именно доставка полезных грузов в заданные точки, характеризующимися заданной широтой –  $\varphi$ , долготой –  $\lambda$  и высотой –  $H$  [14].

Рассмотрим отдельные характеристики базового варианта многоцелевой системы БПЛА [15].

Предположим, что отдельная точка прицеливания характеризуется координатами по осям  $X$  и  $Z$ , распределенными по нормальному закону:

$$F(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-m}{\sigma}\right)^2}, \quad (9)$$

а координата по высоте  $Y$  распределена по равномерному закону:

$$F(y) = \begin{cases} 0 & \text{если } y < a, \\ \frac{y-a}{b-a}, & \text{если } a \leq y < b, \\ 1 & \text{если } y \geq b. \end{cases} \quad (10)$$

Здесь  $m_x, m_z$  – математические ожидания по соответствующим неконтролируемым факторам  $x_{ц}, z_{ц}$  и  $\sigma_x, \sigma_z$  – среднеквадратичное отклонение по тем же факторам.

В численных расчетах начальное фазовое состояние выбирается в виде

$$x_{ц0} = 0, z_{ц0} = 0. \quad (11)$$

Начальный момент времени  $t_0$  с учетом ошибок целеуказания (ЦУ) фазового состояния точки  $\{x, y\}$  прицеливания выбирается следующим образом.

Целеуказание есть только по координатам точки прицеливания:

$$\begin{aligned} x_0^{ц} &= x_0 + \partial_x \xi; \\ y_0^{ц} &= y_0 + \partial_y \xi, \end{aligned} \quad (12)$$

где  $\xi$  – случайное число с нормальным законом распределения и параметрами  $m_0 = 0, N_0 = 1$  (нормированное распределение);  $\partial_x, \partial_y$  – суммарные среднеквадратические ошибки целеуказания БПЛА:

$$\begin{aligned}\partial_x &= \sqrt{(\partial_x^{ny})^2 + (\partial_x^{kp})^2}; \\ \partial_y &= \sqrt{(\partial_y^{ny})^2 + (\partial_y^{kp})^2}.\end{aligned}\quad (13)$$

Анализ многолетних исследований показывает, что до 90 % операций, проводимых с применением КБЛА, приходится на области пересечения основных показателей качества и функциональной эффективности систем как военного, так и гражданского назначения. В связи с этим актуальна проблема создания многофункциональных КБЛА ДН, способных эффективно решать определенный комплекс народнохозяйственных и специальных задач [15].

Многофункциональный КБЛА – это комплекс, выполняющий функции (задачи) разведки, доставки различных грузов, ретранслятора, мониторинга пространства, патрулирования, который может использоваться в сложной радиационной, химической, бактериологической обстановке и разведках и др. Аналитические методы расчета данных сложных технических систем в сочетании с имитационным моделированием на основе использования алгоритмических методов структурно-параметрического синтеза дают возможность адекватно организовать процесс обоснования и создания новых образцов многофункциональных КБПЛА, структурный состав которых может меняться в зависимости от решаемых задач, их масштабов, видов действий и условий применения КБЛА.

Вектор проектных параметров  $\vec{a}$ , определяющих обликвые характеристики БПЛА, имеет следующий состав [17]:

$$\vec{a} = (P_0, \mu_{ДУ}, m_{кр}, M_0), \quad (14)$$

где  $P_0$  – тяга двигательной установки (ДУ);  $\mu_{ДУ}$  – относительная масса ДУ;  $m_{кр}$  – масса крыла (КР);  $M_0$  – начальная масса БПЛА.

Выбор вектора проектных параметров  $\vec{a}$  соответствует этапу параметрического выбора и на этом этапе определяется модификация каждого отдельного типа БПЛА.

Стратегия распределения целевых задач между элементами системы определяется функцией распределения целевых задач  $E(\vec{\omega})$ , которая определяется элементарными функциями распределения  $e_{ij}$ :  $e_{ij} = 1$ , если  $i$ -я задача выполняется  $j$ -м типом БПЛА и  $e_{ij} = 0$  в противном случае:

$$E(\vec{\omega}) = \{e(1,1), e(1,2), \dots, e(i,j), \dots, e(n,m)\}; i = \overline{1;n}, j = \overline{1;m}, \quad (15)$$

где  $n$  – заданное число целевых задач;  $m$  – заданное число типов БПЛА.

Комплекс с беспилотными летательными аппаратами (КБЛА) – это совокупность взаимосвязанных в единую функциональную систему БЛА и наземных технических средств, обеспечивающих применение БЛА в воздухе и техническую эксплуатацию на земле. Состав КБЛА может меняться в зависимости от масштабов и решаемых задач, объектов действий и условий применения (УП) БЛА.

Для оценки состояния беспилотных систем КБЛА ДН следует создать коэффициенты технического уровня  $K_{тв}$  и технико-экономической эффективности  $K_{тэ}$ , как множества показателей функциональной эффективности и качества, а затем оценить вероятность выполнения поставленной задачи  $P_{пз}$ , связанной со сложным событием  $\theta$ . Для этого нужен либо сам эталонный образец КБЛА ДН, либо его модели, на основе которых можно прогнозировать решение тех или иных задач. Именно разработка новых решений и технологий управления в совершенствовании имеющихся и создания перспективных КБЛА ДН является задачей данной работы.

Очевидно, что на ранней стадии развития и разработки КБЛА ДН (с целью выявить его свойства) нужны адекватные и адаптивные процессам методы, семейства моделей, алгоритмы и программы. Поэтому проблемы и задачи, связанные с созданием измерений показателей качества и функциональной эффективности, технологических концепций и принципов разработки, методов и комплексов моделей структурно-параметрической оптимизации управления современными и перспективными КБЛА требуют своего решения.

Таким образом, нами определены понятия качества и функциональной эффективности КБЛА ДН. Качество комплекса БЛА ДН характеризует соответствие реальных свойств ТТХ всем предъявленным к ней требованиям, в то же время единых критериев качества пока нет. Например, в оптимизации динамических систем за критерий качества принимается критерий эффективности. При разработке промышленного комплекса – стоимость затрат на производство при заданной области допустимых значений показателей эффективности. В военном деле для оценки качества проводимой операции часто пользуются количественным отношением ущерба к собственным возможным потерям (причиненному ущербу). Развиваемые далее в данной работе методы оценки технического состояния и структурно-параметрической оптимизации КБЛА ДН основываются на сравнении выходного сигнала  $Y$  системы (подсистемы) с сигналом требуемым (желаемым)  $Y_T$  (из постановки задачи). По существу, это означает, что в основу оптимизации КБЛА ДН положены признаки, связанные с функционированием системы. Следовательно, за качество системы КБЛА ДН и принимается ее эффективность, точнее, ее условная эффективность. В состав множества условий включаются требования к формированию  $Y$ . Требуемый сигнал  $Y_T$  задается диспетчером из объективных возможностей и целевого назначения разрабатываемой КБЛА. Сигнал  $Y_T$  может быть эталоном (базовым сигналом). Формально связь входного  $X$  и выходного  $Y$  сигналов в диссертационной работе производится с помощью некоторого оператора системы [18].

Данная аэродинамическая схема БЛА выбрана по критериям устойчивости, управляемости и массе полезной нагрузки, таким образом по этим критериям данная аэродинамическая схема является более оптимальной, о чем свидетельствуют и обширные исследования, проведенные авторами. Таким образом, получается увязать все предлагаемые технические и технологические решения в единую схему многокритериального анализа и синтеза предлагаемых алгоритмов (алгоритм-это техническое решение), в том числе и способ с его алгоритмами [19].

Перспективы предлагаемых технических и технологических решений достаточно хорошие, позволяющие улучшить ТТХ имеющихся и перспективных многофункциональных КБЛА ДН, а также увеличить коэффициенты автономности и безопасности полетов БЛА.

### Заключение

В работе предложен подход к проблеме совершенствования методологии разработки обликочных характеристик и представлена в соответствии с разработанным алгоритмом системной стратегии создания КБЛА ДН [20].

### Список литературы

1. Кондратьев А. Перспективы развития и применения беспилотных и роботизированных средств вооруженной борьбы в ВС ведущих зарубежных стран // Зарубежное военное обозрение. 2011. № 5. С. 14–21.
2. Юрков Н. К., Полтавский А. В. Отбор операторов автоматизированных рабочих мест многофункциональным комплексам беспилотных летательных аппаратов // Надежность и качество сложных систем. 2019. № 1. С. 70–76. doi: 10.21685/2307-4205-2019-1-8
3. Ильинский Н. Б., Абзалилов Д. Ф. Математические проблемы проектирования крыловых профилей. Казань : Казанский университет, 2011. 284 с.
4. Лопота А. В., Николаев А. Б. Беспилотные летательные аппараты. М., 2015. 18 с.
5. Балык В. М., Комягин В. А. Надежность и эффективность двухсредных летательных аппаратов : учеб. пособие. М. : Изд-во МАИ, 2005. 160 с.
6. Reznik S. V., Prosuntsov P. V., Azarov A. V. Substantiation of the structural-layout scheme of the mirror-space-antenna reflector with a high shape stability and a low density per unit length // Journal of engineering physics and thermophysics. 2015. Vol. 88, № 3. P. 699–705. doi: 10.1007/s10891-015-1239-x
7. Годунов А. И., Шишков С. В., Юрков Н. К. Комплекс обнаружения и борьбы с малогабаритными беспилотными летательными аппаратами // Надежность и качество сложных систем. 2014. № 2. С. 62–70.
8. Полтавский А. В., Жумабаева А. С., Бикеев Р. П. Имитационное моделирование характеристик комплекса беспилотных летательных аппаратов // Надежность и качество сложных систем. 2015. № 4. С. 16–23.
9. Полтавский А. В., Юрков Н. К., Семенов С. С. Информатизация образования: семантика термина «беспилотный летательный аппарат» // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2018. Т. 1. С. 301–302.
10. Адамов А. П., Адамова А. А., Герасимов Н. В. Анализ эксплуатации мультикоптеров с позиции надежности и безопасности // Надежность и качество сложных систем. 2017. № 3. С. 86–93. doi:10.21678 5/2307-4205-2017-3-13

11. Гордиенко А. В., Припадчев А. Д. К вопросу автоматизированного проектирования облика беспилотного летательного аппарата самолетной схемы // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2013. № 4. С. 911–913.
12. Балык В. М., Игнатъев И. Н., Кулакова Р. Д. [и др.]. Выбор оптимальных законов управления летательным аппаратом по аппроксимирующим алгоритмам // Сб. тезисов докладов XXX чтений К. Э. Циолковского. Калуга, 2003. Ч. II. С. 79–80.
13. Балык В. М. Статистический синтез проектных решений при разработке сложных систем. М. : Изд-во МАИ, 2011. 280 с.
14. Бецов А. В., Прокопьев И. В. Анализ живучести беспилотного летательного аппарата // Надежность и качество сложных систем. 2014. № 2. С. 3–6.
15. Балык В. М., Ильичев А. В., Сорокин В. А. Методы принятия проектных решений на основе моделей эффективности двухсредного летательного аппарата : учеб. пособие. М. : Изд-во МАИ, 2015. 220 с.
16. Полтавский А. В., Юрков Н. К. Модификация модели системы управления подвижным объектом // Надежность и качество сложных систем. 2014. № 1. С. 65–70.
17. Тарасов Е. В., Балык В. М. Методы проектирования летательных аппаратов : учебник. М. : Изд-во МАИ, 2006. 96 с.
18. Юрков Н. К., Жумабаева А. С., Полтавский А. В. Алгоритм определения индикатрисы излучения подвижного объекта на примерах робототехнического комплекса беспилотных летательных аппаратов // Надежность и качество сложных систем. 2015. № 3. С. 23–30.
19. Юрков Н. К., Жумабаева А. С., Полтавский А. В. Алгоритм определения индикатрисы излучения подвижного объекта на примерах робототехнического комплекса беспилотных летательных аппаратов // Надежность и качество сложных систем. 2015. № 3. С. 23–30.
20. Юрков Н. К., Жумабаева А. С., Полтавский А. В. К проблеме модельного синтеза комплексов беспилотных летательных аппаратов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2017. № 1. С. 70–77.

### References

1. Kondrat'ev A. Prospects for the development and application of unmanned and robotic means of military warfare in the armed forces of leading foreign countries. *Zarubezhnoe voennoe obozrenie = Foreign Military Review*. 2011;(5):14–21. (In Russ.)
2. Yurkov N.K., Poltavskiy A.V. Selection of operators of automated workplaces for multifunctional complexes of unmanned aerial vehicles. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2019;(1):70–76. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2019-1-8
3. Il'inskiy N.B., Abzalilov D.F. *Matematicheskie problemy proektirovaniya krylovykh profiley = Mathematical problems of designing wing profiles*. Kazan: Kazanskiy universitet, 2011:284. (In Russ.)
4. Lopota A.V., Nikolaev A.B. *Bespilotnye letatel'nye apparaty = Unmanned aerial vehicles*. Moscow, 2015:18. (In Russ.)
5. Balyk V.M., Komyagin V.A. *Nadezhnost' i effektivnost' dvukhsrednykh letatel'nykh apparatov: ucheb. posobie = Reliability and efficiency of two-medium aircraft: textbook*. Moscow: Izd-vo MAI, 2005:160. (In Russ.)
6. Reznik S.V., Prosuntsov P.V., Azarov A.V. Substantiation of the structural-layout scheme of the mirror-space-antenna reflector with a high shape stability and a low density per unit length. *Journal of engineering physics and thermophysics*. 2015;88(3):699–705. doi:10.1007/s10891-015-1239-x
7. Godunov A.I., Shishkov S.V., Yurkov N.K. Complex of detection and control of small-sized unmanned aerial vehicles. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2014;(2):62–70. (In Russ.)
8. Poltavskiy A.V., Zhumabaeva A.S., Bikeev R.R. Simulation modeling of characteristics of a complex of unmanned aerial vehicles. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2015;(4):16–23. (In Russ.)
9. Poltavskiy A.V., Yurkov N.K., Semenov S.S. Informatization of education: semantics of the term "unmanned aerial vehicle". *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2018;1:301–302. (In Russ.)
10. Adamov A.P., Adamova A.A., Gerasimov N.V. Analysis of multicopter operation from the perspective of reliability and safety. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2017;(3):86–93. (In Russ.). doi:10.21678 5/2307-4205-2017-3-13
11. Gordienko A.V., Pripadchev A.D. On the issue of computer-aided design of the appearance of an unmanned aerial vehicle of an airplane scheme. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk = Izvestiya Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2013;(4):911–913. (In Russ.)
12. Balyk V.M., Ignat'ev I.N., Kulakova R.D. [et al.]. The choice of optimal control laws of the aircraft by approximating algorithms. *Sb. tezisov dokladov KhKhKh chteniy K. E. Tsiolkovskogo = Collection of abstracts of the XXX readings of K. E. Tsiolkovsky*. Kaluga, 2003;(pt. II):79–80. (In Russ.)

13. Balyk V.M. *Statisticheskiy sintez proektnykh resheniy pri razrabotke slozhnykh system = Statistical synthesis of design solutions in the development of complex systems*. Moscow: Izd-vo MAI, 2011:280. (In Russ.)
14. Betskov A.V., Prokop'ev I.V. Analysis of the survivability of an unmanned aerial vehicle. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2014;(2):3–6. (In Russ.)
15. Balyk V.M., Il'ichev A.V., Sorokin V.A. *Metody prinyatiya proektnykh resheniy na osnove modeley effektivnosti dvukhsrednogo letatel'nogo apparata: ucheb. posobie = Methods of making design decisions based on models of the efficiency of a two-medium aircraft : textbook*. Moscow: Izd-vo MAI, 2015:220. (In Russ.)
16. Poltavskiy A.V., Yurkov N.K. Modification of the model of a mobile object control system. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2014;(1):65–70. (In Russ.)
17. Tarasov E.V., Balyk V.M. *Metody proektirovaniya letatel'nykh apparatov: uchebnik = Methods of designing aircraft : textbook*. Moscow: Izd-vo MAI, 2006:96. (In Russ.)
18. Yurkov N.K., Zhumabaeva A.S., Poltavskiy A.V. Algorithm for determining the radiation indicatrix of a moving object on the examples of a robotic complex of unmanned aerial vehicles. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2015;(3):23–30. (In Russ.)
19. Yurkov N.K., Zhumabaeva A.S., Poltavskiy A.V. Algorithm for determining the radiation indicatrix of a moving object on examples of a robotic complex of unmanned aerial vehicles. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2015;(3):23–30. (In Russ.)
20. Yurkov N.K., Zhumabaeva A.S., Poltavskiy A.V. To the problem of model synthesis of unmanned aerial vehicle complexes. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2017;(1):70–77. (In Russ.)

### Информация об авторах / Information about the authors

**Тхань Лонг Нгуен**

соискатель,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: kipra@pngu.ru

**Thanh Long Nguyen**

Applicant,  
Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Николай Андреевич Кузин**

студент,  
Московский автодорожный институт  
(технический университет)  
(Россия, г. Москва, Ленинградский пр. 64)  
E-mail: sputnik1985nk3y@mail.ru

**Nikolai A. Kuzin**

Student,  
Moscow Road Institute (Technical University)  
(64 Leningradsky avenue, Moscow, Russia)

**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 K. Yurkov**

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

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /  
The authors declare no conflicts of interests.**

**Поступила в редакцию/Received 27.09.2021**

**Поступила после рецензирования/Revised 10.10.2021**

**Принята к публикации/Accepted 10.11.2021**

# ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИИ В ПРИБОРОСТРОЕНИИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКЕ

## DESIGN AND TECHNOLOGY IN INSTRUMENTATION AND RADIO ELECTRONICS

УДК 519.873

doi:10.21685/2307-4205-2022-1-8

### ЭФФЕКТИВНОСТЬ РЕЗЕРВИРОВАНИЯ ИЗБЫТОЧНОЙ СИСТЕМЫ ПОСРЕДСТВОМ СУПЕРВИЗОРОВ КОНФИГУРАЦИЙ

А. М. Агеев<sup>1</sup>, В. Н. Буков<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина, Воронеж, Россия

<sup>2</sup> Научно-исследовательский институт авиационного оборудования, Жуковский, Россия

<sup>1</sup> ageev\_bbc@mail.ru, <sup>2</sup> v\_bukov@mail.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Путь к созданию высоконадежной техники, каждая отдельная часть которой в силу ряда факторов обладает ограниченной надежностью, заключается в разработке реконфигурируемых систем с избыточным числом разнородных компонентов. Задачей статьи является изложение особенностей развиваемого авторами подхода к управлению избыточностью на основе супервизоров конфигураций, а также анализ достигаемых при этом результатов. *Материалы и методы.* Излагаются принципиальные особенности подхода к управлению избыточностью технических систем с использованием супервизоров конфигураций, заключающиеся в обособлении всех средств поддержки каждой конфигурации, а также применении процедур парного арбитража конфигураций и вычислителей. Такой арбитраж позволяет по формируемым матрицам предпочтения выбирать из числа располагаемых вычислителей и конфигураций такие, которые обладают гарантированной исправностью и при необходимости другими преимуществами перед альтернативами. С использованием анализа структурных схем и расчетов основных характеристик отказоустойчивости проводится оценка эффективности подхода в сравнении с известными подходами к управлению резервированием. *Результаты.* Сравнение предложенной схемы системы управления избыточностью со схемами известных подходов показало ощутимое преимущество. *Выводы.* Использование высоконадежной системы управления избыточностью предложенного типа позволит реализовывать требуемые уровни надежности бортовых комплексов с избыточным числом разнородных ресурсов.

**Ключевые слова:** комплекс бортового оборудования, оценка надежности, резервирование, реконфигурирование, управление избыточностью, супервизор конфигурации

**Для цитирования:** Агеев А. М., Буков В. Н. Эффективность резервирования избыточной системы посредством супервизоров конфигураций // Надежность и качество сложных систем. 2022. № 1. С. 67–82. doi:10.21685/2307-4205-2022-1-8

### EFFICIENCY OF REDUNDANT SYSTEM THROUGH CONFIGURATION SUPERVISORS

A.M. Ageev<sup>1</sup>, V.N. Bukov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy, Voronezh, Russia

<sup>2</sup> Research Institute of Aviation Equipment, Zhukovsky, Russia

<sup>1</sup> ageev\_bbc@mail.ru, <sup>2</sup> v\_bukov@mail.ru

**Abstract.** *Background.* The path to the creation of highly reliable equipment, each separate part of which, due to several factors, has limited reliability, is to develop reconfigurable systems with an excessive number of heterogeneous components. The objective of the article is to summarize the characteristics of the authors of the approach to managing redundancy based on configuration supervisors, as well as the analysis of the results achieved. *Materials and methods.* The principal features of the approach to the reduction management of technical systems using configuration supervisors, which consist in the separation of all means of supporting each configuration, as well as the use of paired arbitration procedures for configurations and computers. Such arbitration allows for the preferences formed preference matrices from among the disposable computers and configurations such that have guaranteed health and, if necessary, other advantages over alternatives. Using the analysis of structural schemes and calculations of the basic characteristics of fault tolerance, an assessment of the effectiveness of the approach in comparison with the well-known approaches to reservation management is carried out. *Results.* Comparison of the proposed system of redundancy management system with schemes of known approaches showed a tangible advantage. *Conclusions.* The use of a highly reliable redundancy management system of the proposed type will allow the required levels of reliability of onboard complexes with an excessive number of heterogeneous resources.

**Keywords:** onboard complex, reliability assessment, redundancy, reconfiguration, redundancy management, configuration supervisor

**For citation:** Ageev A.M., Bukov V.N. Efficiency of redundant system through configuration supervisors. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2022;(1):67–82. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2022-1-8

## Введение

Системы с управляемой избыточностью [1, 2], а в другой терминологии саморемонтируемые или самовосстанавливаемые [3], реконфигурируемые [4], реструктурируемые [5], самопроектируемые и отказоустойчивые [6] системы, вызывают все более возрастающий интерес как в научных, так и в конструкторских кругах. Сегодня уже не вызывает сомнения, что разработка такого рода систем – это путь к созданию высоконадежной техники, каждая отдельная часть которой в силу действия технических, технологических, экономических и других факторов обладает ограниченной надежностью.

Наряду с крупномасштабными сетевыми и технологическими системами в последние десятилетия стала превалировать тенденция к преднамеренной избыточности создаваемых комплексов бортового оборудования (КБО) подвижных технических объектов различного назначения (наземных, морских, авиационных). Сказанное, в частности, иллюстрирует многообразие направлений соответствующих исследований и сформулированных решений для достижения заданной отказоустойчивости [7–10] техники.

Задачей настоящей статьи является краткое изложение особенностей развиваемого авторами подхода к повышению отказоустойчивости систем с управляемой избыточностью на основе супервизоров конфигураций [11–14], а также анализ достигаемых при этом результатов и их сопоставление с результатами других известных подходов.

## Особенности подхода с супервизорами конфигураций

Избыточный КБО, рассматриваемый здесь как объект управления избыточностью<sup>1</sup>, содержит:

а) избыточное число в общем случае разнородных (различные интерфейсы) и неуниверсальных (различные функциональные возможности) аппаратных и/или программных компонентов, как правило, со встроенными средствами контроля (ВСК);

б) распределенную бортовую интегрированную вычислительную среду (БИВС), образующую единое информационное пространство, в составе:

– бортовой центральной вычислительной системы (БЦВС) с резервированными вычислителями, объединенными центральной сетью,

– периферийных систем и устройств с локализованными в них вычислительными средствами, часто профильного назначения и с обусловленными этим особенностями,

<sup>1</sup> Под управлением избыточностью предложено понимать целенаправленное управление включением/исключением в/из работы избыточных ресурсов комплекса оборудования с целью обеспечения отказоустойчивости, функциональной реконфигурации и адаптации к условиям его работы и выполняемым задачам.

– коммуникационных средств (коммутаторы, концентраторы, шины), выполняющих доставку данных к распределенным аппаратным составляющим;

в) программные средства управления избыточностью, реализующие функции идентификации и безопасного парирования (путем маскирования или реконфигурирования) возникающих в КБО и БИВС отказов, сбоев и программных ошибок.

Развиваемый подход к управлению избыточностью предусматривает наличие самодостаточных программных объектов (программных модулей) по числу заранее просчитанных конфигураций, как показано на рис. 1. Каждый такой объект, функционирующий в составе системы управления избыточностью и называемый *супервизором конфигурации* (СК), периодически осуществляет мониторинг готовности включенных в конфигурацию компонентов  $K_i$ , участвует в арбитраже между всеми СК с целью выбора доминирующего СК (ДСК), соотношенного с предпочтительной конфигурацией, и управляет реализацией этой конфигурации в случае победы в арбитраже.

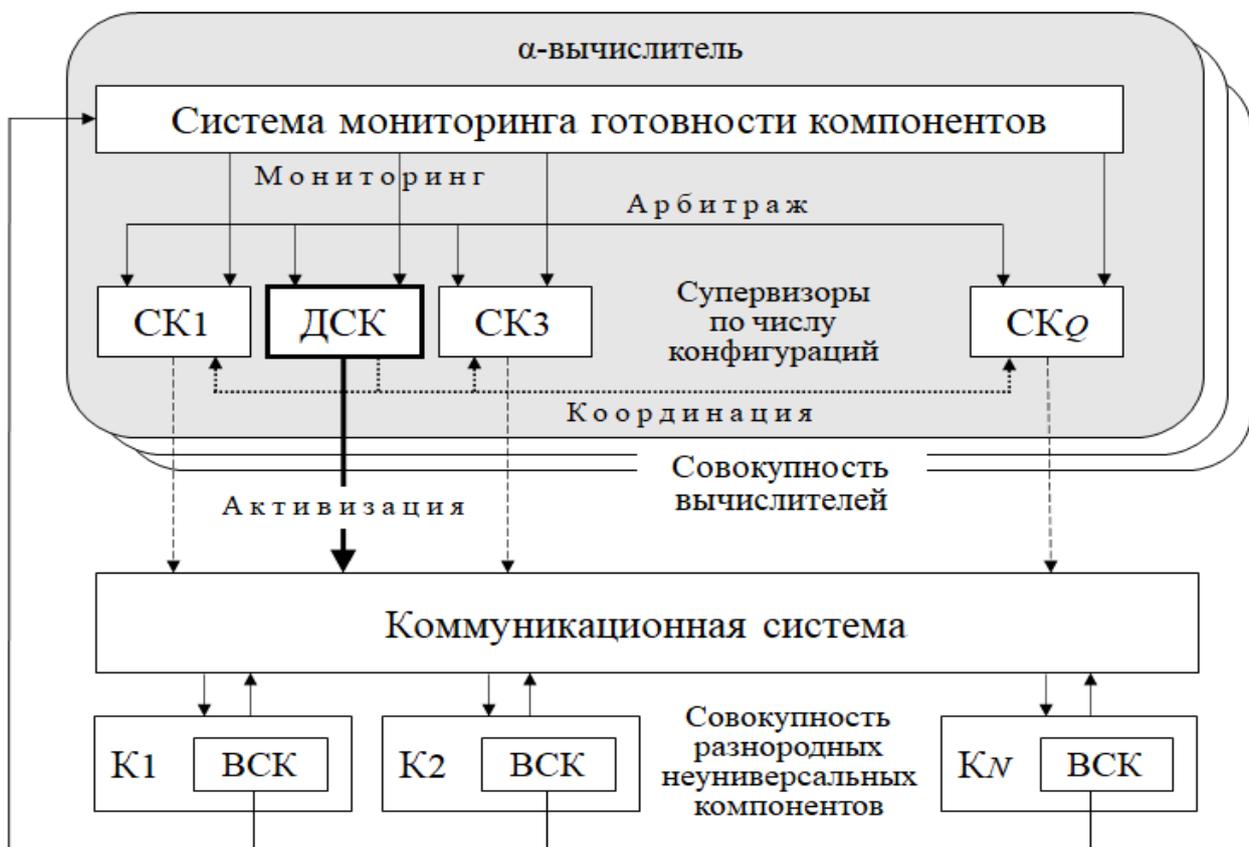


Рис. 1. Место и роль супервизоров конфигураций в архитектуре КБО

Одинаковый набор супервизоров по числу непротиворечивых конфигураций формируется на этапе проектирования и размещается во всех выделенных под задачи управления избыточностью вычислителях БЦВС.

Арбитраж является ключевым ядром в вопросе повышения отказоустойчивости системы, основанной на СК в целом. Он состоит из связанных между собой парного арбитража конфигураций (ПАК), где выбирается ДСК [13], и парного арбитража вычислителей (ПАВ), в результате которого выбирается  $\alpha$ -вычислитель, реализующий ДСК и предпочтительную конфигурацию. Принципиально то, что организация парного арбитража позволяет одновременно выбрать предпочтительный объект арбитража и указать (по обстоятельствам окончательно или предположительно) имеющие место ошибки средств выполнения арбитража (самодиагностика средств диагностики).

#### *Арбитраж вычислителей*

В процессе выполнения ПАВ два вычислителя пары, выбираемой на предварительном этапе, независимо формируют так называемую матрицу предпочтений (МП)

$$D_{\text{ПАВ}} = \begin{pmatrix} & \text{СКа1} & \text{СКа2} \\ \text{СКк1} & \begin{bmatrix} d_1^1 & d_1^2 \end{bmatrix} \\ \text{СКк2} & \begin{bmatrix} d_2^1 & d_2^2 \end{bmatrix} \end{pmatrix},$$

где  $d_i^j$  – бинарный индекс предпочтения  $i$ -го вычислителя (работоспособность, готовность и отсутствие ошибок конфигураций СКк $i$ ), определенный анализатором СКа $j$ , размещенным в  $j$ -м вычислителе: «1» – есть предпочтение, «0» – нет предпочтения.

Согласно табл. 1 значениям  $D_{\text{ПАВ}}$  ставятся в соответствие определенные предпочтения вычислителей пары. В общей сложности 16 различных значений  $D_{\text{ПАВ}}$  в 13 случаях позволяют однозначно выбрать предпочтительный вычислитель (группы значений I, II, III), а в 3 соответствуют отрицательному завершению арбитража, не разрешаемому средствами ПАВ (группа значений IV, поднятая серым цветом).

Таблица 1

Значения матрицы предпочтений при ПАВ

Группа значений	Предпочтения выбора $\alpha$ -вычислителя	Ошибки анализатора				отсутствуют
		СКа1		СКа2		
		ложная «1»	ложный «0»	ложная «1»	ложный «0»	
I	вычислитель 1	$\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$
II	вычислитель 2	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$
III	любой	$\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}^*$	$\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}^*$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}^*$
IV	никакой	$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$				

\*Допускается любая из представленных комбинаций ошибок.

Значения  $D_{\text{ПАВ}}$  из группы IV требуют одновременной замены пары вычислителей и повторения арбитража или использования других способов распределения предпочтений.

*Арбитраж конфигураций*

В процессе выполнения ПАК в выбранном  $\alpha$ -вычислителе попарно анализируются доступные (заблаговременно рассчитанные) конфигурации с формированием соответствующих МП

$$Q_{\text{ПАК}} = \begin{pmatrix} & \text{МА1} & \text{МА2} \\ \text{ОА1} & \begin{bmatrix} q_1^1 & q_1^2 \end{bmatrix} \\ \text{ОА2} & \begin{bmatrix} q_2^1 & q_2^2 \end{bmatrix} \end{pmatrix},$$

где  $q_i^j$  – бинарный индекс предпочтения  $i$ -го объекта арбитража (ОА), определенный модулем арбитража (МА)  $j$ -го СК в  $\alpha$ -вычислителе: «1» – есть предпочтение, «0» – нет предпочтения. Под объектом арбитража понимаются следующие сравниваемые характеристики конфигурации:

- индекс готовности (ИГ), формируемый по данным мониторинга ВСК компонентов и характеризующий исправность всех компонентов конфигурации и связей между ними, загрузку и инициализацию необходимых программ и т.п.;
- показатель функциональной эффективности (ПФЭ), интегрально характеризующий сравниваемые свойства конфигурации (эффективность, точность, экономичность и др.);
- идентификатор конфигурации.

Рассмотрим случай, допускающий в отличие от ПАВ углубленную оценку двух конфликтных ситуаций путем взаимной замены входов МА конкурирующей пары супервизоров и проведение повторного арбитража на 2-м акте, как показано в табл. 2.

Таблица 2

Значения матрицы предпочтений при ПАК

Группа значений	Предпочтения СК	1 акт					2 акт		
		Ошибки анализатора МА					Конфликты 1 акта	Ошибки анализатора МА	
		отсутствует	МА1		МА2			МА1	МА2
			ложная «1»	ложный «0»	ложная «1»	ложный «0»		ложный «0»	ложный «0»
I	СК1	$\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$
II	СК2	$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$
III	никакой	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$							

Результатами ПАК являются 16 различных значений  $Q_{ПАК}$ , включая два конфликтных значения по итогам 1-го акта арбитража, которые успешно разрешаются на 2-м акте. По 12 из них делается однозначный выбор предпочтительной конфигурации, удовлетворяющей обобщенным требованиям (полная готовность к работе и наилучший ПФЭ), а 4 значения (подняты серым цветом) соответствуют конфликтам, неразрешимым средствами ПАК.

В последнем случае проводится процедура ПАК в другой паре СК. При этом конфликтующие супервизоры могут участвовать в арбитраже последующих циклов.

**Схемы управления избыточностью систем**

Из всего многообразия избыточных технических систем рассмотрим варианты, с одной стороны, адаптированные к различным подходам повышения их отказоустойчивости, а с другой стороны, позволяющие провести сравнительный анализ достигаемого эффекта. Обращаем внимание, что центром внимания является комплекс оборудования, образованный объединением в общем случае неоднородных и неуниверсальных компонентов. Вычислительные или другие средства в части управления избыточностью играют в рассматриваемом контексте обеспечивающую роль, в дальнейших рассуждениях будем обобщенно относить их к системе управления избыточности (СУИ).

*Схема А. Резервирование конфигурации целиком*

Одним из первых освоенных путей парирования отказов является резервирование конфигураций целиком, известное как технология общего резервирования [15, 16]. Соответствующая схема приведена рис. 2, все аппаратные и программные<sup>1</sup> компоненты разбиты на группы ресурсов  $K_i$ ,  $i = \overline{1, K}$ , каждая из которых содержит компоненты  $k_{i,j}$ ,  $j = \overline{1, N_i}$ .

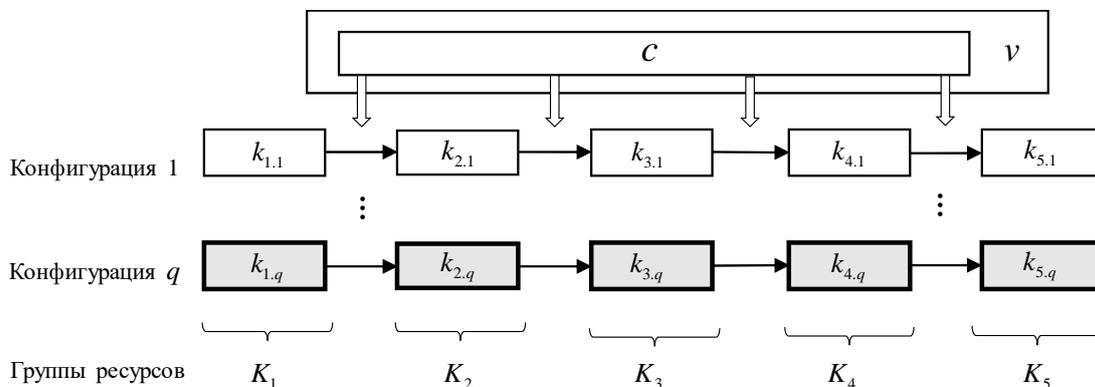


Рис. 2. Схема А резервирования конфигураций целиком

<sup>1</sup> Речь идет о программах, обеспечивающих функционирование конфигурации, а не связанных с управлением избыточностью.

Без потери общности здесь и в дальнейшем будем полагать, что каждая конфигурация  $q = \overline{1, Q}$  содержит по одному компоненту  $k_{i,q}$  из каждой группы ресурсов  $K_i$ . Таким образом, для очередной конфигурации требуется новый набор всех типов ресурсов, используемых системой для выполнения ее функций. Логическая система выбора конфигурации (управления избыточностью)  $c$ , размещенная в вычислителе  $v$ , является, как правило, не резервируемой.

Очевидными недостатками является высокая затратность по компонентам и низкий уровень вариативности (гибкости использования располагаемых компонентов). Примером систем с общим резервированием является предложение по разработке систем ориентации спутников Земли [15].

*Схемы Б. Покомпонентное резервирование*

Наиболее очевидным и часто используемым путем парирования отказов технических устройств является раздельное покомпонентное резервирование [13, 14], т.е. прямое применение автономной избыточности в пределах пространственно и функционально ограниченных фрагментов (подсистем, узлов, деталей, модулей) системы.

При этом в зависимости от особенностей системы и возможностей коммутационного оборудования различают схемы с явным наличием узких мест (bottleneck – bn), когда присутствуют не резервируемые пограничные части [16], как показано на рис. 3, и с более сложными коммутациями типа «каждый с каждым», показанными на рис. 4. В том и другом случаях управление ресурсами осуществляется независимо в каждой группе  $K_i$  посредством локальных реконфигурирующих органов  $l_i$ .

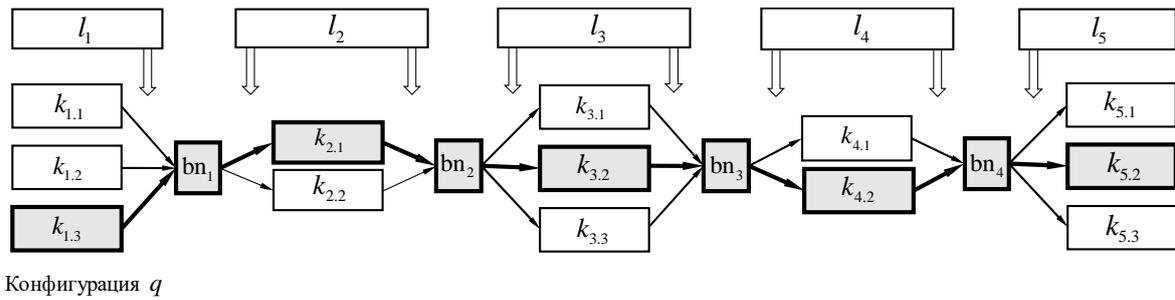


Рис. 3. Схема Б1 покомпонентного резервирования с наличием узких мест

Последняя из схем – логичный шаг в развитии современных цифровых информационно-управляющих систем и является основой для построения интегрированной модульной авионики (ИМА) [17]. Такой вариант межкомпонентных коммуникаций предлагается использовать в дальнейшем, в том числе и в предлагаемом подходе с супервизорами конфигураций.

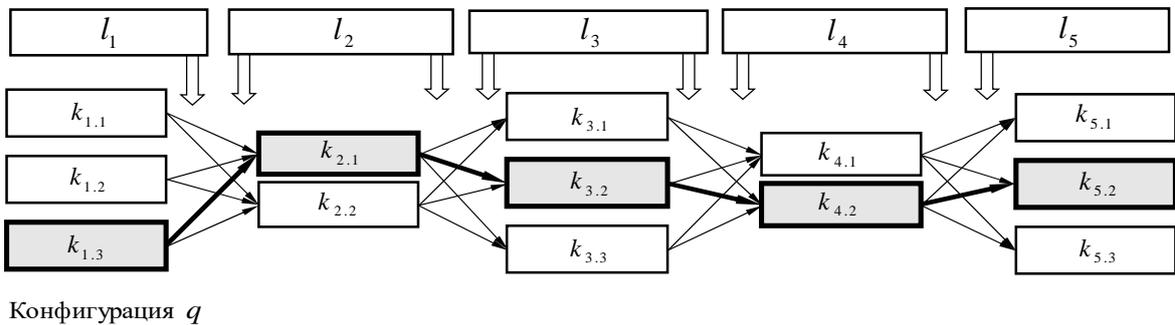
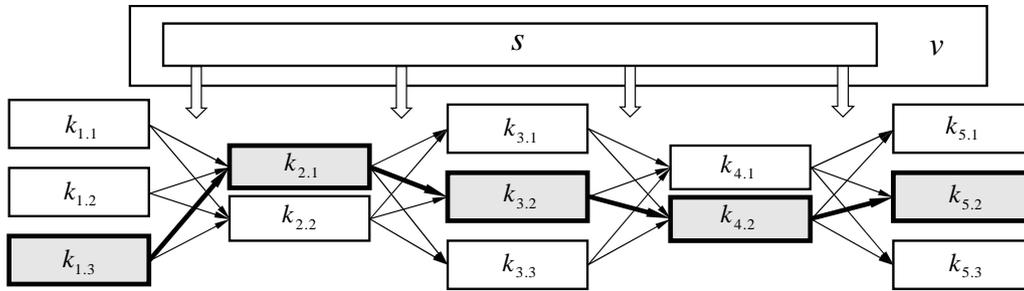


Рис. 4. Схема Б2 покомпонентного резервирования со связями типа «каждый с каждым»

Преимущество покомпонентного резервирования состоит в высоком уровне вариативности, однако общим недостатком является ограниченность применения исключительно для конструктивно и функционально одинаковых компонентов. Возникает вопрос о резервировании локальных систем управления ресурсами  $l_i$ . Кроме того, неразрешимой может оказаться задача оптимизации (рационализации) системы целиком в условиях изменения ее компонентов.

*Схема В. Централизованное (супервизорное) управление*

Дальнейшее развитие цифровых технологий привело к созданию централизованных схем резервирования под управлением бортовых цифровых вычислительных машин (БЦВМ) [18], собирательно называемых супервизорными и иллюстрируемых рис. 5, где  $s$  – супервизор как централизованная разновидность СУИ, размещенный в вычислителе  $v$ .



Конфигурация  $q$

Рис. 5. Схема В централизованного управления конфигурациями

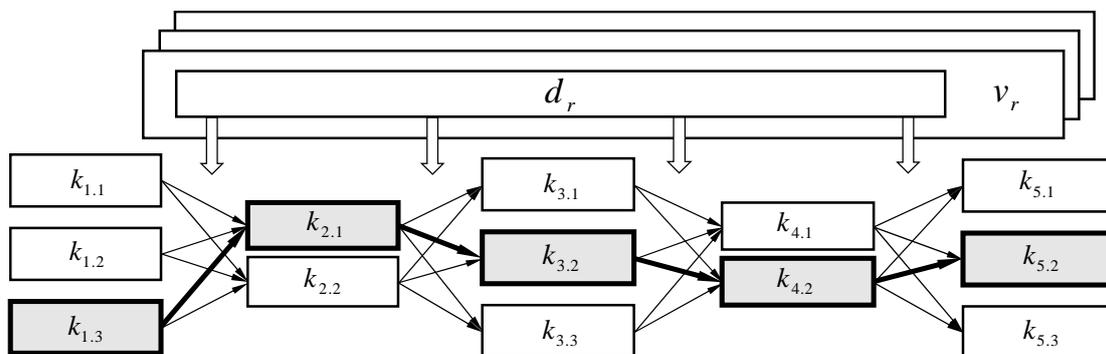
Достоинствами такой схемы являются существенная экономия ресурсов, гибкость за счет централизации мониторинга и управления реконфигурацией, а также возможность выдерживания единой стратегии функционирования всей системы. Ключевым недостатком является уязвимость, поскольку супервизор  $s$  является узким местом в смысле надежности, отказ которого приводит к потере работоспособности всей системы.

*Схема Г. Мультиагентное управление конфигурациями*

Преодоление недостатков централизованного управления видится в резервировании супервизора и содержащего его вычислителя. В работе [8] изложены обоснование и основные положения соответствующего подхода, названного мультиагентным, суть которого заключается в распределении функции управления резервированием между совокупностью локальных диспетчеров  $d_r$  (они же агенты), размещенных в каждом из вычислителей  $v_r$  (возможно резервирование узлов или модулей в одном вычислителе), в совокупности образующих распределенную систему.

Следует отметить, что разработанный подход [8] ориентирован исключительно на вычислительную сеть (совокупность вычислителей  $v_r$ ), характеризуемую высокими уровнями как однородности (одинаковые возможности взаимодействия), так и универсальности (одинаковые возможности выполнения функций) составных частей. Это является основой для автоматизации перераспределения задач в сети. Непосредственно к комплексу КБО такое решение не имеет прямого отношения, однако реальные компоненты  $k_{i,j}$  комплекса могут подразумеваться в качестве специфической периферии мультиагентной системы.

Будем представлять мультиагентный подход схемой на рис. 6, где каждый локальный диспетчер  $d_r$  размещен в отдельном вычислителе  $v_r$ ,  $r = \overline{1, R}$ .



Конфигурация  $q$

Рис. 6. Схема Г мультиагентного управления конфигурациями

Каждый локальный диспетчер самостоятельно решает вопрос контроля своей исправности, информируя о результате остальные диспетчеры. В результате согласованной работы всех локальных диспетчеров  $d_r$ , идентифицируемых как исправные, осуществляется оперативное перераспределение используемых ресурсов. Сами вычислители резервируются каким-либо традиционным способом.

*Схема Д. Резервирование с супервизорами конфигураций*

Предлагаемая авторами схема, иллюстрируемая рис. 7, в определенной мере унаследовала различные особенности схем А, Б2, В и Г. Программный объект  $s_q^r$ , названный супервизором конфигурации, соотнесен с одной  $q$ -й заранее просчитанной конфигурацией,  $q = \overline{1, Q}$ , и размещен в каждом вычислителе  $v_r$ ,  $r = \overline{1, R}$ , участвующем в управлении избыточностью.

В этом заключается главная особенность подхода: СУИ резервируется на уровне вычислителей и на уровне супервизоров – «представителей» своих конфигураций. Кроме того, выбор как предпочтительного  $\alpha$ -вычислителя, так и ДСК для реализации предпочтительной конфигурации осуществляется с использованием описанных в разделе 1 процедур парного арбитража.

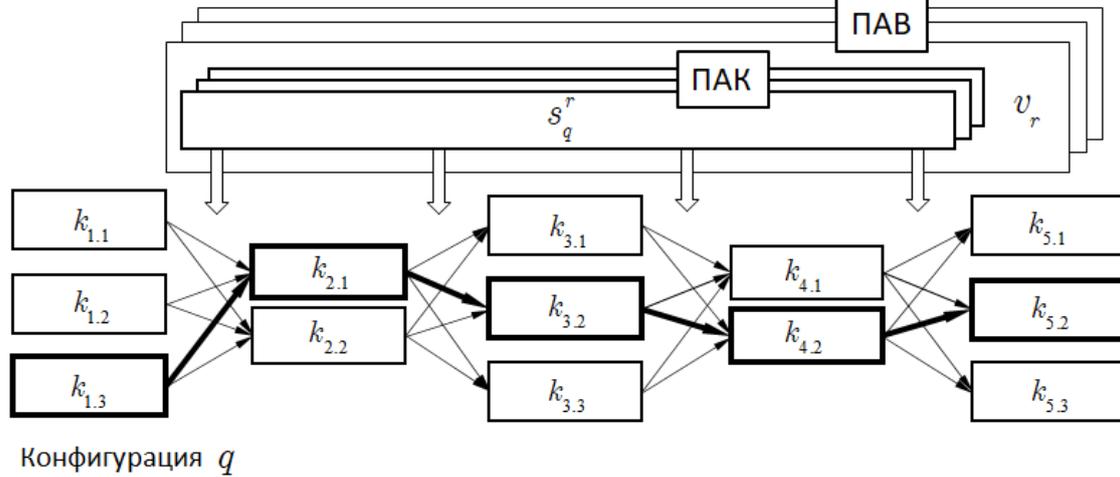


Рис. 7. Схема Д резервирования с использованием супервизоров конфигураций

**Оценивание отказоустойчивости схем резервирования**

Логические условия работоспособности КБО применительно к описанным схемам резервирования сведены в табл. 3.

Таблица 3

Условия работоспособности КБО

Схема резервирования		Условие работоспособности всего комплекса
1		2
А	Резервирование конфигураций целиком	исправность хотя бы одной конфигурации (исправность всех ее компонентов) И исправность схемы выбора конфигурации
Б.1	Покомпонентное резервирование с «узким местом»	исправность хотя бы одного компонента в каждой группе резерва И исправность всех «узких мест» И исправность всех логических систем управления резервом
Б.2	Покомпонентное резервирование с соединениями «каждый с каждым»	исправность хотя бы одного компонента в каждой группе резерва И исправность всех логических систем управления

1		2
В	Резервирование с централизованной системой (супервизор)	исправность хотя бы одного компонента в каждой группе резерва И исправность центрального вычислителя И исправность управляющей программы супервизора
Г	Мультиагентное управление конфигурациями	исправность хотя бы одного компонента в каждой группе резерва И исправность хотя бы одного вычислителя И исправность агента в исправном вычислителе
Д.	Резервирование с супервизорами конфигураций	исправность хотя бы одного вычислителя И исправность хотя бы одного СК в этом вычислителе И исправность всех компонентов конфигурации, соотнесенной с этим СК

Принимая упрощающее предположение о том, что исправности всех составляющих рассматриваемых схем являются независимыми событиями, и вводя обозначения вероятности безотказной работы (далее – вероятности исправности), введенных в разделе 2 составляющий схем:  $P(v_r)$  – вероятность исправности  $r$ -го вычислителя,  $P(k_{i,j})$  – вероятность исправности  $j$ -го компонента в  $i$ -й группе ресурсов и т.д., можно записать следующие итоговые расчетные формулы:

*Формулы вероятности исправности КБО:*

для схемы А

$$P_A(\text{КБО}) = \underbrace{\left( 1 - \prod_{q=1}^Q \left( 1 - \prod_{i=1}^K P(k_{i,q}) \right) \right)}_{\text{Исправность хотя бы одной конфигурации}} \underbrace{P(v)P(c)}_{\text{Исправность СУИ}}, \quad (1)$$

для схемы Б1

$$P_{Б.1}(\text{КБО}) = \prod_{i=1}^K \left( \underbrace{\left( 1 - \prod_{j=1}^{N_i} (1 - P(k_{i,j})) \right)}_{\text{Исправность компонентов в группе}} \underbrace{P(l_i)P(\text{bn}_{i-1})}_{\text{Исправность СУИ}} \right), \quad (2)$$

где по определению  $P(\text{bn}_0) = 1$ ,

для схемы Б2

$$P_{Б.2}(\text{КБО}) = \prod_{i=1}^K \left( \underbrace{\left( 1 - \prod_{j=1}^{N_i} (1 - P(k_{i,j})) \right)}_{\text{Исправность компонентов в группе}} \underbrace{P(l_i)}_{\text{Исправность СУИ}} \right), \quad (3)$$

для схемы В

$$P_B(\text{КБО}) = \prod_{i=1}^K \left( \underbrace{\left( 1 - \prod_{j=1}^{N_i} (1 - P(k_{i,j})) \right)}_{\text{Исправность компонентов}} \underbrace{P(v)P(s)}_{\text{Исправность СУИ}} \right), \quad (4)$$

для схемы Г

$$P_G(\text{КБО}) = \underbrace{\prod_{i=1}^K \left( 1 - \prod_{j=1}^{N_i} (1 - P(k_{i,j})) \right)}_{\text{Исправность компонентов}} \underbrace{\left( 1 - \prod_{r=1}^R (1 - P(v_r)P(d_r)) \right)}_{\text{Исправность СУИ}}, \quad (5)$$

для схемы Д без учета арбитража

$$P_{\text{Д}}(\text{КБО}) = 1 - \prod_{q=1}^Q \left( 1 - \underbrace{\prod_{i=1}^K P(k_{i,j/q})}_{\text{Исправность компонентов } q\text{-й конфигурации}} \underbrace{\left( 1 - \prod_{r=1}^R (1 - P(v_r)P(s_q^r)) \right)}_{\text{Исправность СУИ в части } q\text{-й конфигурации без учета арбитража}} \right), \quad (6)$$

где  $P(k_{i,j/q})$  –  $j$ -й компонент (при вычислении не учитывается) в  $i$ -й группе ресурсов, используемый в  $q$ -й конфигурации,

для схемы Д с учетом арбитража

$$P_{\text{Д+}}(\text{КБО}) = 1 - \prod_{q=1}^Q \left( 1 - \prod_{i=1}^K P(k_{i,j/q}) \underbrace{\left( 1 - \prod_{r=1}^R (1 - \hat{P}(v_r)\hat{P}(s_q^r)) \right)}_{\text{Исправность СУИ в части } q\text{-й конфигурации с учетом арбитража}} \right), \quad (7)$$

где  $\hat{P}(v_r)$  – скорректированная вероятность исправности вычислителя, прошедшего процедуру ПАВ,  $\hat{P}(s_q^r)$  – скорректированная вероятность исправности ДСК, прошедшего процедуру ПАК.

Дополнительно отметим, что:

а) максимально возможное число различных конфигураций, получаемое путем коммутации имеющегося набора компонентов, будет определяться как

$$Q_{\text{max}} = \prod_{i=1}^N N_i,$$

хотя в действительности число конфигураций может быть меньше этого значения:  $Q \leq Q_{\text{max}}$ ;

б) составляющая

$$\prod_{i=1}^K \left( 1 - \prod_{j=1}^{N_i} (1 - P(k_{i,j})) \right) \quad (8)$$

в формулах для схем Б, В, Г и Д представляет собой максимально возможную надежность располагаемой совокупности компонентов;

в) предполагается, что в схеме Д все компоненты комплекса «охвачены» конфигурациями (каждый компонент задействован хотя бы в одной из них).

*Учет эффекта парного арбитража*

Корректировка вероятностей в формуле (7) обусловлена следующей принципиальной особенностью схемы Д. Если в других схемах каждый вычислитель  $v_r$ , равно как и логическая схема управления избыточностью, самостоятельно решает вопрос о собственной исправности<sup>1</sup> и исправности компонентов, то схема Д предусматривает процедуры парного арбитража вычислителей (ПАВ) и конфигураций (ПАК), заключающиеся в независимой перекрестной проверке исправности  $v_r$  в первом и  $s_q^r$  во втором случаях с последующим совместным анализом результатов.

Расширить статистический анализ по формуле (6) на случай использования логических функций, каковыми являются ПАВ и ПАК, весьма сложно. Предлагаемый вариант позволяет получить упрощенную оценку.

В табл. 4 в соответствии с табл. 1 представлены 16 различных исходов (значений МП) процедуры ПАВ, соотнесенных по отсутствию или наличию различных ошибок анализаторов, разбитые<sup>2</sup> на следующую полную группу независимых событий:

<sup>1</sup> Факт неисправности вычислителя соответствует отсутствию подтверждения его исправности [8].

<sup>2</sup> Три исхода с предпочтением любого вычислителя условно поделены поровну между событиями «анализаторы исправны» и «ошибки анализаторов, не отражающиеся на выборе предпочтения».

- событие  $\alpha$  – отсутствие ошибок анализаторов обоих вычислителей – всего 3,5 исхода;
- событие  $\beta$  – наличие одной ошибки в двух анализаторах, не отражающейся на предпочтении вычислителя – всего 9,5 исходов;
- событие  $\gamma$  – наличие комбинации ошибок в двух анализаторах, исключающих предпочтение какого-либо вычислителя – всего 3 исхода.

Таблица 4

Вероятности и частоты исходов ПАВ

Событие	Число исходов	Результат выбора	Состояние анализаторов ПАВ		
			характеристика	вероятность события	абсолютная частота
$\alpha$	2	однозначный	исправны	$P(a)$	3,5
	3	любой			
$\beta$	8	однозначный	одна ошибка	$1 - P(a)$	9,5
	3	никакой			
$\gamma$	3	никакой	комбинация ошибок	$\frac{3}{12,5}(1 - P(a))$	3
Всего:	16			1	16

Будем считать, что исправность обоих анализаторов в паре вычислителей как одно сложное (3,5 исхода) событие  $\alpha$  характеризуется вероятностью  $P(a)$ . Тогда, как показано в табл. 4, сложное событие  $\beta + \gamma$  как любая комбинация ошибок анализаторов происходит с вероятностью  $1 - P(a)$ , где  $P(a)$  – вероятность исправности анализатора в ПАВ (и МА в ПАК).

Вероятность сложного события  $\beta + \gamma$  разделим между составляющими его независимыми событиями  $\beta$  и  $\gamma$  пропорционально относительным частотам исходов 9,6/12,5 и 3/12,5 соответственно.

Теперь определим усредненную вероятность исправности вычислителя после процедуры ПАВ. С учетом независимости событий  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\gamma$ , а также того, что при 13 исходах (события  $\alpha$  и  $\beta$ ) гарантирована исправность  $P(v_r) = 1$ , а при 3 исходах (событие  $\gamma$ ) она остается изначальной  $P(v_r)$ , получаем расчетную формулу

$$\hat{P}(v_r) = \underbrace{P(a)}_{P(\alpha)} \cdot 1 + \underbrace{\frac{9,5}{12,5}(1 - P(a))}_{P(\beta)} \cdot 1 + \underbrace{\frac{3}{12,5}(1 - P(a))}_{P(\gamma)} \cdot P(v_r),$$

в которой первое слагаемое отражает вероятность исправности анализатора, второе – вероятность неисправности анализатора при исправном вычислителе, третье – вероятность неисправности анализатора при неисправном вычислителе.

Итоговая формула для расчета вероятности исправности вычислителя с учетом ПАВ:

$$\hat{P}(v_r) = \frac{19}{25} + \frac{6}{25} P(a) + \frac{6}{25} (1 - P(a)) P(v_r). \quad (9)$$

Таблица 5

Вероятности и частоты исходов ПАК

Событие	Число исходов	Результат выбора	Состояние МА		
			характеристика	вероятность события	абсолютная частота
$\alpha$	4	однозначный	исправны	$P(a)$	4
$\beta$	8	однозначный	одна ошибка	$\frac{8}{12}(1 - P(a))$	8
$\gamma$	4	никакой	комбинация ошибок	$\frac{4}{12}(1 - P(a))$	4
Всего:	16			1	

Исходя из аналогичных рассуждений и основываясь на табл. 2, можно записать формулу

$$\hat{P}(s_q^r) = P(a) + \frac{8}{12}(1 - P(a)) + \frac{4}{12}(1 - P(a))P(s_q^r) = \frac{2}{3} + \frac{1}{3}P(a) + \frac{1}{3}(1 - P(a))P(s_q^r), \quad (10)$$

соответствующую табл. 5 и определяющую вероятность исправности СК после процедуры ПАК.

*Упрощение вычислений вероятности для схемы Д*

Специального обсуждения заслуживает сложность вычисления в формулах (6) и (7) произведения с варьированием номера конфигурации  $q$ . Поскольку одни и те же компоненты  $k_{i,j/q}$  могут использоваться в различных конфигурациях, то перечисляемые по номеру  $q$  конфигурации в смысле отказов не могут считаться независимыми. Независимый по предположению отказ какого-либо компонента с номерами  $i$  (номер группы) и  $j$  (номер в группе) приводит к одновременному отказу определенной совокупности конфигураций.

В силу сказанного учет в общем виде того, что исправность СУИ, во-первых, и исправность совокупности компонентов, во-вторых, должны относиться к одной и той же конфигурации, требует более глубокого анализа. Такой анализ связан с необходимостью учета количественного и качественного состава конфигураций, индивидуального для конкретных реализаций КБО, и в обобщенной постановке едва ли возможен.

Если же зависимость исправности СУИ и компонентов в рамках каждой конфигурации игнорируется, то для завышенных оценок исправности (6) и (7) в первом приближении можно по аналогии с формулой (5) записать

$$\tilde{P}_{\text{Д}}(\text{КБО}) = \underbrace{\prod_{i=1}^K \left( 1 - \prod_{j=1}^{N_i} (1 - P(k_{i,j})) \right)}_{\text{Исправность компонентов}} \underbrace{\left( 1 - \prod_{r=1}^R \left( 1 - P(v_r) \left( 1 - \prod_{q=1}^Q (1 - P(s_q^r)) \right) \right) \right)}_{\text{Исправность СУИ в вычислителе}}, \quad (11)$$

$$\tilde{P}_{\text{Д}+}(\text{КБО}) = \prod_{i=1}^K \left( 1 - \prod_{j=1}^{N_i} (1 - P(k_{i,j})) \right) \left( 1 - \prod_{r=1}^R \left( 1 - \hat{P}(v_r) \left( 1 - \prod_{q=1}^Q (1 - \hat{P}(s_q^r)) \right) \right) \right). \quad (12)$$

Оценки (11) и (12) являются завышенными, поскольку одновременное наличие исправных компонентов хотя бы одной конфигурации и хотя бы одной копии СУИ ( $r$ -й вычислитель и  $q$ -й СК в нем) не обязательно относится к одной и той же конфигурации.

### Числовой пример

С целью сравнительного анализа схем управления избыточностью рассматривается гипотетический КБО с различными вариантами СУИ, соответствующими рассматриваемым схемам А – Д, и следующими исходными данными:

число групп резерва  $K = 5$ ,

количество компонентов в группах:

вариант 1:  $N_1 = N_3 = N_5 = 3$ ,  $N_2 = N_4 = 2$ ,

вариант 2:  $N_1 = N_3 = N_5 = 6$ ,  $N_2 = N_4 = 5$ ,

число вычислителей  $r = 3$ ,

вероятности безотказной работы:

компонентов  $P(k_{i,j}) = 0,99$ ,

вычислителей  $P(v) = P(v_r) = 0,999$ ,

резервирующих органов  $P(c) = P(l_i) = P(s) = P(s_q) = 0,999$ ,  $i = \overline{1,5}$ ,  $q = \overline{1,Q}$ ,

«узких мест»  $P(bn_i) = 0,999$ ,  $i = \overline{1,4}$ ,

анализаторов ПАК и ПАВ  $P(a) = 0,99$ .

Принятые значения показателей надежности частей схем носят методический характер. Результаты вычислений представлены в табл. 6 и 7.

Таблица 6

Показатели отказоустойчивости КБО, вариант 1: (1–2)-кратный резерв в пяти группах компонентов

Схема	Расчетная формула	Надежность СУИ		Надежность КБО	
		Интенсивность отказов	Вероятность исправности	Интенсивность отказов	Вероятность исправности
А	(1)	$1,9989 \cdot 10^{-3}$	0,998	$1,9989 \cdot 10^{-3}$	0,998
Б1	(2)	$8,9641 \cdot 10^{-3} *$	0,991 *	$9,1653 \cdot 10^{-3}$	0,991
Б2	(3)	$4,9901 \cdot 10^{-3} *$	0,995 *	$5,1920 \cdot 10^{-3}$	0,995
В	(4)	$1,9989 \cdot 10^{-3}$	0,998	$2,2016 \cdot 10^{-3}$	0,998
Г	(5)	$7,9880 \cdot 10^{-9}$	0,999999992	$2,02997 \cdot 10^{-4}$	0,9998
Д	(11)	$9,9999 \cdot 10^{-10}$	0,999999999	$2,02990 \cdot 10^{-4}$	0,9998
Д+	(12)	$1,3824 \cdot 10^{-17}$	0,9999999999999999	$2,02989 \cdot 10^{-4}$	0,9998
max	(8)	0	1	$2,02989 \cdot 10^{-4}$	0,9998

\* Представлены обобщенные вероятности совокупности резервирующих компонентов.

Таблица 7

Показатели отказоустойчивости КБО, вариант 2: (4–5)-кратный резерв в пяти группах компонентов

Схема	Расчетная формула	Надежность СУИ		Надежность КБО	
		Интенсивность отказов	Вероятность исправности	Интенсивность отказов	Вероятность исправности
А	(1)	$1,9989 \cdot 10^{-3}$	0,998	$1,9989 \cdot 10^{-3}$	0,998
Б1	(2)	$8,9641 \cdot 10^{-3} *$	0,991 *	$8,9641 \cdot 10^{-3}$	0,991
Б2	(3)	$4,9901 \cdot 10^{-3} *$	0,995 *	$4,9990 \cdot 10^{-3}$	0,995
В	(4)	$1,9989 \cdot 10^{-3}$	0,998	$1,9990 \cdot 10^{-3}$	0,998
Г	(5)	$7,9880 \cdot 10^{-9}$	0,999999992	$8,1910 \cdot 10^{-9}$	0,999999991
Д	(11)	$9,9999 \cdot 10^{-10}$	0,999999999	$1,2030 \cdot 10^{-9}$	0,999999999
Д+	(12)	$1,3824 \cdot 10^{-17}$	0,9999999999999999	$2,02999 \cdot 10^{-10}$	0,9999999998
max	(8)	0	1	$2,02999 \cdot 10^{-10}$	0,9999999998

\* Представлены обобщенные вероятности совокупности резервирующих компонентов.

### Обсуждение результатов

Анализ табл. 6 показывает, что схемы А, Б1, Б2 и В обладают практически одинаковыми вероятностями исправности СУИ, в то время как схема Г характеризуется отказоустойчивостью СУИ на 5 порядков больше (число девяток в вероятности исправности), схема Д без арбитража – еще на порядок, а схема Д+ с арбитражем – еще более, чем на два порядка<sup>1</sup>. Для сравнения в строке «max» указаны характеристики надежности при абсолютно надежной СУИ, которые соответствуют максимально достижимой надежности располагаемого набора компонентов, определяемой выражением (8).

Значительное увеличение безотказности СУИ приводит к увеличению вероятности исправности КБО в целом при переходе от схемы В к схеме Г на один порядок (три девятки вместо двух) и практически неизменной отказоустойчивости КБО при остальных переходах. Последнее обстоятельство объясняется низкой исходной надежностью компонентов  $k_{i,j}$  и небольшим числом непосредственного резервирования каждого из них (2 или 3 компонента в группе). Таким образом, надежность КБО ограничивается общей надежностью имеющегося набора компонентов.

Анализ табл. 7, иллюстрирующей надежность комплекса с большей избыточностью компонентов, показывает, что надежность КБО для схем А, Б1, Б2 и В осталась почти на том же уровне: уровень надежности их СУИ не позволил реализовать возможности увеличенного избытка компонентов. В схемах Г и Д надежность КБО существенно выросла (на 5 порядков). Алгоритмы парного арбитража (схема Д+) позволили существенно (на 7 порядков) увеличить надежность СУИ и поднять дополнительно еще на порядок общую надежность КБО, приблизив ее к максимально достижимому значению.

<sup>1</sup> Это утверждение справедливо даже с учетом отмеченного завышения оценки по формуле (12).

Таким образом, при равных исходных данных пример демонстрирует значительную эффективность предлагаемой схемы управления избыточностью с супервизорами конфигураций (схема Д+) в смысле повышения отказоустойчивости СУИ как за счет просто резервирования СК, так и за счет выполнения парного арбитража вычислителей и конфигураций. При достаточно большом уровне избыточности КБО (большой кратности резервирования компонентов и их конфигураций) это обеспечивает существенное увеличение отказоустойчивости комплекса в целом, позволяя реализовать закладываемый уровень надежности совокупности компонентов.

### Заключение

Предложенный подход к управлению избыточностью технических систем, основанный на использовании супервизоров конфигураций, содержит парный арбитраж вычислителей (ПАВ) и конфигураций (ПАК). Такой арбитраж позволяет по формируемым матрицам предпочтения выбирать из числа располагаемых вычислителей и конфигураций такие, которые обладают гарантированной исправностью и при необходимости другими преимуществами перед альтернативами. Сравнительный анализ предложенной схемы на основе СК с другими известными подходами к управлению резервированием показал преимущества предлагаемого подхода при реализации системы управления избыточностью совокупности резервированных компонентов. Численные эксперименты подтверждают высокую эффективность обеспечения безотказности СУИ, в то время как отказоустойчивость КБО в целом существенно связана с располагаемой общей надежностью его компонентов. Использование высоконадежной СУИ предложенного типа позволит реализовывать требуемые уровни надежности бортовых комплексов с избыточным числом разнородных ресурсов. Предполагается ошутимый выигрыш подхода и с позиции эффективности функционального реконfigurирования.

### Список литературы

1. Digital Avionics Handbook / ed. by C.R. Spitzer, U. Ferrell, T. Ferrell. 3-d ed. London ; N.Y. : CRC Press, Taylor & Francis Group, 2015.
2. Клепиков В. И. Отказоустойчивость распределенных систем управления. М. : Золотое сечение, 2014.
3. Chandler P. R. Self-repairing flight control system reliability and maintainability program executive overview // Proc. of the IEEE National Aerospace and Electronics Conference. Dayton OH, 1984. P. 586–590.
4. Moerder D. D., Halyo N., Broussard J. R., Caglayan A. K. Application of precomputed control laws in a reconfigurable aircraft flight control system // Guidance, Control, and Dynamics. 1989. № 12. P. 325–333.
5. Montoya R. J. [et al.]. Restructurable Controls. Washington: NASA Scient. and Techn. Inf. Branch, 1983.
6. Blanke M., Staroswiecki M., Wu N. E. Concepts and methods in fault-tolerant control // Proc. American Control Conf., Arlington, USA, June 2001. P. 2606–2620.
7. Zhang Y., Jiang J. Bibliographical review on reconfigurable fault-tolerant control systems // Proc. the 5th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes. Washington D.C., 2003. P. 265–276.
8. Каляев И. А., Мельник Э. В. Реконfigurируемые информационно-управляющие системы // Материалы пленар. заседания 5-й Рос. мультikonф. по проблемам управления. СПб. : Изд. ЦНИИ Электроприбор, 2012. С. 36–37.
9. Сельвесюк Н. И., Мельник Э. В., Платошин Г. А., Таранов А. Ю. Повышение надежности авиационных БИУС за счет реконfigurации // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2021. № 2. С. 204–212.
10. Дегтярев А. Р., Киселев С. К. Отказоустойчивые реконfigurирующиеся комплексы интегрированной модульной авионики // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2016. № 1, т. 12. С. 89–99.
11. Агеев А. М., Бронников А. М., Буков В. Н., Гамаюнов И. Ф. Супервизорный метод управления избыточностью технических систем // Известия РАН. Теория и системы управления. 2017. № 3. С. 59–69.
12. Буков В. Н., Бронников А. М., Агеев А. М. [и др.]. Концепция управляемой избыточности комплексов бортового оборудования // Науч. чтения по авиации, посвящ. памяти Н. Е. Жуковского : материалы XVI Всерос. науч.-практ. конф. (Москва, 11–12 апр. 2019) / гл. ред. С. П. Халютин. М. : ИД Акад. им. Н. Е. Жуковского, 2019. С. 17–33.
13. Беляев Ю. К., Богатырев В. А., Болотин В. В. [и др.]. Надежность технических систем : справочник / под ред. И. А. Ушакова. М. : Радио и связь, 1985.
14. Денисенко В. В. Аппаратное резервирование в промышленной автоматизации. Ч. 1 // Современные технологии автоматизации. 2008. № 2. С. 10–26.
15. Белоусов И. А. Формирование облика резервного контура интегрированной системы навигации и определения ориентации малого искусственного спутника Земли : дис. ... канд. техн. наук. М. : МАИ (ГТУ), 2003.
16. Юдицкий С., Подлазов В., Борисенко В. Узкие места в локальных сетях // LAN/Журнал сетевых решений. 1998. № 8. URL: <https://old.prolan.ru/company/article/magazine/lan091998.html>

17. Поляков В. Б., Неретин Е. С., Иванов А. С. [и др.]. Архитектура перспективных комплексов управления бортовым оборудованием // Труды МАИ. 2018. № 100. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=93459>
18. Говоров А. А., Селищев В. А., Говоров А. А. Супервизорные информационные системы управления технологическими объектами // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2016. № 7–2. С. 64–74.

### References

1. Spitzer C.R., Ferrell U., Ferrell T. (eds.). *Digital Avionics Handbook*. 3-d ed. London; New York: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2015.
2. Klepikov V.I. *Otkazoustoychivost' raspredelennykh sistem upravleniya = Fault tolerance of distributed control systems*. Moscow: Zolotoe sechenie, 2014. (In Russ.)
3. Chandler P.R. Self-repairing flight control system reliability and maintainability program executive overview. *Proc. of the IEEE National Aerospace and Electronics Conference*. Dayton OH, 1984:586–590.
4. Moerder D.D., Halyo N., Broussard J.R., Caglayan A.K. Application of precomputed control laws in a reconfigurable aircraft flight control system. *Guidance, Control, and Dynamics*. 1989;(12):325–333.
5. Montoya R.J. [et al.]. *Restructurable Controls*. Washington: NASA Scient. and Techn. Inf. Branch, 1983.
6. Blanke M., Staroswiecki M., Wu N.E. Concepts and methods in fault-tolerant control. *Proc. American Control Conf.*, Arlington, USA, June 2001:2606–2620.
7. Zhang Y., Jiang J. Bibliographical review on reconfigurable fault-tolerant control systems. *Proc. the 5th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes*. Washington D.C., 2003:265–276.
8. Kalyaev I.A., Mel'nik E.V. Reconfigurable information and control systems. *Materialy plenar. zasedaniya 5-y Ros. mul'tikonf. po problemam upravleniya = Materials of the Plenar. Meetings of the 5th Russian Multi-conference on Management Problems*. Saint Petersburg: Izd. TsNII Elektropribor, 2012:36–37. (In Russ.)
9. Sel'vesyuk N.I., Mel'nik E.V., Platoshin G.A., Taranov A.Yu. Improving the reliability of aviation BIUS due to reconfiguration. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = Izvestiya Tula State University. Technical sciences*. 2021;(2):204–212. (In Russ.)
10. Degtyarev A.K., Kiselev S.K. Fault-tolerant reconfigurable complexes of integrated modular avionics. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy = Electrical and information complexes and systems*. 2016;12(1):89–99. (In Russ.)
11. Ageev A.M., Bronnikov A.M., Bukov V.N., Gamayunov I.F. Supervisory method of redundancy management of technical systems. *Izvestiya RAN. Teoriya i sistemy upravleniya = News of the Russian Academy of Sciences. Theory and control systems*. 2017;(3):59–69. (In Russ.)
12. Bukov V.N., Bronnikov A.M., Ageev A.M. [et al.]. The concept of controlled redundancy of onboard equipment complexes. *Nauch. chteniya po aviatsii, posvyashch. pamyati N. E. Zhukovskogo: materialy XVI Vseros. nauch.-prakt. konf. (Moskva, 11–12 apr. 2019) = Scientific readings on aviation, dedicated. in memory of N. E. Zhukovsky : materials XVI All-Russian Scientific and Practical Conference (Moscow, 11-12 Apr. 2019)*. Moscow: ID Akad. im. N. E. Zhukovskogo, 2019:17–33. (In Russ.)
13. Belyaev Yu.K., Bogatyrev V.A., Bolotin V.V. [et al.]. *Nadezhnost' tekhnicheskikh sistem: spravochnik = Reliability of technical systems : handbook*. Moscow: Radio i svyaz', 1985. (In Russ.)
14. Denisenko V.V. Hardware redundancy in industrial automation. Part 1. *Sovremennyye tekhnologii avtomatizatsii = Modern technologies of automation*. 2008;(2):10–26. (In Russ.)
15. Belousov I.A. Formation of the appearance of the backup contour of the integrated navigation system and the determination of the orientation of a small artificial satellite of the Earth. PhD dissertation. Moscow: MAI (GTU), 2003. (In Russ.)
16. Yuditskiy S., Podlazov V., Borisenko V. Bottlenecks in local networks. *LAN/Zhurnal setevykh resheniy = LAN/Journal of network solutions*. 1998;(8). (In Russ.). Available at: <https://old.prolan.ru/company/article/magazine/lan091998.html>
17. Polyakov V.B., Neretin E.S., Ivanov A.S. [et al.]. Architecture of advanced avionics control systems. *Trudy MAI = Proceedings of MAI*. 2018;(100). (In Russ.). Available at: <http://trudymai.ru/published.php?ID=93459>
18. Govorov A.A., Selishchev V.A., Govorov A.A. Supervisory information management systems of technological objects. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = Izvestiya Tula State University. Technical sciences*. 2016;(7–2):64–74. (In Russ.)

### Информация об авторах / Information about the authors

#### Андрей Михайлович Агеев

кандидат технических наук, доцент, докторант,  
Военный учебно-научный центр  
Военно-воздушных сил «Военно-воздушная  
академия имени профессора Н. Е. Жуковского  
и Ю. А. Гагарина  
(Россия, г. Воронеж, ул. Старых большевиков, 54а)  
E-mail: ageev\_bbc@mail.ru

#### Andrey M. Ageev

Candidate of technical sciences,  
associate professor, doctoral student,  
Military Educational and Scientific Center  
of the Air Force "Air Force Academy named after  
Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin"  
(54a Starykh bol'shevikov street, Voronezh, Russia)

**Валентин Николаевич Буков**

доктор технических наук, профессор,  
ведущий научный сотрудник,  
Научно-исследовательский институт  
авиационного оборудования  
(Россия, Московская обл., г. Жуковский,  
ул. Туполева, 18)  
E-mail: v\_bukov@mail.ru

**Valentin N. Bukov**

Doctor of technical sciences, professor,  
leading researcher,  
Research Institute of Aviation Equipment  
(18 Tupoleva street, Zhukovsky,  
Moscow region, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /  
The authors declare no conflicts of interests.**

**Поступила в редакцию/Received 27.09. 2021**

**Поступила после рецензирования/Revised 10.10.2021**

**Принята к публикации/Accepted 12.01.2022**

## ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕДУРЫ УРАВНОВЕШИВАНИЯ ДЛИННОМЕРНОГО ТЕЛА В ЕДИНСТВЕННОЙ ПЛОСКОСТИ КОРРЕКЦИИ ДИСБАЛАНСОВ НА ВЕРТИКАЛЬНОМ БАЛАНСИРОВОЧНОМ СТЕНДЕ

**А. В. Ключников**

Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени академика Е. И. Забабахина, Снежинск, Челябинская обл., Россия  
a.klyuchnikov@bk.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* К числу способов, применяемых при проектировании и изготовлении силовой установки транспортного средства с целью повышения эффективности и надежности его функционирования, относится экспериментальный контроль параметров массоинерционной асимметрии, выполняемый на заключительном этапе общей сборки модуля. *Материалы и методы.* Рассмотрены способ и алгоритм балансировки конического тела вращения в одной плоскости коррекции дисбалансов на вертикальном динамическом балансировочном стенде. Используемая плоскость коррекции конструктивно располагается на торце тела, на значительном расстоянии от его центра масс. *Результаты.* Предложенный способ за один шаг балансировки либо обеспечивает приведение параметров массоинерционной асимметрии тела к заданным нормативам с оптимизацией по критерию достижения минимального значения одним из контролируемых параметров массоинерционной асимметрии, либо позволяет диагностировать невозможности достижения нормативов. *Выводы.* Эффективность способа подтверждается результатами численных экспериментов.

**Ключевые слова:** тело вращения, сборный ротор, ось симметрии, ось инерции, центр масс, дисбаланс, плоскость коррекции дисбалансов, стенд, измерение, балансировочный расчет

**Для цитирования:** Ключников А. В. Особенности процедуры уравнивания длинномерного тела в единственной плоскости коррекции дисбалансов на вертикальном балансировочном стенде // Надежность и качество сложных систем. 2022. № 1. С. 83–90. doi:10.21685/2307-4205-2022-1-9

## SPECIAL APPROACH FOR A LONG-LENGTH SOLID BALANCING IN THE UNIQUE PLANE OF UNBALANCES CORRECTION AT VERTICAL BALANCING STAND

**A.V. Klyuchnikov**

Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Scientific Research Institute of Technical Physics  
named after Academician E. I. Zababakhin, Snezhinsk, Chelyabinsk region, Russia  
a.klyuchnikov@bk.ru

**Abstract.** *Background.* Mass-inertia asymmetry is experimentally verified at the final stage of the module assembly while designing and manufacturing both efficient and reliable power unit for a vehicle. *Materials and methods.* The work presents a procedure and an algorithm for balancing the conical solid of rotation in the only plane of unbalances correction at a vertical balancing stand. The correction plane used is designed to be located at the end of the solid far enough of its mass-center. *Results.* Proposed approach provides, in one step of balancing, either bringing parameters of mass-inertia asymmetry of the solid to design values, or diagnosing unattainability of the latter. *Conclusions.* The efficiency of the approach is proved by the numerical experimental results.

**Keywords:** rotation solid, precast rotor, symmetry axis, axis of inertia, mass-center, unbalance, plane of unbalances correction, stand, measurement, balance computing

**For citation:** Klyuchnikov A.V. Special approach for a long-length solid balancing in the unique plane of unbalances correction at vertical balancing stand. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2022;(1):83–90. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2022-1-9

### Введение

Одним из условий движения с заданной точностью транспортного средства (наземного, подводного, воздушного), силовая установка которого, выполненная в виде модуля, представляет собой длинномерное твердое тело вращения, а также надежного функционирования бортовой аппаратуры модуля является определение на завершающем этапе общей сборки его массоцентровочных и инерционных характеристик (МЦИХ), к которым относятся масса, координаты центра масс, моменты инерции и направления главных центральных осей инерции (ГЦОИ), и устранение параметров массоинерционной асимметрии в процессе уравнивания. К числу указанных параметров относится величина радиуса-вектора  $\vec{r}$  поперечного смещения центра масс с геометрической оси тела (являющейся также осью симметрии его наружной поверхности) и величина радиуса-угла  $\vec{\gamma}$  отклонения продольной ГЦОИ относительно той же оси [1, 2]. Уравнивание выполняют на специализированных контрольно-измерительных станках (стендах) путем корректировки массы тела, например, с помощью установки балансировочных грузов в заданных плоскостях коррекции дисбалансов.

Как известно [3, 4], для балансировки твердого тела достаточно двух плоскостей коррекции. Однако для случаев, когда контролируемый модуль имеет, например, форму кругового конуса с малым полууглом раствора и единственной плоскостью коррекции, обычно расположенной вблизи торца, в процессе уравнивания после изготовления и сборки модуля приходится решать задачу не устранения массоинерционной асимметрии, а приведения параметров асимметрии к значениям, не превышающим заданных в эксплуатационной документации на модуль предельно допустимых значений.

Для определения массы тела обычно используют стандартные, например, платформенные весы, а определение других МЦИХ выполняют с применением контрольно-измерительных стендов, учитывающих конструктивные и технологические особенности контролируемых объектов и обеспечивающих требуемую точность измерений. Координаты центра масс обычно определяют на центровочных стендах, реализующих весовой метод измерений, а для определения моментов инерции используют стенды, реализующие метод физического или крутильного маятника [2, 3, 5]. При этом расчет величины поперечного смещения центра масс и угол перекоса продольной ГЦОИ относительно геометрической оси контролируемой модели выполняют по специальным методикам с использованием результатов измерений МЦИХ. Следует отметить, что при использовании пооперационной технологии контроля МЦИХ, предполагающей применение отдельных центровочного и маятниковых стендов, операторы-балансировщики, как правило, при расчете параметров балансировочного груза стремятся исключить поперечное смещение центра масс с геометрической оси контролируемого объекта с последующим экспериментальным определением нового положения продольной ГЦОИ. В этом случае, если угол отклонения ГЦОИ от геометрической оси окажется больше предельно допустимого значения, то производится следующая итерация с расчетом балансировочного груза и определением положения ГЦОИ. Однако низкая точность стендов обоих перечисленных типов и малая их производительность являются значимыми факторами, сдерживающими повышение точности определения и обеспечения параметров массоинерционной асимметрии, а также ведущими к росту числа расчетно-экспериментальных итераций и длительности процедуры уравнивания. В работе [6] отмечается, что длительность процедуры уравнивания с многократной переустановкой объекта контроля на центровочном и маятниковом стендах может составлять от нескольких рабочих смен до нескольких суток.

Однако в последнее время для определения параметров массоинерционной асимметрии тел вращения наметилась тенденция к использованию методов и средств динамической балансировки, что обусловлено высокими характеристиками точности динамических балансировочных станков (стендов) [2, 3, 6–8]. Применение метода динамической балансировки позволяет значительно повысить точность и сократить длительность балансировки, причем не только за счет высокой производительности и точности балансировочных стендов, но также за счет сокращения числа шагов балансировки (расчетно-экспериментальных итераций). Использование в балансировочном расчете коэффициентов взаимовлияния плоскостей коррекции, экспериментально определяемых на стадии настройки стенда, позволяет не только сократить число шагов балансировки до одного шага, но и оптимизировать параметры массоинерционной асимметрии в процессе их приведения к заданным нормативам.

В работах [2, 9] приведено описание низкочастотного динамического балансирующего стенда с вертикальной осью вращения, две жесткие опоры которого выполнены в виде соосных конических газостатических подшипников. Стенд спроектирован и изготовлен для прецизионной балансировки длинномерных тонкостенных модулей конической формы, обладающих единственной (штатной) плоскостью коррекции, расположенной вблизи торца, на значительном расстоянии от центра масс модуля. Балансировка модуля проводится в составе сборного ротора с использованием специализированного технологического переходника, выполненного в виде усеченного конуса. Сборный ротор образуется в результате установки контролируемого модуля вертикально, торцом вверх внутри переходника. Переходник обеспечивает фиксацию модуля, физическую защиту его наружной поверхности модуля при вращении сборного модуля в опорах и материализацию второй (нижней) плоскости коррекции. При этом в качестве верхней (первой) плоскости коррекции используется штатная плоскость коррекции контролируемого модуля. В качестве рабочего тела используется сжатый воздух, поступающий из заводской пневмосети низкого давления (0,6 МПа).

### Уравновешивание тела

В работах [10, 11] рассмотрена математическая модель и способ балансировки в динамическом режиме длинномерного тела (модуля) конической формы в составе сборного ротора. Перед проведением балансирующего эксперимента ряд параметров контролируемого модуля (массу, продольное положение центра масс, моменты инерции) определяют с использованием другого контрольно-измерительного оборудования и других средств измерений. Измерения амплитуд и фаз вибраций опор выполняются с помощью двух пьезоэлектрических датчиков силы, установленных в упругих элементах соответственно верхней и нижней опоры, и оптоэлектрического датчика кифазора, который используется как в качестве отметчика фазы дисбалансов, так и для измерений частоты вращения ротора. В ходе балансирующего эксперимента выполняют серию измерений вибраций опор как для сборного ротора, находящегося в исходном состоянии, так и после установки пробных грузов в плоскостях коррекции. В каждом пуске измерения выполняют на постоянной рабочей частоте вращения (~2 Гц) в процессе медленного самопроизвольного торможения ротора после его предварительного разгона до некоторой завышенной (на 15–20 %) частоты вращения. С целью выделения дисбалансов модуля из суммарных дисбалансов сборного ротора, измерения параметров вибрации опор в исходном состоянии проводят в двух фиксированных угловых положениях контролируемого модуля относительно технологического переходника, отличающихся друг от друга на 180°, с последующим усреднением результатов измерений [12–14].

По результатам измерений вибраций опор определяют балансирующие чувствительности измерительной системы стенда по амплитудам и углам дисбалансов и коэффициенты взаимовлияния плоскостей коррекции, рассчитывают векторные параметры (значения и углы) начальных дисбалансов модуля  $\vec{B}$  и  $\vec{H}$ , действующих в верхней и нижней плоскости коррекции [15–18]. Далее рассчитывают параметры начальной массоинерционной асимметрии модуля по формулам [10, 13]:

$$\vec{\rho} = \frac{\vec{B} + \vec{H}}{M}; \quad (1)$$

$$\vec{\gamma} = \frac{1}{2} \arcsin \frac{2(\vec{B}x_B - \vec{H}x_H)}{I_y - I_a}, \quad (2)$$

где  $M$  – масса модуля;  $I_y$  и  $I_a$  – соответственно экваториальный и аксиальный моменты инерции модуля;  $x_B$  и  $x_H$  – расстояния от центра масс модуля до верхней и нижней плоскости коррекции в соответствии с рис. 1.

Затем в случае, если хотя бы один из указанных параметров превышает предельно допустимое значение, проводят балансирующий расчет с определением массы и места установки балансирующего груза, прикрепление которого к штатной плоскости коррекции позволит привести значения обоих контролируемых параметров массоинерционной асимметрии модуля к заданным нормативам [13, 19].

Оптимизация может быть выполнена для конкретного уравновешиваемого модуля по одному из двух критериев: по критерию достижения минимальной величины поперечного смещения центра масс с геометрической оси модуля либо по критерию достижения минимального угла отклонения продольной ГЦОИ от той же геометрической оси.

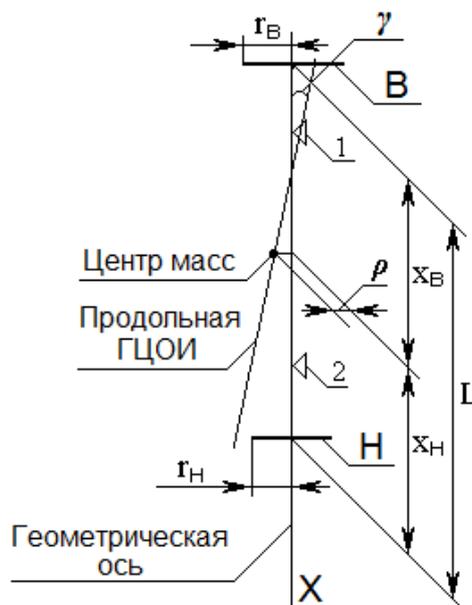


Рис. 1. Расчетная схема модуля:

1 – верхняя опора; 2 – нижняя опора; В – верхняя плоскость коррекции; Н – нижняя плоскость коррекции

Алгоритм приведения параметров массоинерционной асимметрии контролируемого модуля к значениям, не превышающим заданных в эксплуатационной документации на модуль предельно допустимых значений с оптимизацией, имеет итерационный характер. С использованием математической модели балансировки [11] определяют значения и угловые положения векторов начальных дисбалансов  $\vec{B}$  и  $\vec{H}$ , действующих в верхней и нижней плоскостях коррекции. Затем расчетным путем моделируют перевод модуля в состояние квазистатической неуравновешенности, когда геометрическая ось и продольная ГЦОИ пересекаются, но не в центре масс. Для этого моделируют воздействие компенсирующего дисбаланса  $\vec{B}_{\text{КОМП}}$  в штатной плоскости коррекции, исключая (компенсирующего) действие начального дисбаланса в этой плоскости. Перевод модуля в состояние квазистатической неуравновешенности обуславливает появление в нижней плоскости коррекции дисбаланса  $\vec{H}_{\text{КОМП}}$  как сумма дисбаланса  $\vec{H}$  и дисбаланса  $\vec{H}_{\text{ДП}}$ , появляющегося в результате влияния верхней плоскости коррекции на нижнюю плоскость коррекции, и позволяет в дальнейших расчетах оперировать исключительно коллинеарными векторами дисбалансов, моделируемыми в противоположных плоскостях коррекции, что значительно упрощает проведение дальнейших расчетов. Далее в зависимости от заданного критерия оптимизации моделируют появление корректирующего дисбаланса  $\vec{B}_{\text{КОРР}}$  в штатной плоскости коррекции:

– в случае оптимизации по критерию достижения минимальной величины поперечного смещения центра масс моделируемый корректирующий дисбаланс  $\vec{B}_{\text{КОРР}}$ , в соответствии с рис. 2 направленный противоположно дисбалансу  $\vec{H}_{\text{КОМП}}$ , обеспечивает приведение центра масс на геометрическую ось. Далее рассчитывают параметры дисбаланса  $\vec{H}_{\text{КОРР}}$ , возникающего в нижней плоскости коррекции как ответ на появление дисбаланса  $\vec{B}_{\text{КОРР}}$ , и рассчитывают предполагаемое значение угла отклонения продольной ГЦОИ относительно геометрической оси модуля. Если это значение выходит за пределы заданного предельно допустимого значения, то рассчитывают предполагаемое (одновременно являющееся минимально возможным для данного варианта компоновки контролируемого модуля) значение поперечного смещения центра масс, задавая угол перекоса продольной ГЦОИ равным предельно допустимому значению. Если в результате расчета предполагаемое минимально возможное значение поперечного смещения центра масс превысит предельно допустимое значение, т.е. удовлетворительное балансировочное решение не будет найдено, то процедуру уравнивания прекращают, а контролируемый модуль отправляют изготовителю на перекомпоновку. Если же удовлетворительное балансировочное решение окажется найдено, то рассчитывают параметры нового корректирующего дисбаланса  $\vec{B}_{\text{КОРР}|\gamma=\gamma_{\text{дон}}}$ , появление которого в штат-

ной плоскости коррекции обеспечит рассчитанные значения параметров массоинерционной асимметрии контролируемого модуля. После чего определяют балансировочный вектор  $\vec{V}_{\text{БАЛ}}$  или  $\vec{V}_{\text{БАЛ}|\gamma=\gamma_{\text{доп}}}$  соответственно как сумму дисбалансов  $\vec{V}_{\text{КОМП}}$  и  $\vec{V}_{\text{КОРР}}$  или дисбалансов  $\vec{V}_{\text{КОМП}}$  и  $\vec{V}_{\text{КОРР}|\gamma=\gamma_{\text{доп}}}$ ;

– в случае оптимизации по критерию достижения минимального угла отклонения продольной ГЦОИ моделируемый корректирующий дисбаланс  $\vec{V}_{\text{КОРР}}$  в соответствии с рис. 3 обеспечивает приведение продольной ГЦОИ в положение, параллельное геометрической оси. Далее рассчитывают параметры дисбаланса  $\vec{H}_{\text{КОРР}}$ , возникающего в нижней плоскости коррекции как ответ на появление дисбаланса  $\vec{V}_{\text{КОРР}}$ , и рассчитывают предполагаемую величину поперечного смещения центра масс с геометрической оси модуля. Если это значение выходит за пределы заданного предельно допустимого значения, то рассчитывают предполагаемое (одновременно являющееся минимально возможным для данного варианта компоновки контролируемого модуля) значение угла перекоса продольной ГЦОИ, задавая величину смещения центра масс равной предельно допустимому значению. Если в результате расчета предполагаемое минимально возможное значение угла перекоса продольной ГЦОИ превысит предельно допустимое значение, т.е. удовлетворительное балансировочное решение будет не найдено, то процедуру уравнивания прекращают, а контролируемый модуль отправляют на перекомпоновку изготовителю. Если же удовлетворительное балансировочное решение окажется найдено, то рассчитывают параметры нового корректирующего дисбаланса  $\vec{V}_{\text{КОРР}|\rho=\rho_{\text{доп}}}$ , появление которого в штатной плоскости коррекции обеспечит рассчитанные значения параметров массоинерционной асимметрии контролируемого модуля. После чего определяют балансировочный вектор  $\vec{V}_{\text{БАЛ}}$  или  $\vec{V}_{\text{БАЛ}|\rho=\rho_{\text{доп}}}$  соответственно как сумму дисбалансов  $\vec{V}_{\text{КОМП}}$  и  $\vec{V}_{\text{КОРР}}$  или дисбалансов  $\vec{V}_{\text{КОМП}}$  и  $\vec{V}_{\text{КОРР}|\rho=\rho_{\text{доп}}}$ .

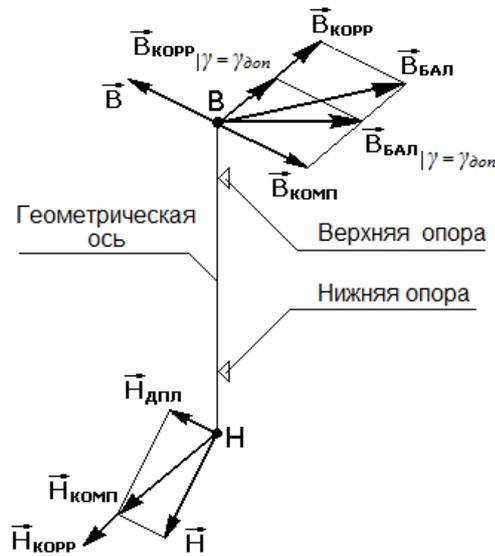


Рис. 2. Уравнивание с минимизацией величины смещения центра масс

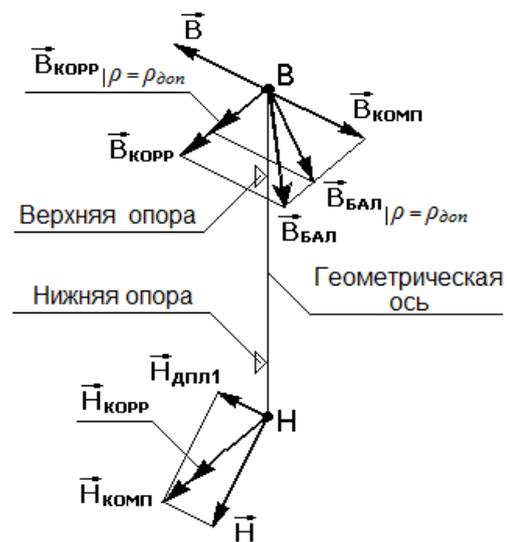


Рис. 3. Уравнивание с минимизацией угла отклонения продольной ГЦОИ

Балансировочный расчет заканчивается определением массы балансировочного груза, выполняемым по законам статики. При этом угловое положение балансировочного груза совпадает с угловым положением балансировочного дисбаланса. После прикрепления балансировочного груза к штатной плоскости коррекции проводят контрольный цикл измерений, определяют значения остаточных дисбалансов и с использованием выражений (1) и (2) остаточных параметров массоинерционной асимметрии модуля.

### Заключение

Рассмотренные способы и алгоритмы балансировки тел вращения, выполненных в виде конического модуля, за один шаг балансировки либо подтверждают возможность приведения параметров массоинерционной асимметрии к значениям, не превышающим предельно допустимых значений,

либо позволяют доказать невозможность достижения удовлетворительного балансировочного решения для данной конструкции модуля. Балансировка выполняется в единственной плоскости коррекции, расположенной на значительном расстоянии от центра масс модуля. Перевод модуля в состояние квазистатической неуравновешенности при моделировании параметров массоинерционной асимметрии значительно упрощает проведение балансировочного расчета. Исключение необходимости выполнения дополнительных шагов балансировки при уравнивании тела позволяет сократить общее время балансировочного эксперимента до одной рабочей смены.

В процессе балансировки возможна оптимизация по критерию достижения минимального значения одного из контролируемых параметров массоинерционной асимметрии. Способы оптимизации запатентованы [20, 21]. Приведенные в работах [22, 23] результаты численного моделирования подтверждают высокую точность и эффективность способов. Точность приведения контролируемых параметров асимметрии к заданным нормативам обеспечивается точностью измерений сигналов дисбалансов [18, 24, 25] и точностью настройки измерительной системы стенда на объект контроля в процессе выполнения балансировочного эксперимента.

### Список литературы

1. Правдин В. М., Шанин А. П. Баллистика неуправляемых летательных аппаратов. Снежинск : РФЯЦ-ВНИИТФ, 1999. 496 с.
2. Ильиных В. В., Ключников А. В., Лысых А. В. [и др.]. Технология обеспечения качества при изготовлении высокоскоростных неуправляемых летающих моделей // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета. 2013. № 3. С. 191–196.
3. Основы балансировочной техники. Т.1. Уравнивание жестких роторов и механизмов / под ред. В. А. Щепетильникова. М. : Машиностроение, 1975. 527 с.
4. Гернет М. М., Ратобыльский В. Ф. Определение моментов инерции. М. : Машиностроение, 1969. 249 с.
5. Миронов А. Д., Владычин Г. П., Кондратов А. А. Методы исследований на летающих моделях. М. : Машиностроение, 1988. 144 с.
6. Ключников А. В., Васильев М. А., Патокина Н. Е. [и др.]. Конструкции и пути совершенствования систем контроля характеристик геометрии масс летательных аппаратов // Надежность и качество сложных систем. 2018. № 3. С. 105–114.
7. Ключников А. В., Абышев Н. А. Обзор российских патентов по направлению экспериментального определения массоцентровочных и инерционных характеристик беспилотных летательных аппаратов // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2019. Т. 1. С. 149–155.
8. Абышев Н. А., Ключников А. В. К вопросу оптимизации выбора стендового оборудования, используемого для уравнивания летательных аппаратов // Вестник Концерна ВКО «Алмаз-Антей». 2020. № 3. С. 77–85.
9. Андреев С. В., Ключников А. В., Михайлов Е. Ф. Перспективы применения метода динамической балансировки для определения параметров асимметрии масс летательного аппарата // Решетневские чтения : материалы XVIII Междунар. науч.-техн. конф. (г. Красноярск, 1–10 ноября 2014 г.) : в 2 ч. Красноярск : СибГАУ, 2014. Ч. 1. С. 8–10.
10. Ключников А. В., Сидоров А. В. Применение метода динамической балансировки для прецизионного контроля параметров массоинерционной асимметрии роторных объектов // Приборы и системы. Управление. Контроль. Диагностика. 2011. № 3. С. 48–53.
11. Ключников А. В. Уточненная математическая модель оценки и обеспечения параметров массоинерционной асимметрии длинномерного роторного модуля // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2012. Т. 1. С. 224–227.
12. Патент № 2292534 РФ МПК G 01 M 1/04. Способ балансировки ротора / Л. М. Глазырина, М. С. Карповицкий, А. В. Ключников, А. И. Мальгин, Г. Г. Смирнов, Ю. П. Фомин ; заявл. 27.04.2004 ; опубл. 27.01.2007 ; Бюл. № 3.
13. Абышев Н. А., Ключников А. В., Михайлов Е. Ф., Чертков М. С. Стенд для прецизионной бесконтактной балансировки конических роторов в динамическом режиме // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2014. Т. 2. С. 234–236.
14. Ключников А. В. Способ устранения влияния технологической оснастки на результаты измерений в процессе динамической балансировки летательного аппарата // Решетневские чтения : материалы XIX Междунар. науч.-техн. конф. (г. Красноярск, 1–10 ноября 2015 г.) : в 2 ч. Красноярск : СибГАУ, 2015. Ч. 1. С. 21–23.
15. Андреев С. В., Ключников А. В., Лысых А. В., Михайлов Е. Ф. Калибровочные операции в процессе модульной балансировки детали на ненастроенном динамическом балансировочном стенде // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2013. Т. 2. С. 129–131.
16. Ключников А. В. Методическое обеспечение процесса индивидуальной настройки динамического балансировочного стенда на объект контроля // Инновационные, информационные и коммуникационные технологии : материалы XIV Междунар. науч.-практ. конф. (г. Сочи, 1–10 октября 2017 г.). М. : Ассоциация выпускников и сотрудников ВВИА им. проф. Жуковского, 2017. С. 382–386.

17. Патент 2453818 РФ МПК G 01 M 01/22. Способ настройки балансировочного стенда для определения параметров массоинерционной асимметрии роторов / А. В. Ключников ; заявл. 11.01.2011 ; опубл. 20.06.2012 ; Бюл. № 17.
18. Абышев Н. А., Ключников А. В., Шагмуратов М. Д. Компенсация погрешностей дисбалансов, вызванных фазовыми сдвигами измерительных сигналов балансировочного стенда // Научно-технический вестник Поволжья. 2019. № 7. С. 15–18.
19. Ключников А. В., Шагмуратов М. Д. Принципы построения и структура системы диагностики асимметричности в распределении масс летательного аппарата // Научно-технический вестник Поволжья. 2015. № 2. С. 141–143.
20. Патент 2499985 РФ МПК G 01 M 11/16. Способ балансировки ротора в одной плоскости коррекции / А. В. Ключников ; заявл. 11.04.2012 ; опубл. 27.11.2013 ; Бюл. № 33.
21. Патент 2694142 РФ МПК G 01 M 11/16. Способ балансировки ротора в одной плоскости коррекции / А. В. Ключников ; заявл. 27.09.2018 ; опубл. 09.07.2019 ; Бюл. № 19.
22. Ключников А. В. Численный алгоритм оптимизации процесса уравнивания конической летающей модели на динамическом балансировочном стенде // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета. 2016. Т. 17, № 2. С. 309–317.
23. Klyuchnikov A. V. Elaboration and testing of the algorithm, which ensures an achievement of minimal deviation angle of flying model main centroidal axis of inertia during it counterbalancing process in a sole correction flatness // Siberian Journal of Science and Technology. 2020. Vol. 21, № 1. P. 70–77.
24. Andreev S. V., Klyuchnikov A. V., Mikhailov E. F., Lysykh A. V. Peculiarities of measuring signals processing during detail's dynamic counterbalancing // Innovative Information Technologies : Materials of the III International scientific-practical conference (Prague, April, 21–25, 2014) : in 4 parts. Moscow : HSE, 2014. Part 3. P. 238–242.
25. Ключников А. В. Обработка измерительных сигналов в процессе динамической балансировки летательного аппарата // Вестник воздушно-космической обороны. 2019. № 1. С. 86–92.

### References

1. Pravdin V.M., Shanin A.P. *Ballistika neupravlyaemykh letatel'nykh apparatov = Ballistics of uncontrolled aircraft*. Snezhinsk: RFYaTs-VNIITF, 1999:496. (In Russ.)
2. П'inykh V.V., Klyuchnikov A.V., Lysykh A.V. [et al.]. Quality assurance technology in the manufacture of high-speed uncontrolled flying models. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta = Bulletin of the Siberian State Aerospace University*. 2013;(3):191–196. (In Russ.)
3. Shchepetil'nikov V.A. (ed.). *Osnovy balansirovochnoy tekhniki. T.I. Uravnoveshivanie zhestkikh rotorov i mekhanizmov = Fundamentals of balancing technology. Vol. 1. Balancing rigid rotors and mechanisms*. Moscow: Mashinostroenie, 1975:527. (In Russ.)
4. Gernet M.M., Ratobyl'skiy V.F. *Opreделение momentov inertsii = Determination of moments of inertia*. Moscow: Mashinostroenie, 1969:249. (In Russ.)
5. Mironov A.D., Vladychin G.P., Kondratov A.A. *Metody issledovaniy na letayushchikh modelyakh = Research methods on flying models*. Moscow: Mashinostroenie, 1988:144. (In Russ.)
6. Klyuchnikov A.V., Vasil'ev M.A., Patokina N.E. [et al.]. Designs and ways of improving control systems for the characteristics of the geometry of the masses of aircraft. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2018;(3):105–114. (In Russ.)
7. Klyuchnikov A.V., Aбышев N.A. Review of Russian patents in the direction of experimental determination of mass-centering and inertial characteristics of unmanned aerial vehicles. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2019;1:149–155. (In Russ.)
8. Aбышев N.A., Klyuchnikov A.V. On the issue of optimizing the choice of bench equipment used for balancing aircraft. *Vestnik Kontserna VKO «Almaz-Antey» = Bulletin of the Concern of East Kazakhstan Region "Almaz-Antey"*. 2020;(3):77–85. (In Russ.)
9. Andreev S.V., Klyuchnikov A.V., Mikhaylov E.F. Prospects for using the dynamic balancing method to determine the parameters of the mass asymmetry of an aircraft. *Reshetnevskie chteniya: materialy XVIII Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. (g. Krasnoyarsk, 1–10 noyabrya 2014 g.): v 2 ch. = Reshetnev readings : materials of the XVIII International Scientific and Technical conf. (Krasnoyarsk, November 1-10, 2014) : in 2 parts*. Krasnoyarsk: SibGAU, 2014;(pt. 1):8–10. (In Russ.)
10. Klyuchnikov A.V., Sidorov A.V. Application of the dynamic balancing method for precision control of mass-inertia asymmetry parameters of rotary objects. *Pribory i sistemy. Upravlenie. Kontrol'. Diagnostika = Instruments and systems. Management. Control. Diagnostics*. 2011;(3):48–53. (In Russ.)
11. Klyuchnikov A.V. A refined mathematical model for estimating and providing parameters of mass-inertia asymmetry of a long-dimensional rotary module. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2012;1:224–227. (In Russ.)
12. Patent № 2292534 Russian Federation MPK G 01 M 1/04. Rotor balancing method. L.M. Glazyrina, M.S. Karpovitskiy, A.V. Klyuchnikov, A.I. Mal'gin, G.G. Smirnov, Yu.P. Fomin; appl. 27.04.2004; publ. 27.01.2007; bull. № 3. (In Russ.)

13. Abyshev N.A., Klyuchnikov A.V., Mikhaylov E.F., Chertkov M.S. Stand for precision contactless balancing of conical rotors in dynamic mode. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and quality*. 2014;2:234–236. (In Russ.)
14. Klyuchnikov A.V. A way to eliminate the influence of technological equipment on the measurement results in the process of dynamic balancing of an aircraft. *Reshetnevskie chteniya: materialy XIX Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. (g. Krasnoyarsk, 1–10 noyabrya 2015 g.): v 2 ch. = Reshetnev readings : materials of the XIX Inter-Dunar. scientific and technical. conf. (Krasnoyarsk, November 1-10, 2015) : in 2 parts*. Krasnoyarsk: SibGAU, 2015;(pt. 1):21–23. (In Russ.)
15. Andreev S.V., Klyuchnikov A.V., Lysykh A.V., Mikhaylov E.F. Calibration operations in the process of modular balancing of a part on an unconfigured dynamic balancing stand. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2013;2:129–131. (In Russ.)
16. Klyuchnikov A.V. Methodological support of the process of individual adjustment of the dynamic balancing stand to the object of control. *Innovatsionnye, informatsionnye i kommunikatsionnye tekhnologii: materialy XIV Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. (g. Sochi, 1–10 oktyabrya 2017 g.) = Innovative, information and communication technologies : materials of the XIV International Scientific and Practical Conference (Sochi, October 1-10, 2017)*. Moscow: Assotsiatsiya vypusnikov i sotrudnikov VVIA im. prof. Zhukovskogo, 2017:382–386. (In Russ.)
17. Patent 2453818 Russian Federation MPK G 01 M 01/22. A method for setting up a balancing stand to determine the parameters of mass-inertia asymmetry of rotors. A.V. Klyuchnikov; appl. 11.01.2011; publ. 20.06.2012; bull. № 17. (In Russ.)
18. Abyshev N.A., Klyuchnikov A.V., Shagimuratov M.D. Compensation of errors of imbalances caused by phase shifts of measuring signals of the balancing stand. *Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik Povolzh'ya = Scientific and Technical Bulletin of the Volga region*. 2019;(7):15–18. (In Russ.)
19. Klyuchnikov A.V., Shagimuratov M.D. Principles of construction and structure of the system of diagnostics of asymmetry in the distribution of aircraft masses. *Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik Povolzh'ya = Scientific and Technical Bulletin of the Volga region*. 2015;(2):141–143. (In Russ.)
20. Patent 2499985 Russian Federation MPK G 01 M 11/16. Method of balancing the rotor in one plane of correction. A.V. Klyuchnikov; appl. 11.04.2012; publ. 27.11.2013; bull. № 33. (In Russ.)
21. Patent 2694142 Russian Federation MPK G 01 M 11/16. Method of balancing the rotor in one plane of correction. A.V. Klyuchnikov; appl. 27.09.2018; publ. 09.07.2019; bull. № 19. (In Russ.)
22. Klyuchnikov A.V. Numerical algorithm optimization of the process of balancing a conical flying model on a dynamic balancing stand. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta = Bulletin of the Siberian State Aerospace University*. 2016;17(2):309–317. (In Russ.)
23. Klyuchnikov A.V. Elaboration and testing of the algorithm, which ensures an achievement of minimal deviation angle of flying model main centroidal axis of inertia during it counterbalancing process in a sole correction flatness. *Siberian Journal of Science and Technology*. 2020;21(1):70–77.
24. Andreev S.V., Klyuchnikov A.V., Mikhailov E.F., Lysykh A.V. Peculiarities of measuring signals processing during detail's dynamic counterbalancing. *Innovative Information Technologies: Materials of the III International scientific-practical conference (Prague, April, 21–25, 2014): in 4 parts*. Moscow: HSE, 2014;(pt. 3):238–242.
25. Klyuchnikov A.V. Processing of measuring signals in the process of dynamic balancing of the aircraft. *Vestnik vozdušno-kosmicheskoy oborony = Bulletin of Aerospace Defense*. 2019;(1):86–92. (In Russ.)

### Информация об авторах / Information about the authors

#### Александр Васильевич Ключников

кандидат технических наук, главный специалист,  
Российский федеральный ядерный центр –  
Всероссийский научно-исследовательский институт  
технической физики имени академика Е. И. Забабахина  
(Россия, Челябинская обл., г. Снежинск,  
ул. Васильева, 13)  
E-mail: a.klyuchnikov@bk.ru

#### Aleksandr V. Klyuchnikov

Candidate of technical sciences, chief specialist,  
Russian Federal Nuclear Centre –  
All-Russia Research Institute of Technical Physics  
named after Academician E. I. Zababakhin  
(13 Vasilyeva street, Snezhinsk,  
Chelyabinsk region, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /**

**The authors declare no conflicts of interests.**

**Поступила в редакцию/Received 09.09.2021**

**Поступила после рецензирования/Revised 15.10.2021**

**Принята к публикации/Accepted 16.11.2021**

## АНАЛИЗ ОТКАЗОВ ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ ПРИ КОНТРОЛЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ УСТРОЙСТВА ПО КОСВЕННЫМ ПАРАМЕТРАМ

М. А. Савин<sup>1</sup>, А. К. Гришко<sup>2</sup>, В. Д. Зуев<sup>3</sup>, И. И. Кочегаров<sup>4</sup>, Е. М. Соловьева<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Мытищинский научно-исследовательский институт радиоизмерительных приборов, Мытищи, Московская обл., Россия

<sup>2,4,5</sup> Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

<sup>3</sup> Научно-исследовательский институт электронно-механических приборов, Пенза, Россия

<sup>1</sup> savin@mniirip.ru, <sup>2</sup> alexey-grishko@rambler.ru, <sup>3</sup> vdzuev@yandex.ru, <sup>4,5</sup> kipra@mail.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* По результатам анализа отказов электроники, 90 % отказов происходят по весьма ограниченному количеству типов отказавших составных компонентов. Возможные причины отказов этих типов компонентов легко поддаются анализу. В работе рассматриваются широко применяемые в современной аппаратуре элементы – полевые транзисторы. Проводится анализ статистических данных по причинам отказов, направленный на определение работоспособного состояния устройства. *Материалы и методы.* Для решения поставленных задач применяются методы системного анализа, теории надежности, физики полупроводников. *Результаты.* В условиях стабильного режима работы (постоянная частота переключения, скважность, протекающий ток, температура окружающей среды) температура транзистора может использоваться как параметр, отражающий сопротивление канала и другие деградиационные процессы (увеличение тока утечки, увеличение длительности процесса переключения). При этом необходимо учитывать зависимость сопротивления канала от температуры. *Выводы.* На основе приведенных в работе данных при разработке устройств целесообразно создавать систему регистрации ключевых параметров, позволяющую в режиме реального времени отслеживать условия эксплуатации и с их учетом прогнозировать остаточный ресурс электронного блока.

**Ключевые слова:** отказ, надежность, температура, транзистор, ресурс, модель

**Финансирование.** Статья подготовлена в рамках реализации проекта «Повышение точности интеллектуального прогнозирования надежности электронной аппаратуры и техники при критических внешних воздействиях факторов» (Соглашение № 22-29-20318) при финансовой поддержке Российского научного фонда.

**Для цитирования:** Савин М. А., Гришко А. К., Зуев В. Д., Кочегаров И. И., Соловьева Е. М. Анализ отказов полевых транзисторов при контроле работоспособности устройства по косвенным параметрам // Надежность и качество сложных систем. 2022. № 1. С. 91–97. doi:10.21685/2307-4205-2022-1-10

## ANALYSIS OF FAILURES OF FIELD-EFFECT TRANSISTORS WHEN MONITORING THE OPERABILITY OF THE DEVICE BY INDIRECT PARAMETERS

M.L. Savin<sup>1</sup>, A.K. Grishko<sup>2</sup>, V.D. Zuev<sup>3</sup>, I.I. Kochegarov<sup>4</sup>, E.M. Solov'eva<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Mytishchi Research Institute of Radio Measuring Instruments, Mytishchi, Moscow region, Russia

<sup>2,4,5</sup> Penza State University, Penza, Russia

<sup>3</sup> Scientific and Research Institute of Electronic and Mechanic Instruments, Penza, Russia

<sup>1</sup> savin@mniirip.ru, <sup>2</sup> alexey-grishko@rambler.ru, <sup>3</sup> vdzuev@yandex.ru, <sup>4,5</sup> kipra@mail.ru

**Abstract.** *Background.* According to electronics failure analysis, 90 % of failures occur in a very limited number of failed component types. Possible causes of failures of these types of components are easy to analyze. The paper considers elements widely used in modern equipment – field-effect transistors. The analysis of statistical data on the causes of failures is carried out, aimed at determining the operable state of the device. *Materials and methods.* Methods of system analysis, reliability theory, and semiconductor physics are used to solve the set tasks. *Results.* Under conditions of stable operation (constant switching frequency, duty cycle, flowing current, ambient temperature), the transistor temperature can be used as a parameter reflecting the channel resistance and other degradation processes

(increase in leakage current, increase in the duration of the switching process). In this case, it is necessary to take into account the dependence of the channel resistance on temperature. *Conclusions.* On the basis of the data presented in the work, when developing devices, it is advisable to create a system for recording key parameters that allows real-time monitoring of operating conditions and, taking them into account, predicting the remaining life of the electronic unit.

**Keywords:** failure, reliability, temperature, transistor, resource, model

**Acknowledgments.** The article was prepared within the framework of the project "Improving the accuracy of intelligent forecasting of the reliability of electronic equipment and equipment under critical external influencing factors" (Agreement No. 22-29-20318) with the financial support of the Russian Science Foundation.

**For citation:** Savin M.L., Grishko A.K., Zuev V.D., Kochegarov I.I., Solov'eva E.M. Analysis of failures of field-effect transistors when monitoring the operability of the device by indirect parameters. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2022;(1):91–97. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2022-1-10

### Введение

Силовой транзистор – ключевой элемент любого импульсного источника питания. Его надежность во многом определяет надежность устройства в целом. Использование транзистора с лучшими параметрами зачастую позволяет в разы уменьшить выделяемую устройством мощность, а следовательно, уменьшить требования к теплоотводу и снизить теплонагруженность устройства, что положительно сказывается на надежности. При этом даже незначительное отклонение параметров транзистора за указанные в документации нормы способно привести к катастрофическим последствиям, вплоть до полного выхода устройства из строя.

В настоящее время в силовой электронике широчайшее распространение получили полевые транзисторы с изолированным затвором (MOSFET) (рис. 1). Их применение позволяет минимизировать потери мощности и повысить эффективность устройства.

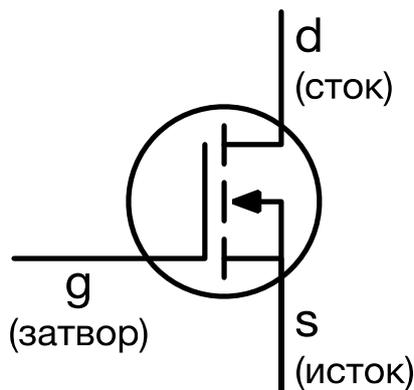


Рис. 1. Условное обозначение  $n$ -канального полевого транзистора с изолированным затвором

Как было показано в ряде работ, большинство видов постепенных отказов различной природы проявляются одинаково – в виде деградации основных электрических параметров транзистора [1–3]. Выделим параметры, которые возможно использовать в качестве показателей работоспособности компонента.

### Анализ отказов транзистора – напряжение пробоя сток-исток $V_{ds}$

Напряжение пробоя определяется как значение напряжения при закрытом состоянии транзистора, при котором значение тока сток-исток превышает заданную величину, типовое значение – 1 мА. Альтернативный параметр, отражающий те же зависимости, но более подходящий для экспериментальных измерений – ток утечки. Ток утечки – это значение тока сток-исток в выключенном состоянии при фиксированном значении напряжения. Экспериментальные данные показывают, что вследствие процессов деградации в течение срока службы транзистора напряжение пробоя уменьшается, а ток утечки, соответственно, увеличивается. Результаты, полученные в одной из работ, представлены в табл. 1 [4].

Результаты исследований

Номер образца	Ток утечки $I_{ds\_leak}$ при напряжении $V_{ds} = 25$ В, мкА	Сопротивление закрытого перехода, $R_{ds\_off}$ , кОм	Продолжительность эксперимента, часов
2	170	120	1750
14	1700	12	1053
16	650	31	1223
17	Короткое замыкание	0	750
20	1700	12	1695
24	32	630	958
25	280	71	962
26	880	23	1099
27	690	29	1210
Новый транзистор	<1	$\infty$	0

Эти данные показывают, что ток утечки во время эксплуатации может значительно увеличиваться относительно указанного в технической документации, а напряжения пробоя, соответственно, значительно уменьшаться. Это приводит к следующему:

- снижается электрическая прочность устройства, что может привести к пробое даже при номинальных значениях напряжения;
- увеличивается рассеиваемая мощность из-за больших потерь в закрытом состоянии, что приводит к увеличению температуры транзистора.

#### Анализ отказов транзистора – напряжение включения (пороговое напряжение) $V_{gs\_on}$

Пороговое напряжение – это значение напряжения затвор-исток  $V_{gs}$ , при котором ток  $I_{ds}$  увеличивается до некоторого фиксированного значения, обычно используется значение 250 мкА. Дegrадация транзистора проявляется в увеличении значения этого напряжения (рис. 2) [5]. Это приводит к увеличению времени включения и, соответственно, к увеличению потерь мощности при переключении, что вызывает увеличение температуры транзистора.

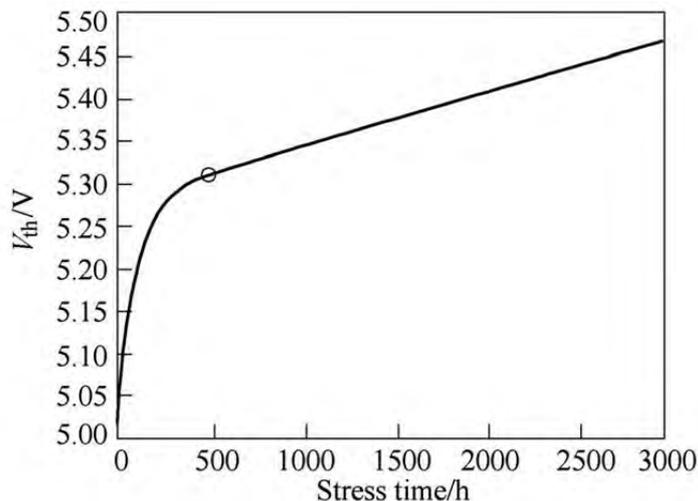


Рис. 2. Увеличение порогового напряжения вследствие деградации

#### Анализ отказов транзистора – сопротивление открытого канала $R_{ds\_on}$

Сопротивление открытого канала – важнейший параметр полевого транзистора. На него оказывают влияние практически все механизмы отказа [1, 3]:

- повреждение от статического разряда (частичное);
- воздействие тока или напряжения, превышающее допустимые значения;
- нарушение контакта распаячных проводов от кристалла к корпусу из-за температурного или механического воздействия;

- расслоение кристалла из-за температурного или механического воздействия;
- снижение подвижности носителей заряда.

Все механизмы при этом имеют однонаправленное влияние – при деградации  $R_{ds}$  увеличивается вне зависимости от воздействующего фактора. Наглядно данная зависимость представлена на рис. 3 для группы из шести тестируемых транзисторов. На рис. 4 представлено измеренное значение канала для образца 36 и построенное на основе экспериментальных данных усредненное значение.

Данный параметр также чрезвычайно важен для правильной работы схемы. Увеличение сопротивления канала приводит к резкому увеличению выделяемой мощности и нагреву транзистора, что приводит к еще более быстрому процессу деградации.

Стоит отметить, что начальное значение сопротивления канала может варьироваться в широких пределах вследствие технологического доступа, однако его максимально допустимое значение является строго определенным в технической документации. Таким образом, для оценки деградации необходимо говорить об изменении сопротивления канала  $\Delta R_{ds}$ .

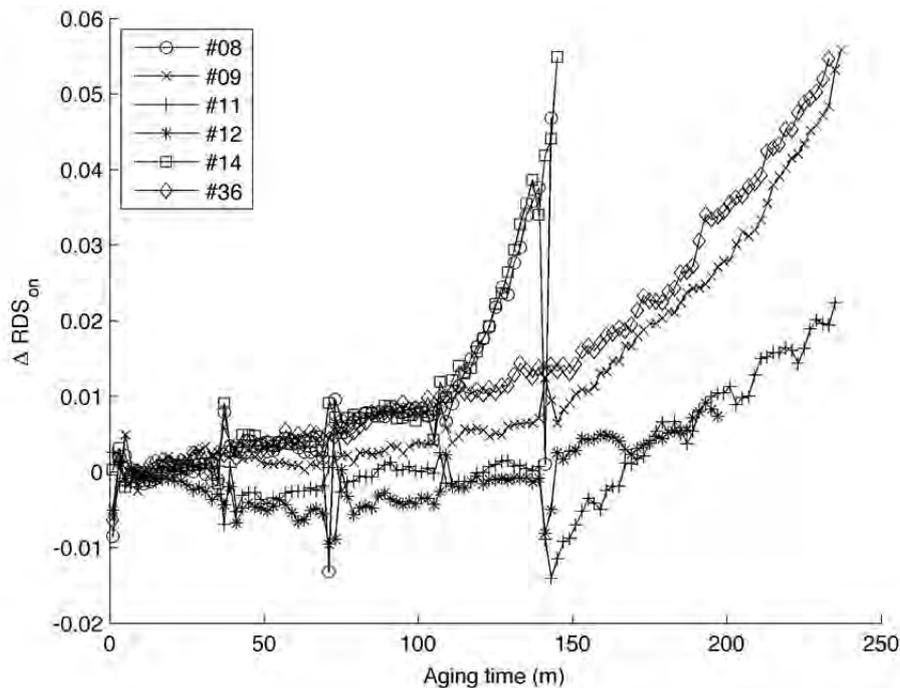


Рис. 3. Изменение  $R_{ds}$  вследствие деградации для группы из шести транзисторов

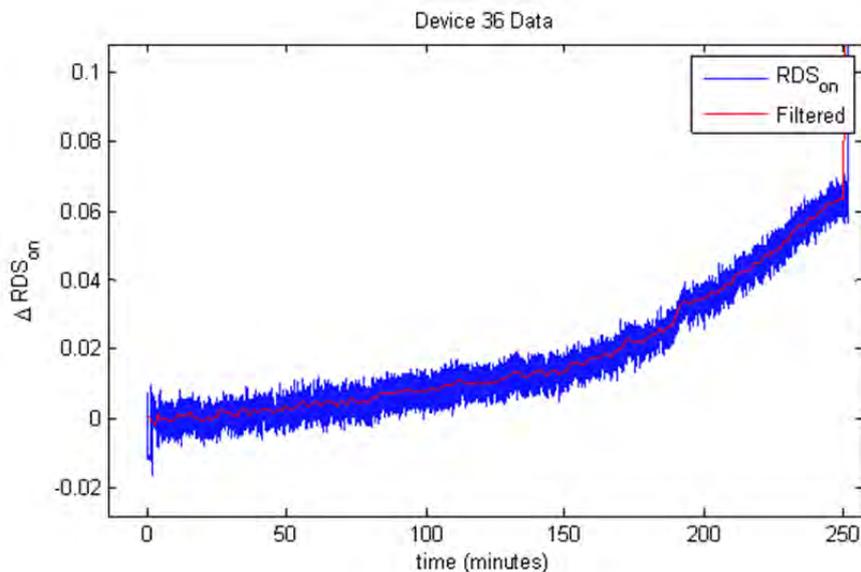


Рис. 4. Изменение  $R_{ds}$  вследствие деградации транзистора 36 и усредненное значение

Как видно из рис. 3 и 4, зависимость изменения сопротивления канала  $\Delta R_{ds}$  от времени при условии постоянства воздействующих факторов носит экспоненциальный характер и описывается уравнением [3]

$$\Delta R_{ds} = \alpha(e^{\beta t} - 1), \quad (1)$$

где  $\alpha$  и  $\beta$  – коэффициенты, которые могут быть заданы заранее по известным лабораторным данным или вычисляться в режиме реального времени на основе измеренных значений. Использование формулы (1) позволяет не только оценить степень деградации компонента, но и рассчитать, когда значение сопротивления выйдет за пределы допустимого.

Рассчитаем ориентировочную температуру кристалла транзистора IRF520NS, который использовался в ходе эксперимента. Транзистор выполнен в корпусе D2Pak и предназначен для поверхностного монтажа. Типовое тепловое сопротивление кристалл-окружающая среда  $R_{\Theta JA}$  составляет  $40 \text{ }^\circ\text{C/W}$ . Будем учитывать только кондуктивные потери, вызванные ненулевым сопротивлением канала. Температуру окружающей среды  $t_A$  будем считать равной  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ . Тогда температуру кристалла можно рассчитать по формуле

$$t_J = t_A + R_{JA}P, \quad (2)$$

где  $P = I_{ds}^2 R_{ds}$  – рассеиваемая транзистором мощность, для расчета возьмем типовое значение  $2 \text{ Вт}$ , а типовое значение сопротивления канала  $R_{ds} = 0,2 \Omega$ , откуда  $I_{ds} = 3,162 \text{ А}$ . Типовое значение температуры составит  $t_J = 105 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Согласно рис. 4 изменение сопротивления на момент окончания эксперимента составило примерно  $+0,06 \Omega$ , или  $+30 \%$  от допустимого по документации значения. Температура кристалла при этом составила примерно  $t_J = 129 \text{ }^\circ\text{C}$ . Таким образом,  $\Delta t_J = +24 \text{ }^\circ\text{C}$ , или  $+22,9 \%$  от базовой величины.

Стоит отметить, что сопротивление канала имеет сильную зависимость от температуры [6] (рис. 5).

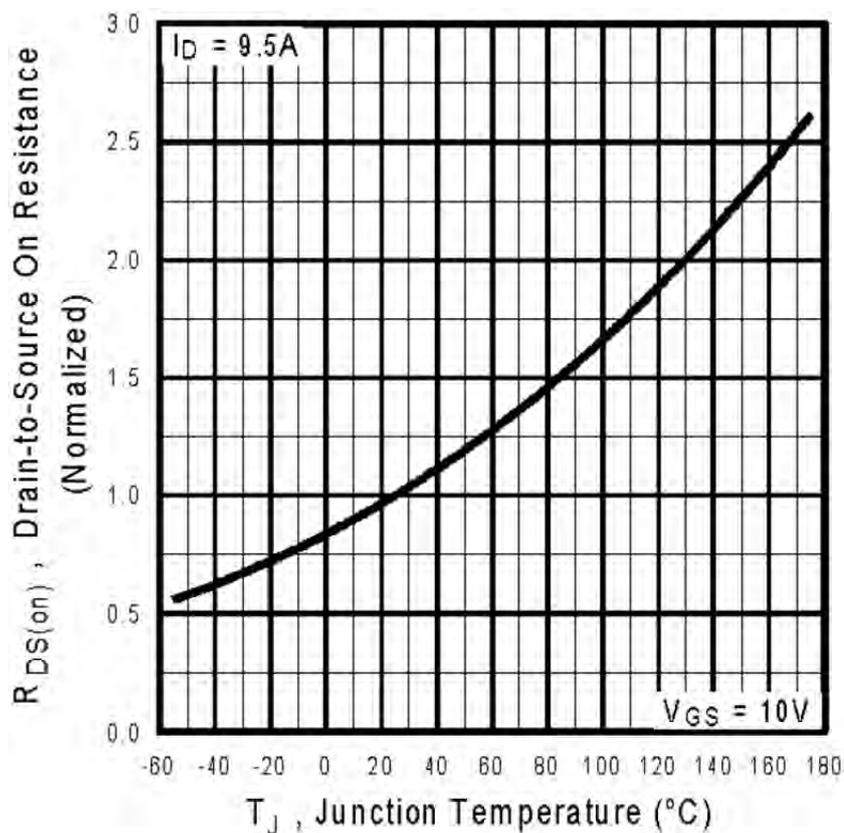


Рис. 5. Зависимость сопротивления канала от температуры

Сказанное выше позволяет сделать следующие выводы:

- 1) сопротивление канала является одним из наиболее репрезентативных параметров для оценки деградации полевого транзистора;
- 2) различные механизмы отказа оказывают одинаковое по знаку действие на сопротивление канала – увеличивают его;
- 3) в условиях стабильного режима работы (постоянная частота переключения, скважность, протекающий ток, температура окружающей среды) температура транзистора может использоваться как параметр, отражающий сопротивление канала и другие деградационные процессы (увеличение тока утечки, увеличение длительности процесса переключения). При этом необходимо учитывать зависимость сопротивления канала от температуры.

### Заключение

В ходе данной работы были рассмотрены современные подходы к определению остаточного ресурса электронных устройств. Отмечены недостатки используемых подходов.

Проведенный анализ статистического распределения отказов по компонентам и причин отказов электронных устройств и электронных компонентов позволил продемонстрировать значимость внешних воздействующих факторов в процессах отказов. Был проведен анализ воздействий факторов на продолжительность службы устройства, на основе которого была разработана методика оценки остаточного ресурса электронного блока на основе математической модели, учитывающей условия эксплуатации.

С учетом полученной математической модели предложена практическая реализация системы регистрации внешних воздействий, позволяющая в режиме реального времени отслеживать условия эксплуатации и с их учетом прогнозировать остаточный ресурс электронного блока.

Предложенная методика и прикладная реализация имеют практическую значимость в таких применениях электроники, отказ которых может приводить к причинению вреда здоровью человека, а также издержкам, многократно превышающим затраты на своевременное техническое обслуживание или замену.

### Список литературы

1. Wu Lifeng [et al.]. Research on failure analysis method of the key components in SMPS // *Prognostics and System Health Managment Confernece*. 2011. P. 1–6.
2. Celaya J. [et al.]. Prognostics of power MOSFETs under thermal stress accelerated aging using data-driven and mod-el-based methodologies // *Proc. Int. Conf. Progn. Health Manag. Montr.* 2011. Vol. 2.
3. Yang S. [et al.]. Condition Monitoring for Device Reliability in Power Electronic Converters: A Review // *IEEE Trans. Power Electron.* 2010. Vol. 25, № 11. P. 2734–2752.
4. Vaalasaranta I., Pippola J., Frisk L. Power MOSFET failure and degradation mechanisms in flyback topology under high temperature and high humidity conditions // *2013 9th IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED)*. 2013. P. 16–22.
5. Luo Y. [et al.]. Failure analysis of power electronic devices and their applications under extreme conditions // *Chin. J. Electr. Eng.* 2016. Vol. 2, № 1. P. 91–100.
6. International Rectifier. PD-95749. IRF520NSPbF. 2004.

### References

1. Wu Lifeng [et al.]. Research on failure analysis method of the key components in SMPS. *Prognostics and System Health Managment Confernece*. 2011:1–6.
2. Celaya J. [et al.]. Prognostics of power MOSFETs under thermal stress accelerated aging using data-driven and mod-el-based methodologies. *Proc. Int. Conf. Progn. Health Manag. Montr.* 2011;2.
3. Yang S. [et al.]. Condition Monitoring for Device Reliability in Power Electronic Converters: A Review. *IEEE Trans. Power Electron.* 2010;25(11):2734–2752.
4. Vaalasaranta I., Pippola J., Frisk L. Power MOSFET failure and degradation mechanisms in flyback topology under high temperature and high humidity conditions. *2013 9th IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED)*. 2013:16–22.
5. Luo Y. [et al.]. Failure analysis of power electronic devices and their applications under extreme conditions. *Chin. J. Electr. Eng.* 2016;2(1):91–100.
6. *International Rectifier. PD-95749. IRF520NSPbF*. 2004.

**Информация об авторах / Information about the authors**

**Максим Леонидович Савин**

и. о. директора,  
Мытищинский научно-исследовательский институт  
радиоизмерительных приборов  
(Россия, Московская обл., г. Мытищи,  
ул. Колпакова, 2А)  
E-mail: savin@mniirip.ru

**Алексей Константинович Гришко**

кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры конструирования  
и производства радиоаппаратуры,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: alexey-grishko@rambler.ru

**Вячеслав Дмитриевич Зуев**

кандидат технических наук,  
генеральный директор,  
Научно-исследовательский институт  
электронно-механических приборов  
(Россия, г. Пенза, ул. Каракозова, 44)  
E-mail: vdzuev@yandex.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@mail.ru

**Елена Михайловна Соловьева**

магистрант,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: kipra@pnzgu.ru

**Maksim L. Savin**

Acting director,  
Mytishchi Research Institute of Radio Measuring  
Instruments  
(2A Kolpakova street, Mytishchi,  
Moscow region, Russia)

**Aleksey K. Grishko**

Candidate of technical sciences, associate professor,  
associate professor of the sub-department  
of radio equipment design and production,  
Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Vyacheslav D. Zuev**

Candidate of technical sciences, general director,  
Scientific and Research Institute  
of Electronic and Mechanic Instruments  
(44 Karakozova street, Penza, Russia)

**Igor I. Kochegarov**

Candidate of technical sciences, associate professor,  
associate professor of the sub-department  
of radio equipment design and production,  
Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Elena M. Solovieva**

Master degree student,  
Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /  
The authors declare no conflicts of interests.**

**Поступила в редакцию/Received 09.09.2021**

**Поступила после рецензирования/Revised 15.10.2021**

**Принята к публикации/Accepted 16.11.2021**

## МЕТОДИКА КОНТРОЛЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ УСТРОЙСТВА ПО КОСВЕННЫМ ПАРАМЕТРАМ

М. Л. Савин<sup>1</sup>, В. Д. Зуев<sup>2</sup>, И. И. Кочегаров<sup>3</sup>, Е. М. Соловьева<sup>4</sup>, А. В. Лысенко<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Мытищинский научно-исследовательский институт  
радиоизмерительных приборов, Мытищи, Московская обл., Россия  
<sup>2</sup> Научно-исследовательский институт электронно-механических приборов, Пенза, Россия  
<sup>3,4,5</sup> Пензенский государственный университет, Пенза, Россия  
<sup>1</sup> savin@mniirp.ru, <sup>2</sup> vdzuev@yandex.ru, <sup>3,4</sup> kipra@mail.ru, <sup>5</sup> lysenko\_av@bk.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Около 90 % отказов электроники происходят по весьма ограниченному количеству типов отказавших составных компонентов. Данные причины отказов этих типов компонентов легко анализируются. Рассматриваются наименее надежные по статистике элементы – силовые транзисторы и электролитические конденсаторы. Проводится анализ влияющих факторов и предлагается методика, направленная на определение работоспособного состояния устройства. *Материалы и методы.* Для решения поставленных задач применяются методы системного анализа, теории надежности, материаловедения. *Результаты.* Рассмотрены современные подходы для контроля работоспособности устройства по косвенным параметрам электронных устройств. Отмечены недостатки используемых подходов. Был проведен анализ воздействий факторов на продолжительность службы устройства, на основе которого была разработана методика оценки контроля работоспособности устройства по косвенным параметрам, относящимся к силовым транзисторам и электролитическим конденсаторам для электронного блока на основе математической модели, учитывающей условия эксплуатации. *Выводы.* На основе предложенной методики целесообразно создать систему регистрации внешних воздействий, позволяющую в режиме реального времени отслеживать условия эксплуатации и с их учетом прогнозировать остаточный ресурс электронного блока.

**Ключевые слова:** отказ, надежность, температура, вибрация, ресурс, модель

**Финансирование.** Статья подготовлена в рамках реализации проекта «Повышение точности интеллектуального прогнозирования надежности электронной аппаратуры и техники при критических внешних воздействующих факторов» (Соглашение № 22-29-20318) при финансовой поддержке Российского научного фонда.

**Для цитирования:** Савин М. Л., Зуев В. Д., Кочегаров И. И., Соловьева Е. М., Лысенко А. В. Методика контроля работоспособности устройства по косвенным параметрам // Надежность и качество сложных систем. 2022. № 1. С. 98–107. doi:10.21685/2307-4205-2022-1-11

## METHODS OF PERFORMANCE MONITORING DEVICES BY INDIRECT PARAMETERS

M.L. Savin<sup>1</sup>, V.D. Zuev<sup>2</sup>, I.I. Kochegarov<sup>3</sup>, E.M. Solov'eva<sup>4</sup>, A.V. Lysenko<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Mytishchi Research Institute of Radio Measuring Instruments  
<sup>2</sup> Scientific and Research Institute of Electronic and Mechanic Instruments, Penza, Russia  
<sup>3,4,5</sup> Penza State University, Penza, Russia  
<sup>1</sup> savin@mniirp.ru, <sup>2</sup> vdzuev@yandex.ru, <sup>3,4</sup> kipra@mail.ru, <sup>5</sup> lysenko\_av@bk.ru

**Abstract.** *Background.* According to electronics failure analysis, 90 % of failures occur in a very limited number of failed component types. Possible causes of failures of these types of components are easy to analyze. The paper considers the least statistically reliable elements – power transistors and electrolytic capacitors. The analysis of influencing factors is carried out and a technique is proposed aimed at determining the operable state of the device. *Materials and methods.* To solve the tasks set, methods of system analysis, reliability theory, and materials science are used. *Results.* The article discusses modern approaches to monitoring the performance of a device by indirect parameters of electronic devices. The shortcomings of the approaches used are noted. An analysis of the impact of factors on the service life of the device was carried out, on the basis of which a methodology was developed for assessing the control of the device's performance by indirect parameters related to power transistors and electrolytic capacitors for the electronic unit based on a mathematical model that takes into account operating conditions. *Conclusions.* Based on the proposed methodology, it is advisable to create a system for registering external influences, which allows real-time

monitoring of operating conditions and, taking them into account, predicting the residual life of the electronic unit.

**Keywords:** failure, reliability, temperature, vibration, resource, model

**Acknowledgments.** The article was prepared within the framework of the project "Improving the accuracy of intelligent forecasting of the reliability of electronic equipment and equipment under critical external influencing factors" (Agreement No. 22-29-20318) with the financial support of the Russian Science Foundation.

**For citation:** Savin M.L., Zuev V.D., Kochegarov I.I., Solov'eva E.M., Lysenko A.V. Methods of performance monitoring devices by indirect parameters. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2022;(1):98–107. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2022-1-11

## Введение

Согласно докладу центра перспективной инженерии жизненного цикла (CALCE), в 30 % случаев отказа электронного устройства виновником отказа являются конденсаторы, в 26 % – печатные платы, в 21 % – полупроводники в пластиковых корпусах и в 13 % – пайка [1]. Наглядное представление долей отказов изображено на рис. 1.

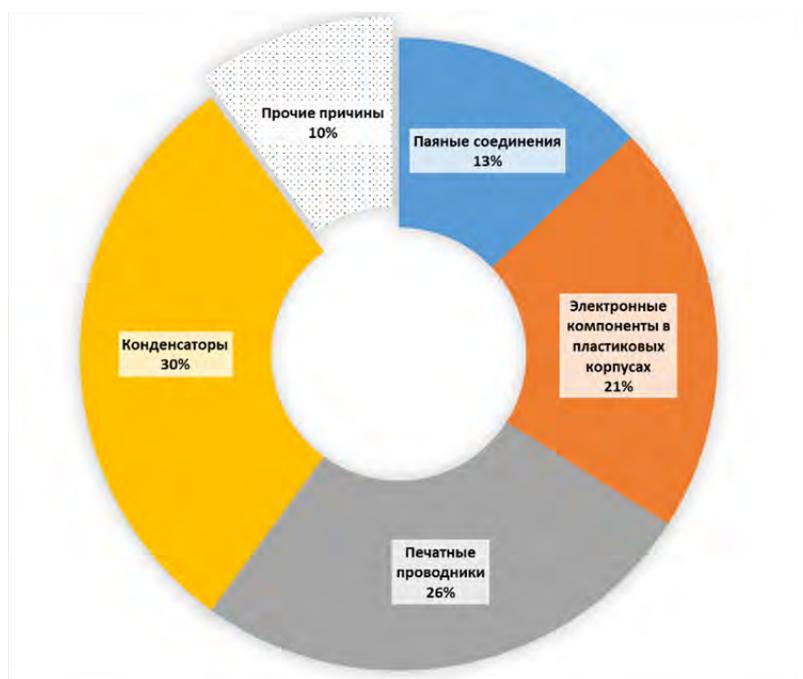


Рис. 1. Доля отказов различных групп компонентов

В исследовании [2] рассматриваются отказы силовых преобразователей с целью более точного отслеживания технического состояния устройства. Распределение отказов по компонентам очень схоже с ранее упомянутым на рис. 1.

Таким образом, 90 % отказов происходят по весьма ограниченному количеству типов отказавших составных компонентов. Возможные причины отказов этих типов компонентов легко поддаются анализу.

## Описание методики

Цель представленной в данной работе методики – определить, находится ли устройство в работоспособном состоянии и не достигло ли оно предельного состояния, когда отказ может произойти в ближайшее время. Необходимо также отметить, что целью данной методики не является определение причины отказа. Для этого существуют специализированные отрасли науки и техники, такие как физика отказов (Physics-of-Failure, PoF) и разработка для надежности (Design-for-Reliability, DfR).

Как было сказано выше, существующие методики позволяют на этапе разработки определить примерный срок службы устройства, однако точность этого расчета оставляет желать лучшего. В настоящее время наблюдается тенденция к увеличению влияния деградации и старения на надеж-

ность устройства, в результате чего интенсивность отказов уже нельзя считать постоянной на протяжении всего срока службы (рис. 2) [3, 4].

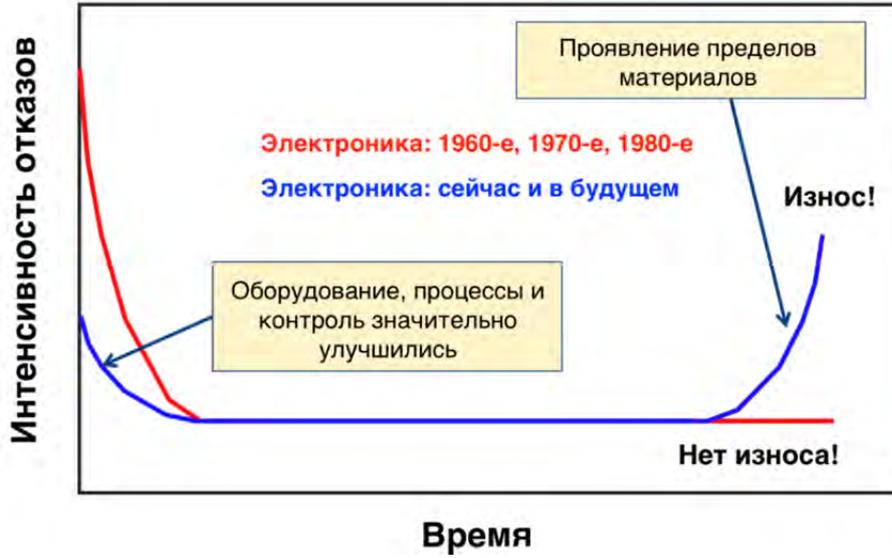


Рис. 2. Интенсивность отказов сейчас и в прошлом

Таким образом, для точного определения работоспособности изделия необходимо оценивать его состояние в настоящий момент времени. Очевидно, что напрямую контролировать параметры каждого электронного компонента в современном устройстве не представляется возможным из-за огромного числа этих компонентов и сложности прямого контроля параметров. Как показывает ряд работ, 77 % всех отказов приходится на дефекты печатных плат, отказы конденсаторов и полупроводниковых компонентов (рис. 3) [5, 6]. Таким образом, большую часть отказов можно предсказать, оценивая состояние этих групп компонентов.

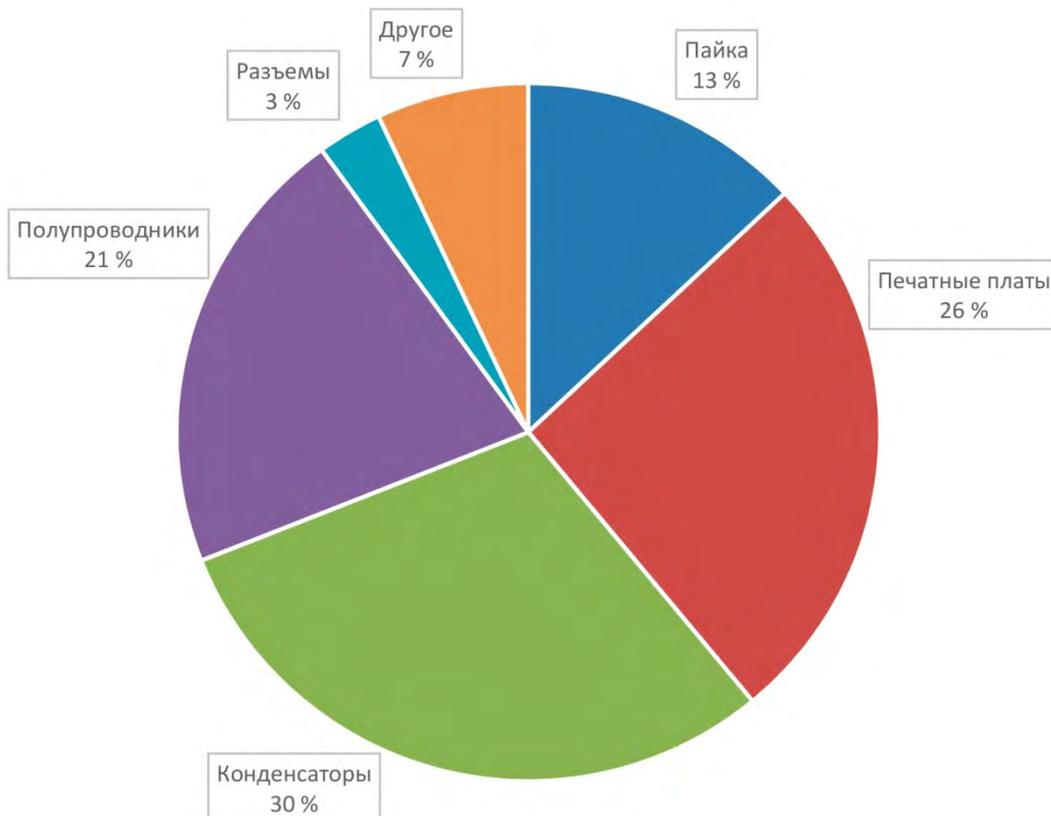


Рис. 3. Доля отказов различных групп компонентов

Рассмотрим основные типы компонентов, наиболее подверженных отказу, возможные виды отказов и их причины. Также отметим характер возникновения отказа – постепенный (деградация) или внезапный (табл. 1) [7–11].

Таблица 1

## Анализ возможных отказов компонентов

Тип компонента	Вид отказа	Причина	Хар. отк.
Печатная плата (PCB)	Короткое замыкание	– Дефекты производства – Возникновение проводящих нитей	В
	Увеличение тока утечки	– Недостаточная очистка при производстве – Окисление	П
	Обрыв	– Вибрация – Дефекты производства	В
Конденсатор	Короткое замыкание	– Электрический пробой – Вибрация (керамические конденсаторы)	В
	Обрыв	– Вибрация	В
	Увеличение тока утечки	– Микротрещины (керамические конденсаторы) – Деградация оксидного слоя (электролитические конденсаторы) – Тепловое воздействие	П
	Старение: уменьшение емкости, увеличение эквивалентного последовательного сопротивления	– Тепловое воздействие – Деградация изолятора	П
Полупроводниковые компоненты	Короткое замыкание	– Воздействие повышенного напряжения/тока, статического электричества – Электромиграция – Тепловое воздействие	В
	Обрыв	– Воздействие повышенного напряжения/тока, статического электричества – Вибрация – Тепловое воздействие	В
	Увеличение сопротивления перехода	– Воздействие повышенного напряжения/тока, статического электричества – Тепловое воздействие	П
	Увеличение тока утечки	– Воздействие повышенного напряжения/тока, статического электричества – Тепловое воздействие	П

Примечание: В – внезапный отказ, П – постепенный отказ.

Внезапные отказы происходят, как правило, вследствие неожиданных внешних воздействий, что делает невозможным их предсказание.

Выявление дефектов печатной платы в работающем устройстве также затруднено, так как эти дефекты либо проявляются внезапно, либо недоступны для измерения в работающем устройстве. Влияние вибрации сильно связано с геометрическими параметрами печатной платы с компонентами, а также особенностями технологии. Эти факторы делают невозможным создание обобщенной модели работоспособности печатной платы. К тому же большая часть дефектов платы проявляется в начальный период эксплуатации [12].

Контроль работоспособности сложных цифровых микросхем, таких как ПЛИС и микроконтроллеры, реализуется программными методами проверки и мажоритарным резервированием [13]. Данный вопрос также решается теорией функциональной безопасности и соответствующими стандартами.

Применение смарт-компонентов, о которых было сказано выше, позволяет решить целый ряд проблем мониторинга отказов и защиты.

Таким образом, с учетом сказанного выше контроль работоспособности необходим для двух групп компонентов, а также функциональных блоков на их основе [9]:

– конденсаторы, в особенности электролитические, как наиболее подверженные процессу деградации при эксплуатации [12, 14];

– дискретные полупроводниковые компоненты, для которых нет аналогов с возможностью диагностики и мониторинга.

Как видно из табл. 1, тепловое воздействие служит причиной для большинства видов отказов. Следовательно, именно наиболее теплонагруженные компоненты подвержены частым отказам.

В современной электронике наиболее теплонагруженным функциональным блоком как правило является источник питания. Более того, его надежность и отказоустойчивость являются определяющим фактором для надежности всего устройства в целом. Низкая надежность этого блока относительно остальной части устройства зачастую приводит к необходимости резервирования (дублирования) источника питания, что увеличивает стоимость и геометрические размеры конечного устройства.

Для уменьшения размера современные источники питания наиболее часто являются импульсными. Такой тип источников включает в себя полупроводниковые компоненты (транзисторы и диоды), работающие в условиях повышенных температур, и конденсаторы, как правило электролитические, которые также подвержены заметному процессу деградации [9].

Сформулируем основные шаги методики, необходимые для контроля работоспособности устройства по косвенным параметрам:

- 1) выявляем наименее надежные компоненты (на этапе разработки);
- 2) определяем параметры компонентов, позволяющие контролировать степень их деградации;
- 3) определяем подходящие для контроля параметры системы, математически связываем их с параметрами компонентов из пункта 2;
- 4) разрабатываем схемы контроля параметров системы;
- 5) встраиваем их в основную схему;
- 6) определяем граничные значения, определяющие диапазоны нормальной работы, предельного состояния и неработоспособного состояния.

Как было сказано выше, наименее надежными элементами являются силовые транзисторы и электролитические конденсаторы. Рассмотрим, как проявляются процессы деградации их параметров.

### **Анализ влияющих факторов – повышенная температура**

Рассмотренные выше (табл. 1) отказы, которые провоцируются повышенной температурой, являются в своем роде макропроявлениями процессов, проходящих на молекулярном уровне. Поэтому известные зависимости, характеризующие процессы, происходящие на молекулярном уровне, будут справедливы и в отношении оценки остаточного ресурса электроники.

Именно такой подход принят стандартами JEDEC для оценки результатов, полученных при проведении ускоренных испытаний на надежность (Highly accelerated stress test), проводимых по стандарту JESD22-A118 [6].

Ускоренные испытания по стандарту JESD22-A118 представляют собой 96-часовые испытания в герметичной камере, в которой поддерживается постоянная температура воздуха  $130 \pm 2$  °C и влажность воздуха  $85 \pm 5$  %.

Для интерпретации результатов ускоренных испытаний в показатели надежности устройства вводится понятие ускоряющего фактора (AF) – величина, численно равная отношению интенсивности отказов при условиях испытания к интенсивности отказов при рабочих условиях.

Изначально было экспериментально подтверждено, что влияние температуры на процессы старения подчиняется уравнению Аррениуса [7]. Уравнение Аррениуса связывает скорость протекания химической реакции с родом этой реакции и абсолютной температурой. Уравнение приведено в формуле

$$K = Ae^{-\frac{E_0}{kT}}, \quad (1)$$

где  $K$  – константа скорости химической реакции;  $A$  – частота столкновений реагирующих молекул;  $E_0$  – энергия активации, необходимая для прохождения химической реакции;  $T$  – абсолютная температура;  $k$  – постоянная Больцмана.

Так как при переводе результатов ускоренных испытаний в показатели надежности устройства инженера интересует относительное влияние температуры, то множитель  $A$  легко сокращается, тем более, что он не имеет смысла применительно к надежности электронных средств.

Энергия активации  $E_0$  характеризует род химической реакции. В случае с процессами старения электроники энергия активации – эмпирическое значение необходимое для инициации отказа. В каждом конкретном случае (электромиграция, окисление пайки, высыхание электролита и т.д.) необходимая энергия различна. Однако на основании эмпирических данных значение энергии активации для электроники в целом принимается равным 0,6...0,8 эВ [8].

Таким образом, ускоряющий фактор можно рассчитать по формуле

$$AF_T = e^{\frac{E_a}{k} \left( \frac{1}{T_{н.у.}} - \frac{1}{T_{эксп.}} \right)}, \quad (2)$$

где  $AF_T$  – ускоряющий фактор, связанный с температурой;  $E_a$  – энергия активации равная 0,6...0,8 эВ;  $T_{н.у.}$  – абсолютная температура, для которой рассчитана интенсивность отказов;  $T_{эксп.}$  – абсолютная температура эксплуатации;  $k$  – постоянная Больцмана.

Будем использовать  $E_a$  равной 0,7 эВ. Тогда уравнение (2) можно записать в более практичном виде

$$AF_T = e^{8116 \left( \frac{1}{293} - \frac{1}{T_{эксп.}} \right)}, \quad (3)$$

где  $AF_T$  – ускоряющий фактор, связанный с температурой;  $T_{эксп.}$  – абсолютная температура эксплуатации.

#### Анализ влияющих факторов – повышенная влажность

Процессы деградации, усугубляющиеся присутствием влажности, также в обязательном порядке зависят от температуры. Установленная зависимость процессов старения от уровня влажности по своему виду очень похожа на уравнение Аррениуса, однако имеется дополнительный множитель, учитывающий относительную влажность [9, 10]. Ускоряющий фактор для процессов старения, связанных с влажностью, описывается по формуле

$$AF_H = (RH)^3 e^{\frac{E_a}{k} \left( \frac{1}{T_{н.у.}} - \frac{1}{T_{эксп.}} \right)}, \quad (4)$$

где  $AF_H$  – ускоряющий фактор, связанный с влажностью;  $E_a$  – энергия активации;  $RH$  – относительная влажность;  $T_{эксп.}$  – абсолютная температура эксплуатации;  $k$  – постоянная Больцмана.

Заметим, что при уровне относительной влажности в 0 % значение ускоряющего фактора обращается в ноль, что согласуется с физической природой процессов. Для описания процессов старения, связанных с влажностью, принято соотношение  $\frac{E_a}{k}$  равным 5235 и перепишем уравнение (4) в более практичном виде

$$AF_H = (RH)^3 e^{5235 \left( \frac{1}{293} - \frac{1}{T_{эксп.}} \right)}, \quad (5)$$

где  $AF_H$  – ускоряющий фактор, связанный с влажностью;  $RH$  – относительная влажность;  $T_{эксп.}$  – абсолютная температура эксплуатации.

#### Анализ влияющих факторов – изменение температуры

В течение эксплуатации электронная техника испытывает изменения температуры, вызванные естественными суточными перепадами температуры воздуха, собственным нагревом или другими причинами. Резкие большие перепады температуры являются серьезной нагрузкой для электроники из-за применения материалов с различными температурными коэффициентами расширения.

Для подтверждения устойчивости изделия к перепадам температур проводят испытания на термоциклирование. Изделие помещают в специализированное оборудование – камеру термоциклирования либо в двухсекционную камеру, где подвергают перепадам температуры еще более жестким, чем те, с которыми устройство может столкнуться в процессе эксплуатации.

Испытания на термоциклирование являются одним из наиболее жестких, так как позволяют выявить скрытые дефекты конструкции и технологий, скрытые дефекты изделий электронной техники и т.д. Искусственно созданные жесткие перепады температуры позволяют проводить ускоренные испытания, однако результаты таких испытаний сложно интерпретировать.

Для соотнесения лабораторных условий с реальными используется модель Норриса – Ландзберга [11] для усталостного разрушения паяных соединений. Эту же модель в этой работе будем использовать для определения ускоряющего фактора, связанного с изменением температуры.

Ускоряющий фактор, связанный с циклическим изменением температуры, описывается по формуле

$$AF_{TC} = \left( \frac{f_{\text{эксп.}}}{f_{\text{н.у.}}} \right)^{\frac{1}{3}} \left( \frac{\Delta T_{\text{эксп.}}}{\Delta T_{\text{н.у.}}} \right)^{1,9} e^{\frac{E_a}{k} \left( \frac{1}{T_{\text{н.у.}}^{\text{MAX}}} - \frac{1}{T_{\text{эксп.}}^{\text{MAX}}} \right)}, \quad (6)$$

где  $AF_{TC}$  – ускоряющий фактор, связанный с термоциклированием;  $f_{\text{н.у.}}$  – частота изменения температуры в нормальных условиях;  $f_{\text{эксп.}}$  – частота изменения температуры в условиях эксплуатации;  $T_{\text{эксп.}}^{\text{MAX}}$  – максимальная абсолютная температура эксплуатации;  $T_{\text{н.у.}}^{\text{MAX}}$  – максимальная абсолютная температура в нормальных условиях;  $\Delta T_{\text{эксп.}}$  – перепад температуры в условиях эксплуатации;  $\Delta T_{\text{н.у.}}$  – перепад температуры в нормальных условиях;  $E_a$  – энергия активации;  $k$  – постоянная Больцмана.

Для процессов, связанных с термоциклированием, принято брать соотношение  $\frac{E_a}{k}$  равным 1414. Характеристики максимальной температуры и амплитуды перепада для нормальных условий будем основывать на среднесуточном перепаде температуры в городе Москва в июле месяце (самом жарком). Средний максимум составляет 24,3 °С, средний минимум – 14,4 °С [12]. Для удобства счета примем  $\Delta T_{\text{н.у.}} = 10$  °С;  $T_{\text{н.у.}}^{\text{MAX}} = 25$  °С. А частота изменения температуры в таком случае  $f_{\text{н.у.}} = 1/\text{день}$ . С учетом вышесказанного перепишем уравнение (6) в более удобном виде

$$AF_{TC} = f_{\text{эксп.}}^{\frac{1}{3}} \left( \frac{\Delta T_{\text{эксп.}}}{10} \right)^{1,9} e^{1414 \left( \frac{1}{298} - \frac{1}{T_{\text{эксп.}}^{\text{MAX}}} \right)}, \quad (7)$$

где  $AF_{TC}$  – ускоряющий фактор, связанный с термоциклированием;  $f_{\text{эксп.}}$  – частота изменения температуры в при эксплуатации, день<sup>-1</sup>;  $T_{\text{эксп.}}^{\text{MAX}}$  – максимальная абсолютная температура эксплуатации;  $\Delta T_{\text{эксп.}}$  – перепад температуры в условиях эксплуатации °С.

### Циклическая механическая нагрузка

Усталостные разрушения вызываются циклическими нагрузками, по своей силе заметно уступающими пределу прочности материала. Такими нагрузками являются вибрации, испытываемые электронным оборудованием в процессе эксплуатации. Некоторые материалы, такие как сталь, обладают пределом выносливости, т.е. могут выдерживать циклические нагрузки с напряжениями меньше предела выносливости неограниченное количество циклов. Медь к таким материалам не относится и неизбежно разрушится даже под действием очень маленькой нагрузки. Количество циклов до разрушения зависит от амплитуды напряжений, возникающих в материале, и от рода материала. Эту зависимость принято изображать на так называемой диаграмме Веллера. Для холоднокатаной медной фольги диаграмма Веллера изображена на рис. 4.

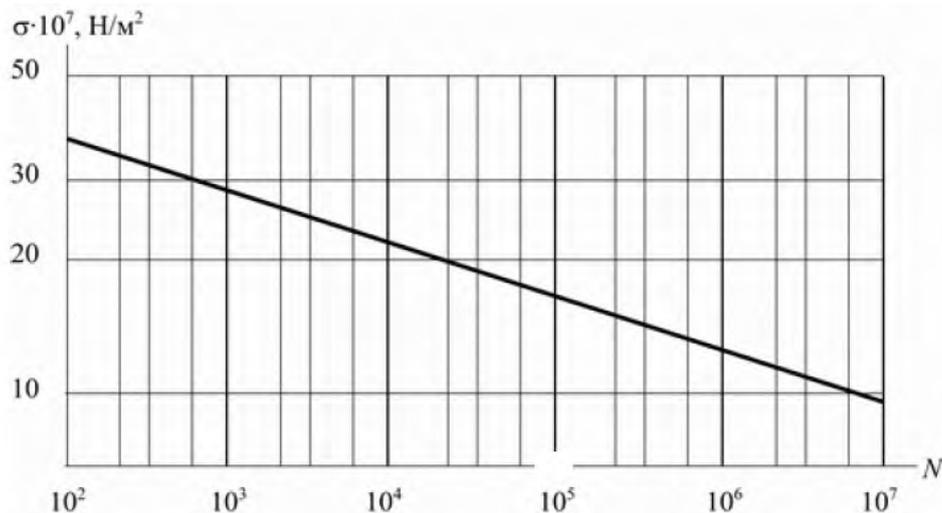


Рис. 4. Кривая усталости для холоднокатаной медной фольги

Ускоряющий фактор для циклической механической нагрузки должен быть также основан на количестве циклов и вызываемом напряжении.

Поскольку ускоряющий фактор описывает текущие условия эксплуатации и изменяется во времени, то он не может определяться через количество циклов нагружения. Вместо этого характеризующая величина, отражающая количество циклов нагружения – частота испытываемой нагрузки.

Общий подход к прогнозированию усталостных разрушений основывается на применении обратного степенного закона, общий вид которого описывается формулой

$$L(V) = \frac{1}{KV^n}, \quad (8)$$

где  $L(V)$  – количественная мера выносливости;  $V$  – количественная мера нагрузки;  $n, K$  – параметры модели.

В случае с усталостными механическими нагрузками количественной мерой выносливости является количество циклов до разрушения  $N$ , а количественной мерой нагрузки – возникающие напряжения  $\sigma$ .

Диаграммы Веллера получают эмпирическим путем и хорошо изучены только для самых востребованных конструкционных материалов, таких как стали и сплавы на основе алюминия. Одной из проблем в описании механических усталостных разрушений в радиоэлектронике является плохая изученность свойств материалов.

Дополнительным препятствием является то, что паяные соединения могут сильно отличаться от изделия к изделию. Этому способствуют несколько причин: использование различных по химическому составу припоев или паяльных паст, разные объемы использования припоя в силу использования контактных площадок разных размеров и разной толщины трафарета для паяльных паст. Все это делает затруднительным нахождение четкой аналитической зависимости.

Свяжем количество циклов до разрушения  $N$  и возникающие напряжения  $\sigma$  с измеряемыми величинами и выразим ускоряющий фактор для циклической механической нагрузки.

Согласно закону Гука, возникающая сила упругости, а значит, и механические повреждения пропорциональны деформации, т.е. перемещению  $\Delta x$ . А быстрота прироста количества совершенных циклов нагружения пропорциональна частоте  $f$ . Учитывая вышесказанное, а также зависимость (8), ускоряющий фактор должен иметь вид

$$AF_v = K \left( \frac{a}{(2\pi f)^2} \right)^n f, \quad (9)$$

где  $AF_v$  – ускоряющий фактор для циклической механической нагрузки (вибрации);  $a$  – амплитуда ускорения, испытываемого электронным компонентом, платой и т.п.;  $f$  – частота вибрации (циклической механической нагрузки);  $n, K$  – параметры модели.

### Заключение

В ходе данной работы были рассмотрены современные подходы, применяемые для контроля работоспособности устройства по косвенным параметрам электронных устройств. Отмечены недостатки используемых подходов.

Проведенный анализ статистического распределения отказов по компонентам и причин отказов электронных устройств и электронных компонентов позволил продемонстрировать значимость внешних воздействующих факторов в процессах отказов. Был проведен анализ воздействий факторов на продолжительность службы устройства, на основе которого была разработана методика оценки контроля работоспособности устройства по косвенным параметрам электронного блока на основе математической модели, учитывающей условия эксплуатации.

На основе предложенной методики целесообразно создать систему регистрации внешних воздействий, позволяющую в режиме реального времени отслеживать условия эксплуатации и с их учетом прогнозировать остаточный ресурс электронного блока.

Предложенная методика имеет практическую значимость в таких применениях электроники, отказ которых может приводить к причинению вреда здоровью человека, а также издержкам, многократно превышающим затраты на своевременное техническое обслуживание или замену.

### Список литературы

1. FMEA // Википедия. 2018.
2. Failure modes, effects, and diagnostic analysis // Wikipedia. 2019.
3. Matt Sunna. Protector, monitor or gauge – selecting the correct battery electronics for your Li-ion-powered system – Power management – Technical articles – TI E2E support forums. 2019.
4. Pinheiro E., Weber W.-D., Barroso L.A. Failure Trends in a Large Disk Drive Population // 5th USENIX Conference on File and Storage Technologies (FAST 2007). 2007. P. 17–29.
5. Willems G., Vandeveld B. Physics-of-failure based reliability-by-design. IMEC-CEDM, 2015.
6. Yang S. [et al.]. Condition Monitoring for Device Reliability in Power Electronic Converters: A Review // IEEE Trans. Power Electron. 2010. Vol. 25, № 11. P. 2734–2752.
7. Sood B. Root-Cause Failure Analysis of Electronics. SMTA Philadelphia, 2013.
8. Failure of electronic components // Википедия. 2020.
9. Wang H. [et al.]. Transitioning to Physics-of-Failure as a Reliability Driver in Power Electronics // Emerg. Sel. Top. Power Electron. IEEE J. Of. 2014. Vol. 2. P. 97–114.
10. Wu Lifeng et al. Research on failure analysis method of the key components in SMPS // 2011 Prognostics and System Health Management Conference. 2011. P. 1–6.
11. Thaduri A. [et al.]. Reliability prediction of semiconductor devices using modified physics of failure approach // Int. J. Syst. Assur. Eng. Manag. 2013. Vol. 4, № 1. P. 33–47.
12. Gu J. [et al.]. Prognostics Implementation Methods for Electronics. 2007. P. 101–106.
13. Sinapis K., Folkerts W. MLPM Benchmark Report. SEAC, 2013. P. 66.
14. Salewski F., Taylor A. Fault Handling in FPGAs and Microcontrollers in Safety-Critical Embedded Applications: A Comparative Survey // 10th Euromicro Conference on Digital System Design Architectures, Methods and Tools (DSD 2007). 2007. P. 124–131.

### References

1. FMEA. *Wikipedia*. 2018.
2. Failure modes, effects, and diagnostic analysis. *Wikipedia*. 2019.
3. Matt Sunna. *Protector, monitor or gauge – selecting the correct battery electronics for your Li-ion-powered system – Power management – Technical articles – TI E2E support forums*. 2019.
4. Pinheiro E., Weber W.-D., Barroso L.A. Failure Trends in a Large Disk Drive Population. *5th USENIX Conference on File and Storage Technologies (FAST 2007)*. 2007:17–29.
5. Willems G., Vandeveld B. *Physics-of-failure based reliability-by-design*. IMEC-CEDM, 2015.
6. Yang S. [et al.]. Condition Monitoring for Device Reliability in Power Electronic Converters: A Review. *IEEE Trans. Power Electron.* 2010;25(11):2734–2752.
7. Sood B. *Root-Cause Failure Analysis of Electronics*. SMTA Philadelphia, 2013.
8. Failure of electronic components. *Wikipedia*. 2020.
9. Wang H. [et al.]. Transitioning to Physics-of-Failure as a Reliability Driver in Power Electronics. *Emerg. Sel. Top. Power Electron. IEEE J. Of.* 2014;2:97–114.
10. Wu Lifeng et al. Research on failure analysis method of the key components in SMPS. *2011 Prognostics and System Health Management Conference*. 2011:1–6.

11. Thaduri A. [et al.]. Reliability prediction of semiconductor devices using modified physics of failure approach. *Int. J. Syst. Assur. Eng. Manag.* 2013;4(1):33–47.
12. Gu J. [et al.]. *Prognostics Implementation Methods for Electronics*. 2007:101–106.
13. Sinapis K., Folkerts W. *MLPM Benchmark Report*. SEAC, 2013:66.
14. Salewski F., Taylor A. Fault Handling in FPGAs and Microcontrollers in Safety-Critical Embedded Applications: A Comparative Survey. *10th Euromicro Conference on Digital System Design Architectures, Methods and Tools (DSD 2007)*. 2007:124–131.

### Информация об авторах / Information about the authors

#### Максим Леонидович Савин

и. о. директора,  
Мытищинский научно-исследовательский институт  
радиоизмерительных приборов  
(Россия, Московская обл., г. Мытищи,  
ул. Колпакова, 2А)  
E-mail: savin@mniirip.ru

#### Вячеслав Дмитриевич Зуев

кандидат технических наук,  
генеральный директор,  
Научно-исследовательский институт  
электронно-механических приборов  
(Россия, г. Пенза, ул. Каракозова, 44)  
E-mail: vdzuev@yandex.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@mail.ru

#### Елена Михайловна Соловьева

магистрант,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: kipra@pnzgu.ru

#### Алексей Владимирович Лысенко

кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры конструирования  
и производства радиоаппаратуры,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: lysenko\_av@bk.ru

#### Maksim L. Savin

Acting director,  
Mytishchi Research Institute of Radio Measuring  
Instruments  
(2A Kolpakova street, Mytishchi,  
Moscow region, Russia)

#### Vyacheslav D. Zuev

Candidate of technical sciences, general director,  
Scientific and Research Institute  
of Electronic and Mechanic Instruments  
(44 Karakozova street, Penza, Russia)

#### Igor I. Kochegarov

Candidate of technical sciences, associate professor,  
associate professor of the sub-department  
of radio equipment design and production,  
Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

#### Elena M. Solovieva

Master degree student,  
Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

#### Alexey V. Lysenko

Candidate of technical sciences, associate professor,  
associate professor of the sub-department  
of radio equipment design and production,  
Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /  
The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 27.09. 2021

Поступила после рецензирования / Revised 10.10.2021

Принята к публикации / Accepted 10.11.2021

# ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ

## TECHNOLOGICAL BASIS FOR IMPROVING RELIABILITY AND PRODUCT QUALITY

УДК 621.317.727.1

doi:10.21685/2307-4205-2022-1-12

### ДЕЛИТЕЛЬ НАПРЯЖЕНИЙ ВЫСОКОВОЛЬТНЫЙ ДНВ-140И ДЛЯ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

А. С. Ильин<sup>1</sup>, И. А. Карчев<sup>2</sup>, А. П. Воронов<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

<sup>1,2,3</sup> Научно-исследовательский институт электронно-механических приборов, Пенза, Россия

<sup>1</sup> aalexii@mail.ru, <sup>2,3</sup> npk4p@niiemp.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Актуальность применения делителей напряжений высоковольтных в информационно-измерительных системах для контроля и измерения импульсных напряжений определяется применением различного электрооборудования и способных выдерживать воздействия и обеспечивать преобразование напряжений различных форм. Контроль одиночных грозовых и коммутационных импульсов вызывает необходимость применения широкополосных делителей напряжений. Целью работы является ознакомление с современным отечественным делителем напряжений ДНВ-140И и результатами его исследования. *Материалы и методы.* Использовался метод масштабного преобразования. *Результаты.* Приведены описание и результаты исследования делителя напряжения высоковольтного ДНВ-140И. *Вывод.* Делитель напряжений высоковольтный ДНВ-140И может использоваться для контроля и измерений цепей постоянного и переменного тока, а также импульсного напряжения.

**Ключевые слова:** электроустановки, грозовой импульс, коммутационный импульс, высокое напряжение, делитель напряжения, исследование

**Для цитирования:** Ильин А. С., Карчев И. А., Воронов А. П. Делитель напряжений высоковольтный ДНВ-140И для информационно-измерительных систем // Надежность и качество сложных систем. 2022. № 1. С. 108–114. doi:10.21685/2307-4205-2022-1-12

### HIGH VOLTAGE DIVIDER DNV-140I FOR INFORMATION-MEASURING SYSTEMS

A.S. Ilin<sup>1</sup>, I.A. Karchev<sup>2</sup>, A.P. Voronov<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Penza State University, Penza, Russia

<sup>1,2,3</sup> Scientific and Research Institute of Electronic and Mechanic Instruments, Penza, Russia

<sup>1</sup> aalexii@mail.ru, <sup>2,3</sup> npk4p@niiemp.ru

**Abstract.** *Background.* The relevance of the use of high-voltage voltage dividers in information-measuring systems for monitoring and measuring impulse voltages is determined by the use of various electrical equipment and capable of withstanding exposure and providing the conversion of voltages of various forms. The control of single

lightning switching impulses necessitates the use of broadband voltage dividers. The purpose of the work is to familiarize with the modern domestic voltage divider DNV-140I and the results of its research. *Materials and methods.* Scaled transformation method was used. *Results.* The description and results of the study of the high-voltage voltage divider DNV-140I are given. *Conclusion.* High-voltage voltage divider DNV-140I can be used to control and measure DC and AC circuits, as well as impulse voltage.

**Keywords:** electrical installations, lightning switching, switching impulse, high voltage, voltage divider, research

**For citation:** Ilin A.S., Karchev I.A., Voronov A.P. High voltage divider DNV-140I for information-measuring systems. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2022;(1):108–114. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2022-1-12

В настоящее время для обеспечения надежной работы электростанций большое внимание уделяется информационно-измерительным системам (ИИС) контроля электроэнергии [1]. Из-за негативного воздействия и большой опасности грозových явлений и коммутаций аппаратов возникает необходимость контроля и измерения одиночных грозových и коммутационных импульсов, действующих на силовые трансформаторы, компенсаторы реактивной мощности и другое оборудование электроустановок [2]. Для этого применим способ измерения импульсов с помощью емкостно-омического делителя напряжения, способного выдерживать большую амплитуду напряжения и работать в широкой полосе частот [3].

Китайский рынок предлагает большой выбор высоковольтных импульсных преобразователей напряжений, способных выдерживать грозových и коммутационные перенапряжения. США, Германия и другие страны с развитой электроэнергетикой также занимаются работой в этой сфере и предлагают соответствующие делители высоких напряжений.

Существует отечественный делитель напряжений высоковольтный импульсный ДНВ-140И, предназначенный для преобразования высоких напряжений до уровня, безопасного для последующей передачи, обработки и хранения измерительного сигнала. Может использоваться для контроля режимов работы цепей постоянного (до 140 кВ), переменного (до 140 кВ) и импульсного (до 200 кВ) токов электротехнических и радиотехнических ИИС [4].

Принцип работы делителя основан на свойствах пассивных линейных электрических цепей, изменять амплитуду напряжения в любой точке электрической цепи пропорционально амплитуде входного сигнала [5]. ДНВ способен масштабировать напряжения в широкой полосе частот.

Особенностью данного типа делителя напряжений является возможность во всем диапазоне преобразовывать грозových и коммутационные импульсы напряжения.

Схема замещения емкостно-омического делителя напряжения представлена на рис. 1.

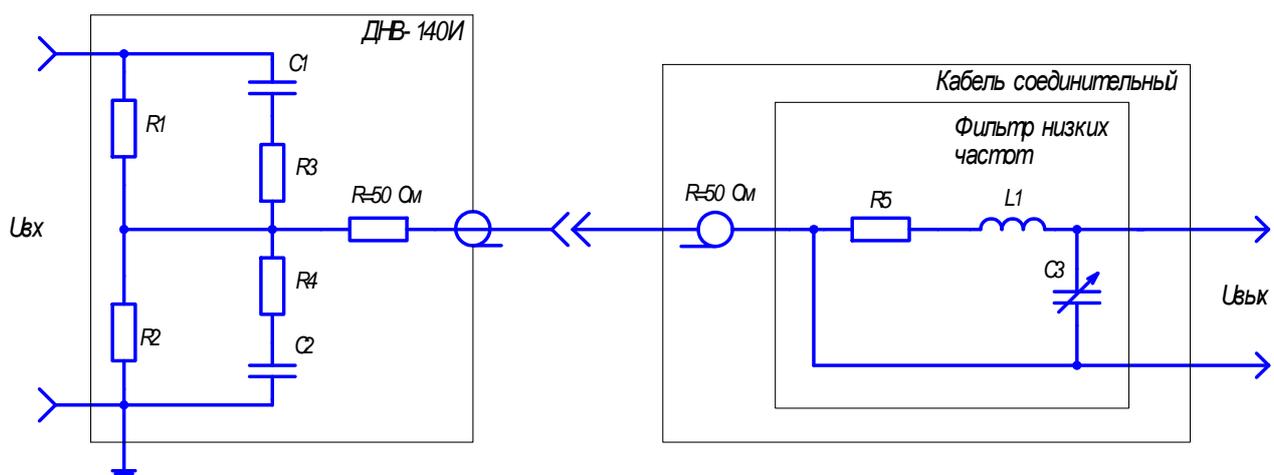


Рис. 1. Схема замещения делителя напряжения ДНВ-140И:

$U_{вх}$  – входное напряжение ДНВ;  $U_{вых}$  – выходное напряжение из кабеля;

$R_1$  – сопротивление верхнего плеча;  $C_1$  – емкость верхнего плеча;

$R_2$  – сопротивление нижнего плеча;  $C_2$  – емкость нижнего плеча;

$R_3$  – демпферное сопротивление верхнего плеча;

$R_4$  – демпферное сопротивление нижнего плеча;  $R_5, L_1, C_3$  – элементы фильтра

Для подключения делителя к средствам контроля и измерения в ИИС применяется кабель соединительный, состоящий из высокочастотного кабеля типа RG-214/U и фильтра низких частот [7].

На рис. 2 представлен внешний вид делителя напряжений высоковольтного ДНВ-140И.



Рис. 2. Внешний вид делителя напряжения высоковольтного ДНВ-140И

Делитель обеспечивает защиту от поражения электрическим током по классу I по ГОСТ 12.2.007.0-75<sup>1</sup>. Степень защиты оболочки делителя по ГОСТ 14254-96 IP40DN. Категория монтажа I, степень загрязнения 1<sup>2</sup>.

В табл. 1 приведены основные технические характеристики.

Таблица 1

Технические характеристики

Диапазон входных напряжений постоянного тока, кВ	14–140
Диапазон входных напряжений переменного тока частотой 50 Гц, кВ	10–100
Основная относительная погрешность преобразования $U_{DC}$ , %	±1
Основная относительная погрешность преобразования $U_{AC}$ частотой 50 Гц, %	±1
Время нарастания переходной характеристики, нс, не более	50
Амплитуда импульса, кВ	230
Диапазон рабочих частот, Гц	50–8·10 <sup>6</sup>
Длина кабеля, м, не более	10
Габаритные размеры (H/D/L), мм, не более	1097/360/396
Вес, кг, не более	23

Испытательным центром ФГУП «ВНИИМС» были проведены исследования основных метрологических характеристик делителя напряжений высоковольтного ДНВ-140И.

<sup>1</sup> ГОСТ 12.2.007.0-75 Система стандартов безопасности труда. Изделия электротехнические. Общие требования безопасности.

<sup>2</sup> ГОСТ 14254-96 IP40DN Степени защиты, обеспечиваемые оболочками.

Для проверки характеристик на напряжении постоянного тока и напряжении переменного тока промышленной частоты 50 Гц использовались (ГЭТ 181 – 2010) государственный первичный специальный эталон единицы электрического напряжения постоянного тока в диапазоне  $\pm (1 \dots 500)$  кВ и (ГЭТ 191 – 2019) государственный первичный специальный эталон единицы электрического напряжения переменного тока промышленной частоты и комбинированного напряжения в диапазоне от 1 до 500 кВ с гармоническими составляющими от 0,3 до 50 порядка, в диапазоне частот от 15 до 2500 Гц.

Для проверки характеристик на импульсном напряжении использовался (ГЭТ 204 – 2012) государственный первичный специальный эталон единицы электрического напряжения стандартизованных грозовых и коммутационных импульсов в диапазоне от 1 до 1000 кВ [8].

В качестве примера работы ДНВ-140И с импульсами рассмотрим проверку на ГЭТ 204 – 2012 на коммутационном импульсе. На рис. 3 представлено фото в высоковольтной лаборатории импульсного напряжения ФГУП «ВНИИМС».

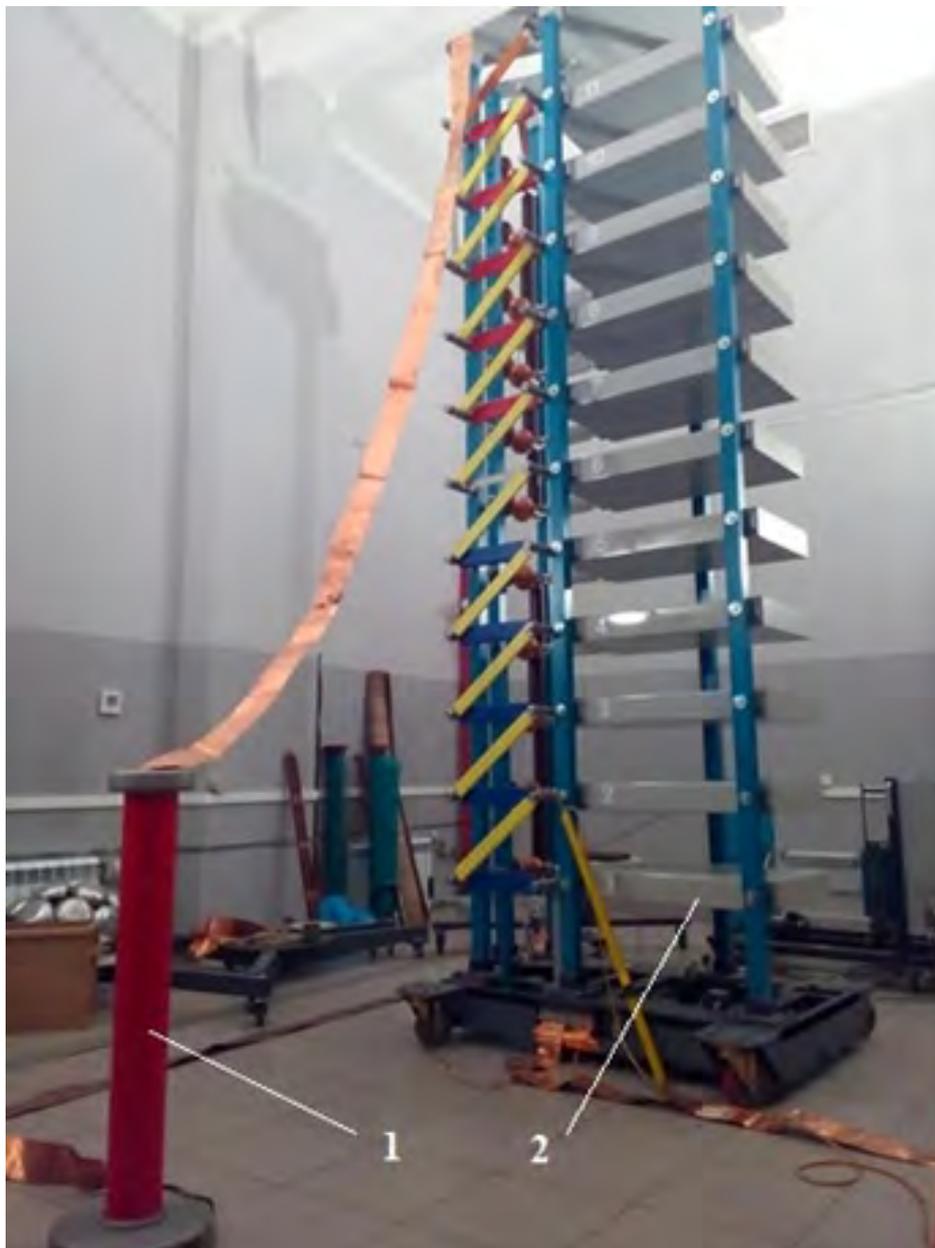


Рис. 3. Исследование метрологических характеристик ДНВ-140И на импульсном напряжении в высоковольтной лаборатории ФГУП «ВНИИМС»: 1 – делитель напряжений высоковольтный ДНВ-140И; 2 – государственный первичный специальный эталон единицы электрического напряжения стандартизованных грозовых и коммутационных импульсов в диапазоне от 1 до 1000 кВ (ГЭТ 204 – 2012)

На рис. 4 представлена осциллограмма результатов измерений амплитуды, временных параметров  $T_1$  и  $T_2$  на коммутационном импульсе напряжения положительной полярности до 200 кВ с выхода исследуемого делителя напряжений ДНВ-140И и образцового импульса [6].

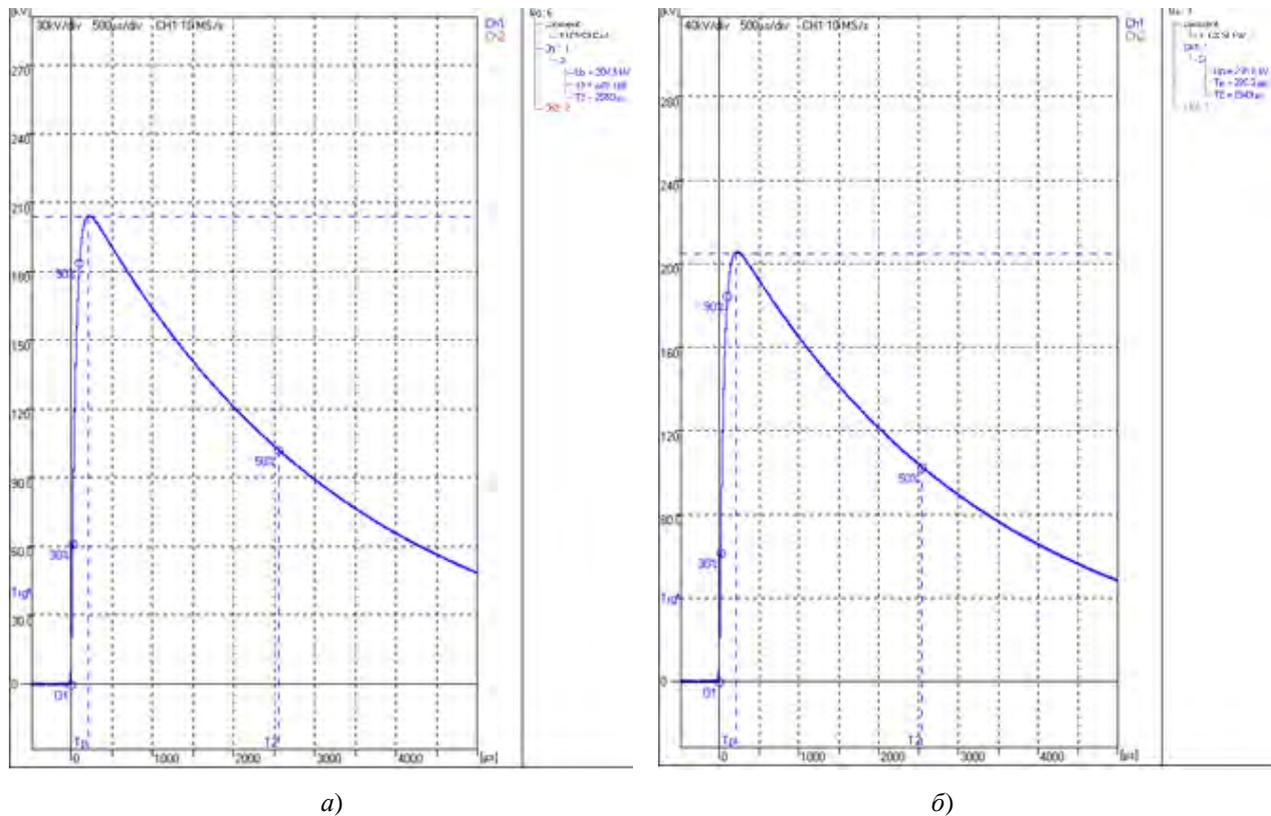


Рис. 4. Результаты измерений амплитуды и временных параметров напряжения коммутационного импульса положительной полярности амплитудой 205 кВ с применением:  
 а – ДНВ-140И; б – ЭИС в составе ГЭТ 204 – 2012

Осциллограммы рис. 4 показывают наглядное сравнение образцового коммутационного импульса и импульса с выхода ДНВ-140И. Анализируя графики, точно определяются параметры измеренных импульсов. На рис.4,а коммутационный импульс положительной полярности амплитудой 205 кВ имеет время нарастания  $T_1 = 220,1$  мкс и длительность  $T_2 = 2559$  мкс. Временные характеристики образцового коммутационного импульса той же величины, представленного на рис. 4.б,  $T_1 = 220,3$  мкс и  $T_2 = 2549$  мкс.

Проведя измерения при различной амплитуде напряжения, следует отметить точную повторяемость сигнала во всем диапазоне напряжений до 200 кВ. Фронт и форму импульса от высоковольтного генератора делитель ДНВ-140И передает без искажений.

Проверка погрешности преобразования напряжения постоянного тока и напряжения переменного тока частотой 50 Гц с применением ГЭТ 181 – 2010 и ГЭТ 191 – 2019 соответственно показала, что результаты измерений соответствуют диапазону преобразования напряжений, а пределы относительной погрешности измерения напряжений не превышают заявленных  $\pm 1$  %.

### Заключение

Результатом проведенных испытательным центром ФГУП «ВНИИМС» исследований метрологических характеристик делителя напряжений высоковольтного ДНВ-140И являются заключения и рекомендации:

- может использоваться для измерений грозового и коммутационного импульса напряжения;
- можно рекомендовать для измерения напряжений постоянного (до 140 кВ), переменного (до 100 кВ) токов.

## Список литературы

1. Коломиец Н. В., Пономарчук Н. Р., Шестакова В. В. Электрическая часть электростанций и подстанций : учеб. пособие. Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2007.
2. Герасименко А. А. Федин И. Т. Передача и распределение электрической энергии : учеб. пособие. М. : Кнорус, 2014. 648 с.
3. Бочаров Ю. Н., Дудкин С. М., Титков В. В. Техника высоких напряжений : учеб. пособие. М. : Юрайт, 2018.
4. АО «НИИЭМП». URL: [https:// www.niiemp.ru](https://www.niiemp.ru)
5. Бейер М., Бек В., Меллер К., Цаенгль В. Техника высоких напряжений: теоретические и практические основы применения : пер с нем. / под ред. В. П. Ларионова. М. : Энергоатомиздат, 1989.
6. Шваб А. Измерения на высоком напряжении. М. : Энергоатомиздат, 1983.
7. Делители напряжений высоковольтные. Технические условия. РУКЮ.411522.020 ТУ.
8. ФГУП «ВНИИМС». URL: <https://www.vniims.ru/about/etalonnaya-baza>

## References

1. Kolomiets N.V., Ponomarchuk N.R., Shestakova V.V. *Elektricheskaya chast' elektrostantsiy i podstantsiy: ucheb. posobie = The electrical part of power plants and substations : textbook*. Tomsk: Izd-vo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta, 2007. (In Russ.)
2. Gerasimenko A.A., Fedin I.T. *Peredacha i raspredelenie elektricheskoy energii: ucheb. posobie = Transmission and distribution of electric energy : textbook*. Moscow: Knorus, 2014:648. (In Russ.)
3. Bocharov Yu.N., Dudkin S.M., Titkov V.V. *Tekhnika vysokikh napryazheniy: ucheb. posobie = High voltage technique : textbook*. Moscow: Yurayt, 2018. (In Russ.)
4. АО «НИИЭМП». Available at: [https:// www.niiemp.ru](https://www.niiemp.ru)
5. Beyer M., Bek V., Meller K., Tsaengl' V. *Tekhnika vysokikh napryazheniy: teoreticheskie i prakticheskie osnovy primeneniya: per s nem. = High voltage technique: theoretical and practical bases of application: translated from German*. Moscow: Energoatomizdat, 1989. (In Russ.)
6. Shvab A. *Izmereniya na vysokom napryazhenii = Measurements at high voltage*. Moscow: Energoatomizdat, 1983. (In Russ.)
7. *Deliteli napryazheniy vysokovol'tnye. Tekhnicheskie usloviya. RUKYu.411522.020 TU = High voltage voltage dividers. Technical conditions. ARM.411522.020 TU*. (In Russ.)
8. *FGUP «VNIIMS»*. Available at: <https://www.vniims.ru/about/etalonnaya-baza>

## Информация об авторах / Information about the authors

**Алексей Сергеевич Ильин**

аспирант,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40);  
инженер-электроник,  
Научно-исследовательский институт  
электронно-механических приборов  
(Россия, г. Пенза, ул. Каракозова, 44)  
E-mail: aalexeyil@mail.ru

**Иван Анатольевич Карчев**

начальник отдела измерительных приборов,  
Научно-исследовательский институт  
электронно-механических приборов  
(Россия, г. Пенза, ул. Каракозова, 44)  
E-mail: npk4p@niiemp.ru

**Александр Павлович Воронов**

ведущий инженер,  
Научно-исследовательский институт  
электронно-механических приборов  
(Россия, г. Пенза, ул. Каракозова, 44)  
E-mail: npk4p@niiemp.ru

**Aleksey S. Ilin**

Postgraduate student,  
Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia);  
electronics engineer,  
Scientific and Research Institute  
of Electronic and Mechanic Instruments  
(44 Karakozova street, Penza, Russia)

**Ivan A. Karchev**

Head of the measuring instruments department,  
Scientific and Research Institute  
of Electronic and Mechanic Instruments  
(44 Karakozova street, Penza, Russia)

**Alexander P. Voronov**

Lead engineer,  
Scientific and Research Institute  
of Electronic and Mechanic Instruments  
(44 Karakozova street, Penza, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /  
The authors declare no conflicts of interests.**

**Поступила в редакцию/Received 02.09.2021**

**Поступила после рецензирования/Revised 15.10.2021**

**Принята к публикации/Accepted 09.11.2021**

# БЕЗОПАСНОСТЬ В ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ

## SAFETY IN EMERGENCY SITUATIONS

УДК 004.9, 006.015.8

doi:10.21685/2307-4205-2022-1-13

### A UNIFIED SYSTEM FOR ENSURING THE REGIONAL SECURITY

**A.V. Masloboev**

Federal Research Centre "Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences", Apatity, Russia  
masloboev@iimm.ru

**Abstract.** *Background.* The paper deals with general issues of regional security ensuring via development and implementation of the integrated automated systems for situational control of regional critical infrastructures resilience. *Materials and methods.* Approaches to development of the regional security management systems based on the principles of risk theory, digital transformation of public administration on the basis of situational centers and experience gained in the field of energy security are analyzed. *Results and conclusions.* The problems of security support system engineering of the region are identified and estimated. The role of situational centers in solving of these problems at the regional level is proved and justified. A conceptual model of the system for ensuring the regional security has been designed. A formalization of the security and risk concepts within the framework of this model has been proposed. The structure and composition of the decision support system for managing the regional security based on the use of situation simulation modeling aids has been developed and studied. It has been assigned that the functioning efficiency of the regional security support systems is appreciably limited by the constant growth in the volumes of diverse information that requires operational processing and analysis for making managerial decisions, as well as the imperfection of the legal regulatory framework.

**Keywords:** situational control, decision support system, regional security ensuring, risk-analysis, simulation, situational center

**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. FMEZ-2022-0023).

**For citation:** Masloboev A.V. A unified system for ensuring the regional security. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2022;(1):115–125. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2022-1-13

### КОМПЛЕКСНАЯ СИСТЕМА ОБЕСПЕЧЕНИЯ РЕГИОНАЛЬНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

**А. В. Маслобоев**

Кольский научный центр Российской академии наук, Апатиты, Россия  
masloboev@iimm.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Рассматриваются общие вопросы обеспечения региональной безопасности посредством создания и внедрения комплексных автоматизированных систем ситуационного управления жизнеспособностью критических инфраструктур региона. *Материалы и методы.* Анализируются подходы к созданию систем управления региональной безопасностью, основанные на принципах теории риска, цифровой трансформации государственного управления на базе ситуационных центров, и опыте, накопленном в области обеспечения энергетической безопасности. *Результаты и выводы.* Определены проблемы построения систем обеспечения безопасности региона и обоснована роль ситуационных центров в решении этих проблем на региональном уровне. Разработана концептуальная модель системы обеспечения региональ-

ной безопасности, в рамках которой предложена формализация понятия безопасности и риска. Разработаны и исследованы структура и состав системы поддержки принятия решений по управлению региональной безопасностью, использующей в своей основе средства имитационного моделирования ситуаций. Установлено, что эффективность функционирования систем обеспечения региональной безопасности существенно ограничивается постоянным ростом объемов разноплановой информации, требующей оперативной обработки и анализа для принятия управленческих решений, а также несовершенством нормативно-правовой базы.

**Ключевые слова:** ситуационное управление, система поддержки принятия решений, обеспечение региональной безопасности, риск-анализ, моделирование, ситуационный центр

**Финансирование.** Работа выполнена в рамках государственного задания ИИММ КНЦ РАН (НИР № FMEZ-2022-0023).

**Для цитирования:** Маслобоев А. В. Комплексная система обеспечения региональной безопасности // Надежность и качество сложных систем. 2022. № 1. С. 115–125. doi:10.21685/2307-4205-2022-1-13

## Introduction

At present, the intense human activity in the way of developing of the natural resources in the Arctic and implementation of novel exploration technologies according to state-of-the-art studies [1-5] inevitably leads to the density enhancement of the potentially dangerous objects in the biosphere. At the same time, the initiation likelihood of the various types of emergency situations and man-caused accidents is increasing, as well as the consequences of natural disasters and crises in the socio-economic sphere are aggravated. These negative phenomena and trends possess a global nature and are especially acute at the regional level destabilizing the socio-economic system of the region and hindering its risk-sustainable progressive development.

Along with strategic approaches to weakening these specified trends, it is quite necessary to operative respond to initiating emergency and crises situations. Thereto, today at the state level the appropriate international and national organizational structures for security management have been set up and continue to be established. Its responsibilities enclose on-line monitoring, prevention, warning and consequence elimination of the potential threats and risk implementation in regional critical infrastructures. Timely identification of the destabilizing impact sources allows minimizing the risks of critical situations manifestation of socio-economic, natural and man-caused nature that affect the safe operation of regional systems. In the normal mode of day-to-day activities, the profile-relevant departments ensuring the security of regional critical infrastructures conduct regular exercises at critically important assets and objects of the region, design projects and plans for anti-crisis measures, allocate resources and protection means to counteracting specific threats of regional security.

Nowadays, the considerable experience and knowledge have been accumulated in this area, but in theory and practice this experience is quite disconnected, i.e. fragmented by various fields and departments, despite the sufficient similarity of the existing management forms and well-known security ensuring methods. In the latest years, there has been observed an extension of the activity scope of security management organizational entities, as well as departmental barriers overcoming under joint interaction in regional security ensuring problem-solving due to the uniform standards and technical regulations application in the field of comprehensive security. These tendencies are typical not only for Russian Federation, but for all other world powers also. For example, the establishment of the Emergency Situations Ministry (EMERCOM) in our country in 1990 provided an opportunity to concentrate and coordinate efforts to ensure security in conditions of emerging contingency situations in a variety of regional critical infrastructures and for all critically important assets and elements forming its composition. A considerable contribution in security support and risk management problem-solving of socio-economic and technical systems was introduced by the Applied Problems Section of the Russian Academy of Sciences in cooperation both with domestic and foreign research institutions, and national security services and agencies.

Thus, it is possibly declared the relevance for design and engineering of the security support systems of various classes [3, 6] – global, international, national, regional, local and its systemic integration at all public administration management levels. The necessity for the development and implementation of such automated situational management systems is due to the needs for big data processing and analysis, containing diverse information on the state of critically important assets and elements of regional socio-economic systems and influencing factors on the one hand, and the requirements for prompt and adequate response to this information in the process of managerial decision-making, on the other. In this case information and control systems and networks already existing in the regions can be used, primarily integrated automated systems for situation awareness and monitoring of regional security in situational centers.

This survey-study is devoted to general issues of unified system engineering for ensuring the regional security. For definiteness the regional level is discussed. Moreover, all the statements and contributions set forth below can be attributed to other levels of management and government. This work is an extended version of the research represented earlier in conference proceedings of the 26<sup>th</sup> International Symposium “Reliability and Quality” held in Penza State University at the end of May 2021.

### Background

Nuclear power engineering is one of the strategic areas of national economy, which has accumulated in long-term historical period mostly significant theoretical and practical experience in the field of security ensuring and risk management of complex systems. Therefore, it is rationally and objectively to study all essential aspects of regional security problem domain and possible ways of it ensuring on the basis goal-setting in this strategic area. Point is that for nuclear power area all kinds of “threat – counteraction” models and mechanisms are well-developed and analyzed. These risk management solutions are applicable to a wide range of other potentially dangerous elements and critical infrastructures of socio-economic systems also and consequently can be disseminated to various spheres of human life safety and regional development. The research works [7-11] formally define and analyze rather general and sufficient criteria of reliability, sustainability, safety, risk and damage concepts in this way.

Currently, the integrated automated systems for environment monitoring nearby and around nuclear power facilities are being intensively developed. Examples of such successfully proven systems are the system for monitoring the radiation situation in the location area of ground-based nuclear power plants ARSMS [12], the subsystem for geo-monitoring of underground nuclear facilities [13], foreign systems SPEED I (Japan), APAS (USA), RIMNET (Great Britain), TELERAD (Belgium), EMMA (Sweden), RECASS NT (Republic of Belarus), Gamma-1 (Ukraine) and others. Nuclear power plant monitoring system is represented as a multi-level automated management system, where nuclear power facilities and assets are considered as a single technological control objects, and constitutes of security control systems and functionally related set of equipment which provides maintaining process parameters within the specified limits, protecting facilities from overload and other safeguarding operation functions. Such management systems consist of the following main components: information and analytical subsystem, decision-making support subsystem, regulatory control subsystem, technological protection subsystem, etc.

The studies [14, 15] propose a terminological and categorical apparatus and conceptual foundations of the regional security management system "nuclear power facilities – environment". Moreover, a system of standards and rules that regulates various aspects of nuclear power facilities safety in the region, e.g. [16–18], has been developed and approved. This system of norms is closely interrelated with socio-economic, industrial and ecological factors of regional development and territorial specificities. As is obvious from the above-stated a great deal of these research efforts have built the basis and certain prerequisites for organizing efficient information-management systems for control and ensuring safety of critical infrastructure components and the regional security as a whole, as well as provided the possibility to use monitoring systems of external environment of nuclear power plants and facilities as a prototype. In turn, the implementation of such an approach allowed obtaining new results in the field of synthesis and analysis of network-centric systems for situational management of security and resilience of the regional critical infrastructures and critically important facilities in the Arctic zone of Russia [3, 19].

Another relevant approach to developing an integrated system for ensuring the regional security is based on methods and technologies of public administration digital transformation [20, 21] by means of implementation and deployment of the network-centric system of distributed situational centers and regional management centers. Situational centers are a state-of-the-art and high-end instrument of information-analytical support and a new form of management based on the National economy total digitization intended for ensuring a high level of comprehensive security at the regional, federal and international levels. Currently, situational centers are designed and deployed in order to prevention of critical situations in socio-economic, public and military-political spheres of country’s development, as well as for the purpose to resilience and security control problem-solving of the critical facilities and critical infrastructures in the regions. Such an approach can be also adapted for the development of security support systems used in the field of nuclear power engineering. Nevertheless, this relatively novel approach to digital situational management is not normatively enshrined anywhere or is partially reflected in the existing legal acts and standards that regulate operating modes and application of situational centers. The leading role of situational centers in generalization of all diverse information on the security state and situation in the regions should be

enshrined at the legislative level. Moreover, the research level of situational center design and implementation is developing very slowly too.

The issues of modeling critical situations in the face of the new threats and hazards emergence using the situational center tools and functionality are extremely relevant. Nowadays, it is needed to concentrate our forces, facilities and expert knowledge on the management analytical support based on computer modeling. Monitoring and accumulation of the large volumes of information for making managerial decisions is ineffective today. No tangible effect of it is observed. For predicting the state of regional economy, generating solution variations of problem situations in the regions, scenario analysis and forecasting the development of national strength, assessing the level of national security, the instrumental modeling tools, domain-specific models, software and hardware systems based on these models are needed. These instruments must be embedded and implemented in the operating framework of situational centers.

Computer modeling is one of the effective methods for risk and security analysis of complex dynamic systems of various nature and scale. This technique allows running series of computational experiments with virtual prototypes (models – digital twins) of real world objects without violating the integrity and resilience of these objects or systems, as well as without negative consequences and harm-causing for human health or the environment. In addition, computer models provide the variability of making the simulation experiments in cases, when the real experiments with complex objects are hampered by financial or other resource constraints, or are physically impracticable. Therefore, almost all the state-of-the-art support systems for ensuring the regional security are using polymodel suites and situational management tools based on simulation models. The conception of computer modeling application for the critical situation analysis and decision-making support in the field of security ensuring of the regional socio-economic systems is schematically illustrated on Figure 1.

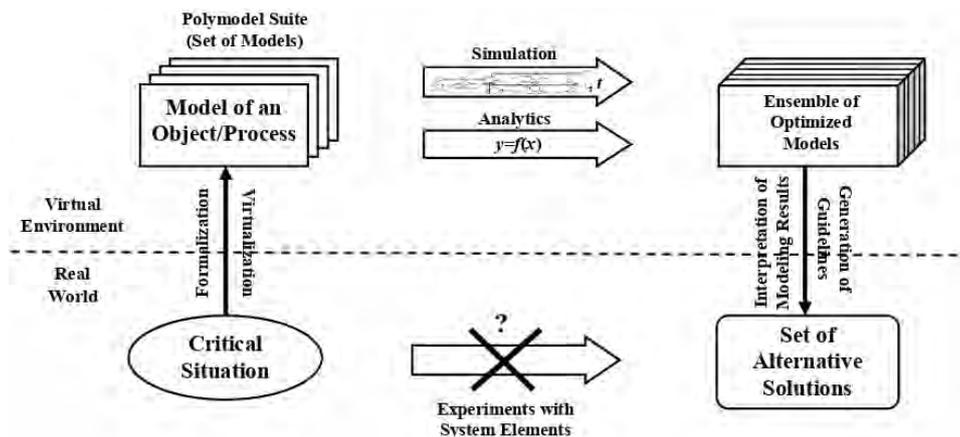


Fig. 1. The conceptual scheme of computer modeling application in regional security management

Situational centers of various levels (national, regional, municipal, sectoral, corporate) specialize in a wide range problem-solving concerned with risk assessment and analysis of the population and personnel safety, public and transport security, industrial-environmental and energy security, radiation and chemical protection, and others. The key mission of situational centers based on integration of digital platforms is to be a kind of intelligent buffer between the variety of relevant data sources and corresponding information users (decision makers) processed and systematized to provide the efficient management of regional and national security.

Any crisis or emergency situation (e.g. the up-to-date pandemic) is a powerful impetus for the search and development of new technological solutions, including the engineering of situational centers, in the field of security. It is just impossible to manage and ensure the security of a country or region in such conditions without the use of situational centers that provide digital transformation and information and analytical support for management processes.

### System Conception and Framework

When engineering the security systems for ensuring critical facilities, critical infrastructures and complex socio-economic objects from effecting internal and external threats, it is important to understand the mathematical essence and fundamental control principles of management processes that predetermine adequate security control procedures (programs) generation, selection and implementation under current

situation. That promotes the developing of security theory of the complex systems. Without going into the deep details, the conceptual essence of the security theory problems is related to sudden concatenation of fatal circumstances in the socio-economic, military-political and environmental spheres that can at worst lead both to a loss of resilience, stability or safety of the critical facilities and critical infrastructures, and to further destructive impacts on quality of human life, life-support system functioning and other negative consequences. These risks are mostly expected and predictable for technical systems, even so most often accidental for socio-economic systems.

Taking into consideration the specificity and multifold nature of the control object (regional socio-economic system), as well as the security system engineering problem scope, it is quite difficult to solve fully the problem of ensuring the regional security. Traditionally in practice, there are several approaches to this problem-solving distinguished in the classical mechanisms of implementing the control actions (institutional, motivational, information control) and organization methods of the "object – regulator" type management systems (open-loop, closed-loop and combined control system models).

An open-loop security management system is applied in case, when external disturbances (threats) can be identified, accurately measured and estimated. This class of control systems provides a possibility to obtain the complete invariance of external threats. However, such security management systems are inapplicable to control unstable critical objects and processes.

On the other hand, a closed-loop security management system is operating by deviation principle of control object state variables from the set point values. In that case, the control principle of negative (balancing) feedback is implemented under security management process. At the same time, there is no need to know accurately all the effecting threats and nature of hazard sources. These security control systems are well-applicable to protect and operate with unstable critical objects and processes, since it provide stabilization of the "object – regulator" system by means of actual changing the dynamics of the system itself.

To provide the efficient operation of a multi-level system for decentralized control of regional security, the given control schemes ("by deviation" and "by disturbance") should be used simultaneously, since the combined control is intended for large-scale systems that are characterized by structural and dynamic complexity. Regional socio-economic systems are classified to this type of complex systems, where it is possible to single out a deterministic part that can be analyzed in detail, estimated and rigidly planned, and non-deterministic that is almost not suitable for such an in-depth analysis. The design and implementation of regulators (control and support systems) in the context of security system organization for ensuring the complex objects, critical facilities and infrastructures is an independent research problem required further special studying.

The integrated system for ensuring the regional security is intended for comprehensive and continuous problem monitoring and forecasting the state of potentially dangerous facilities and critical infrastructures in the region, risk management and dynamics prediction of the regional emergency and crisis situations development and finally to improve the level of regional security.

Traditionally, the system operates in two main modes: the normal duty (in case of stable operation of the critical facilities and in the absence of emergency situations) and the malfunction (in case of origination of the designed and beyond designed accidents, external or internal threat implementation, manifestation and development of critical situations or initiation of the hazardous phenomena). Some of critical elements and processes must be monitored continuously, and others periodically.

The system for ensuring the regional security is functioning interactively with:

- particular (local) security support systems of critical facilities in the region (lower level);
- the national (federal) security management system (higher level);
- the administration of the region and municipalities (the same level of management).

The generic model of a system for ensuring the regional security consists of control object (regional socio-economic system), regulator (security management system), external environment, control and data flows, system state monitor, input and output resources, etc. This generic model is schematically shown on Figure 2. Figure 2 illustrates the main steps of security ensuring procedure and accounting of various factor impacts occurred in management process.

In accordance with research [22, 23] the main functions of the system are:

- 1) data acquisition and preprocessing;
- 2) data logging and registration, maintenance of databases and knowledge bases;
- 3) external data accessing, exchange and transfer;
- 4) data mapping and visual representation in a geospatial form;

- 5) analysis and assessment of the situational awareness and situation dynamics;
- 6) on-line and long-term forecasting based on simulation models of situation development;
- 7) guidelines generation for decision-makers and operators to managing the situation;
- 8) execution control of made decisions and implementation analysis of anti-crisis measures;
- 9) business process documenting and preparation of accounting summary data.

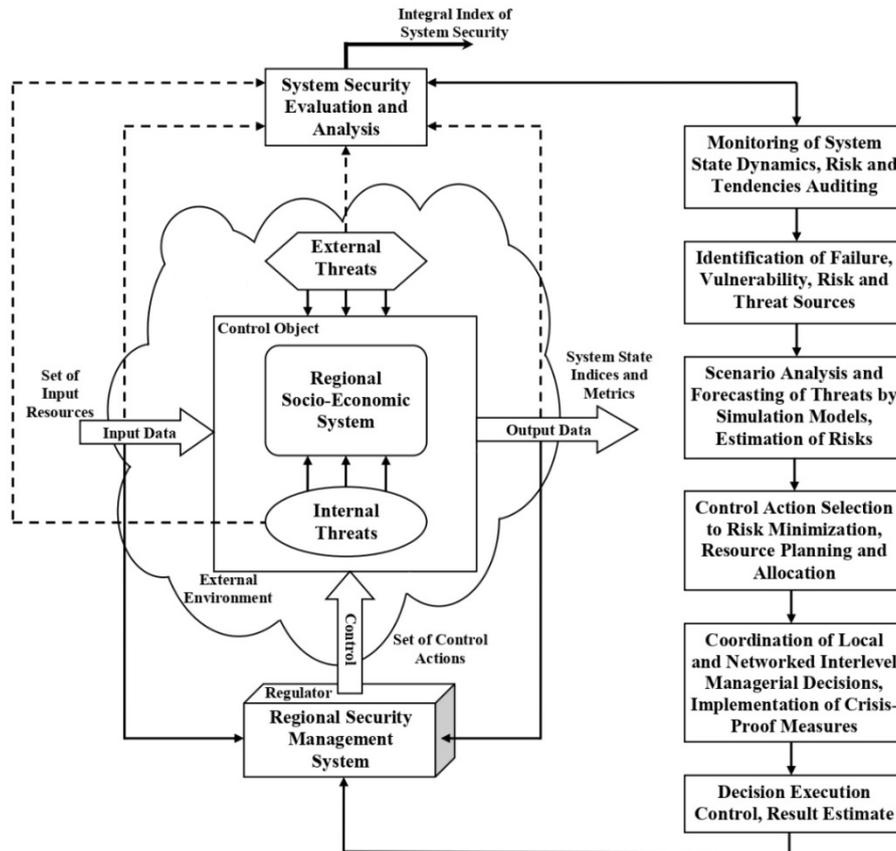


Fig. 2. The generic model of a system for ensuring the regional security

Listed above functions are implemented within the framework of a unified organizational and technical system and must be provided at the low-level activity (hardware), high-level activity (software) and organizational (user/management) level. The notation of particular (local) subsystems reflects the regional specificity in terms of the presence of potentially dangerous and critical facilities (nuclear power plants, oil and gas pipelines, life support systems, etc.). Figure 3 illustrates the architecture and functional components of the decision support system for managing the regional security based on computer modeling, scenario analysis and project management.

Key legend to Figure 3 includes: 1 – vector of control actions; 2 – selection of efficiency criteria and determination of relationships between them; 3 – accounting the criteria in the models under simulation process; 4 – adequacy analysis of the decisions according to the selected criteria; 5 – parameterization of models and input of initial data; 6 – report generation on a series of simulation experiments made; 7 – running models in the forecasting mode; 8 – running models in test mode; 9 – results of the test model executions; 10 – adequacy and performance evaluation of the model solutions; 11 – initial data; 12 – simulation results; 13 – interpretation of simulation results; 14 – a set of guidelines for decision makers to managing the system (process) critical elements and facilities.

When designing automated security systems for ensuring the resilience of critical facilities and regional critical infrastructures, it is necessary to take into account the delimitation of activity areas, jurisdiction (competences) and goal-setting (interests) of the regional security services and consequently the delimitation of on-line and analytical information between various separated departments responsible for ensuring the security of certain critical elements of regional systems. Thereupon, it is worth to draw attention to such a complicating factor as the interconnection of directions and the coordination of joint actions under security ensuring and management of the regional critical infrastructures and facilities. In turn, this

means the urgent needs to provide at once situational awareness and information negotiation and matching on various activity areas of the profile-relevant departments, as well as the possibility of data integration when assessing risks in the process of managerial decision making and implementing to regional security support.

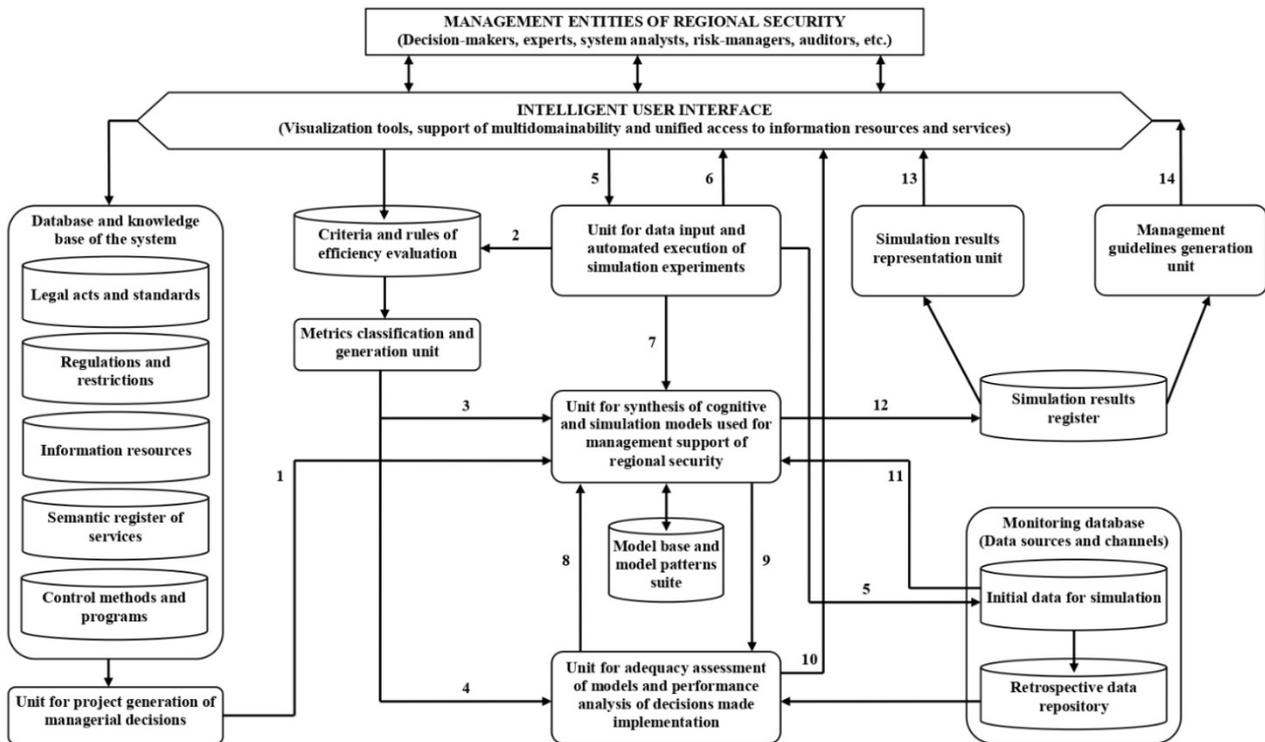


Fig. 3. The structure of a decision support system for managing the regional security

### Problem Statement and Formalization

The principal difficulty lies in the need to unify information on various aspects of security and resilience of regional development and vital functions. This heterogeneous information should be represented in certain unified form that allows data deep analysis and drawing conclusions on the risk level and the state of critical facilities, as well as on the situation in the region as a whole. Then, general proposals for such unification will be considered.

All security control objects in the region are subdivided into three groups:

- 1) critically important facilities;
- 2) critical situations;
- 3) critical infrastructures.

Critical facilities are such complex elements of regional system as nuclear power plants, oil pipelines, industries, life support systems, etc. These critical objects are prone to emergencies and undesired events that give rise to various threat sources initiation of regional security. Critical situations are complex developing processes, e.g. man-caused accidents, natural phenomena, social tension, economic crises, etc. Critical situations constitute and are accompanied by potential threats and risk of regional security. Critical facilities are mostly static objects of control, whereas critical situations are purely dynamic objects of risk management. At the same time, critical situations are not necessarily associated with specific critically important facilities, i.e. there may exist or occur design and beyond design critical situations. Thus, the nomenclature of critically important facilities and critical situations should be assigned and determined.

Critical infrastructures are in the wide sense defined as physical or virtual systems and assets that are so vitally to a country and region that partial or total violation and disruption of it resilient functioning would adversely affect the national security, economic development, defense, health or social well-being of population.

As an assessment of the safety level of critical facilities, it is possible to assume such a quantitative characteristic as the class of potential risk (hazard). Therein and below risk and hazard concepts are sub-

stantially synonymous. Hazard is considered as a threat in action or implementation of threat, where threat is a set of influencing factors and conditions which produce hazards. Three classes of potential risks are established: I, II, III. The first class is assigned to critical facilities and complex objects, where critical situations emerged lead to the most severe consequences, while the third class deals with critical situations of the least severe consequences. The second class occupies an intermediate place. Therefore, a nomenclature of consequences should be formed and established. Similarly, for critical situations the 1st, 2nd and 3rd hazard classes can be determined. Based on these indices it is possible to estimate overall indices of potential hazard classes and risk classes of critical situations for the region as a whole.

More detailed information on the hazard structure can be obtained by introducing the hazard fields into consideration. It is possible to distinguish the potential and actual hazard fields which are associated with critical facilities, critical situations and critical infrastructures respectively. The structure of the deterministic field is defined and formalized by the spatiotemporal hazard function:

$$R = R(X, Y, Z, t),$$

where  $R$  is a risk level at the point with coordinates  $X, Y, Z$  at time  $t$ .

The most general characteristic of a stochastic field is the risk distribution function:

$$F(r) = P\{R < r\}.$$

Discrete (e.g. the risk level can possess three values corresponding to the potential hazard classes) and continuous probability distributions can be considered. In any case, the probability of an event  $\{r_1 < R < r_2\}$  can be formally defined using the Lebesgue-Stieltjes integral [24]:

$$P\{r_1 < R < r_2\} = \int_{r_1}^{r_2} dF(r).$$

For the average value of risk level the following expression is valid:

$$\bar{R} = \int_{-\infty}^{+\infty} r dF(r).$$

In practice, it is convenient to represent hazard fields in the form of “spots” or isolines plotted on the interactive map respectively equal the risk level, e.g. in the form of circles (in the simplest way) or in the other animated forms, and to control and analysis the dynamics of risk development. Thereto, the state-of-the-art geoinformation technologies (GIS) are widely used [25].

The concept of risk has a probabilistic interpretation and is defined as a probabilistic measure of some unfavorable events that generate a critical situation at the control object with expected losses (damages). Therefore, the concept of risk can be formally defined as the average (expected) value of the loss function of an object (system) in a critical situation:

$$R = \sum_{j=1}^K L_j \Pr_j(E_j),$$

where  $R$  is the risk value;  $E_j, j = \overline{1, K}$ , is the set of all elementary combinations of adverse events compiled on the basis of conditions, when the state variables of control object exceed the bounds of acceptable values (the limits of the normal operation mode of the object);  $\Pr_j(E_j)$  – initiation probability of unfavorable events combination  $E_j, 0 \leq \Pr_j(E_j) \leq 1$ ;  $L_j$  – losses (damage) as a result of implementation of the adverse events combination.

Other formalization methods of the risk and security concepts in an analytical form are based on the formal apparatus of mathematical statistics, stability theory and sensitivity analysis.

One of the principal issues and problems in quantitative calculations and simulation of risk level is to determine the potential sources of negative influence, i.e. objects of hazard, and to answer the question: “the risk for whom or for what?”. In this case, different interdisciplinary approaches based on foundations of the risk management and analysis, situational control theory, reliability and security theory and other

fields of knowledge can be well applied. It is worth mentioning the well-known sanitary-hygienic and environmental principles in the nuclear power outlined in [26-27] as a good example. Depending on the answer to the question posed, specific security systems or subsystems can be chosen and implemented. Such are the rather general foundations of the risk concept formalization in the context of support and ensuring the regional security.

### Conclusion

As a result of the carried out study, the key approaches to system development for ensuring and support the regional security based on distributed situational centers deployment have been outlined. It is worth mention the complex character of this poorly-formalized multifaceted problem. To successful problem-solving joint efforts of theorists and practitioners in the field of risk analysis and security are required. In addition, the support at the public administration level and appropriate rule-making activities are required. In general, it is significant to state that from a methodological point of view the concept and foundations of security is gradually obtaining the same fundamental and universal character as for example the concepts and theory of information or entropy.

A conceptual model of the system for ensuring the regional security has been designed and a formalization of the security and risk concepts within the framework of this model has been proposed. The structure and composition of the decision support system for managing the regional security based on the use of situation simulation modeling aids has been developed and studied.

The contributions of this general research work have found application for risk management problem-solving of the security violation of regional critical infrastructures of Murmansk region in the context of mainstream implementation of the public policy of Russian Federation in the Arctic for the period up to 2035 on the basis of developing decision support systems for situational control and monitoring used in the regional management centers.

### References

1. Huebert R. Understanding Arctic security: A defence of traditional security analysis. *Breaking Through: Understanding Sovereignty and Security in the Circumpolar Arctic*. Toronto: University of Toronto Press, 2021:80–96.
2. Sergunin A. Arctic security perspectives from Russia. *Routledge Handbook of Arctic Security*. London: Routledge, 2020:129–139.
3. 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.)
4. Shul'ts V.L., Kul'ba V.V., Shelkov A.B., Chernov I.V. *Stsenarnyy analiza v upravlenii geopoliticheskimi informatsionnym protivoborstvom = Scenario analysis in the management of geopolitical information confrontation*. Moscow: Nauka, 2015:542. (In Russ.)
5. Gjørsv G.H., Bazely D.R., Goloviznina M., Tanentzap A.J. *Environmental and human security in the Arctic*. Abindgon; New York: Routledge, 2013:312.
6. Tsygichko V.N., Chereshkin D.S., Smolyan G.L. *Bezopasnost' kriticheskikh infrastruktur = Safety of critical infrastructures*. Moscow: URSS, 2019:200. (In Russ.)
7. Dover R., Dylan H., Goodman M. *The Palgrave handbook of security, risk and intelligence*. Palgrave Macmillan UK, 2017:501.
8. Burkov V.N., Novikov D.A., Shchepkin A.V. Control Mechanisms for Ecological-Economic Systems. *Studies in Systems, Decision and Control*. 2015;10:166.
9. Severtsev N.A., Betskov A.V. *Modelirovanie bezopasnosti funktsionirovaniya dinamicheskikh sistem = Modeling the safety of functioning of dynamic systems*. Moscow: TEIS, 2015:327. (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. Ryabinin I.A. *Nadezhnost' i bezopasnost' slozhnykh sistem = Reliability and safety of complex systems*. Saint Petersburg: Politekhnik, 2000:248. (In Russ.)
12. Korotkov A.S., Turlova A.V., Kosov A.D., Orekhov A.A. Automated system for monitoring the radiation situation in the NPP location area as a safety tool. *Atomnaya energiya = Atomic energy*. 2018;125(1):38–43. (In Russ.)
13. Mel'nikov N.N. [et al.]. *Nauchnye osnovy sozdaniya podzemnykh kompleksov dlya razmeshcheniya atomnykh stantsiy maloy moshchnosti v usloviyakh Arktiki = Scientific foundations for the creation of underground complexes for the placement of low-power nuclear power plants in the Arctic*. Apatity: FITs KNTs RAN, 2020:304. (In Russ.)
14. Bezlepkin V.V., Semashko S.E., Frolov A.S. The NPP-2006 project: radiation impact on the environment. *Bezopasnost' okruzhayushchey sredy = Environmental safety*. 2009;(3):135–137. (In Russ.)

15. Yastrebenetskiy M.A. *Bezopasnost' atomnykh stantsiy. Sistemy upravleniya i zashchity yadernykh reaktorov = Safety of nuclear power plants. Control and protection systems of nuclear reactors*. Kiev: Osnova-Print, 2011:763.
16. *Normy radiatsionnoy bezopasnosti (NRB-99/2009). Sanitarno-epidemiologicheskie pravila i normativy = Radiation safety standards (NRB-99/2009). Sanitary and epidemiological rules and norms*. Moscow: Federal'nyy tsentr gigieny i epidemiologii Rospotrebnadzora, 2009:100. (In Russ.)
17. *Federal'nye normy i pravila v oblasti ispol'zovaniya atomnoy energii «Obshchie polozheniya obespecheniya bezopasnosti atomnykh stantsiy» (NP-001-15) = Federal norms and rules in the field of atomic energy use "General provisions for ensuring the safety of nuclear power plants" (NP-001-15)*. Moscow: FBU NTTs YaRB, 2016:57. (In Russ.)
18. Mel'nikov N.N., Amosov P.V., Klimin S.G., Novozhilova N.V. *Ekologicheskie aspekty bezopasnosti podzemnoy atomnoy stantsii maloy moshchnosti v usloviyakh Arktiki = Environmental aspects of safety of a low-power underground nuclear power plant in the Arctic*. Yaroslavl: Printkhaus-Yaroslavl', 2018:170. (In Russ.)
19. Masloboev A.V. The concept of the Center for Advanced Research and security of the Arctic. *Arktika: ekologiya i ekonomika = Arctic: ecology and economics*. 2019;(2):129–143. (In Russ.)
20. Zatsarinnyy A.A., Suchkov A.P. *Informatsionnoe vzaimodeystvie v raspredelennykh sistemakh situatsionnogo upravleniya = Information interaction in distributed situational control systems*. Moscow: FITs IU RAN, 2021:256. (In Russ.)
21. Masloboev A.V. Regional management center framework for G2C-feedback and public safety support. *Reliability and quality of complex systems*. 2021;(4).
22. Ryzhenko A.A., Khabibulin R.Sh., Topol'skiy N.G., Bedilo M.V. *Adaptivnaya sistema podderzhki deyatel'nosti tsentrov upravleniya v krizisnykh situatsiyakh = Adaptive support system for the activity of control centers in crisis situations*. Moscow: Akademiya GPS MChS Rossii, 2014:151. (In Russ.)
23. Masloboev A.V. Conceptual foundations for the development of an intelligent information and control system for ensuring regional security of the Murmansk region. *Arktika: ekologiya i ekonomika = Arctic: ecology and economics*. 2017;(4):87–101. (In Russ.)
24. Tolstov G.P. *Mera i integral = Measure and integral*. Moscow: Nauka, 1976:392. (In Russ.)
25. Yakovlev S.Yu., Shemyakin A.S. Methods and software tools for information support of techno-sphere security of polar regions (on the example of the Murmansk region). *Istoriya nauki i tekhniki = History of Science and technology*. 2019;(4):46–54. (In Russ.)
26. *SP AS 03 Sanitarnye pravila proektirovaniya i ekspluatatsii atomnykh stantsiy = SP AS 03 Sanitary rules for the design and operation of nuclear power plants*. Moscow: FBU NTTs YaRB, 2003:36. (In Russ.)
27. Egorov Yu.A. Assessment of environmental safety and consequences of NPP operation in Russia. *Regional'naya ekologiya = Regional ecology*. 2006;(1–2):53–68. (In Russ.)

### Список литературы

1. Huebert R. Understanding Arctic security: A defence of traditional security analysis // *Breaking Through: Understanding Sovereignty and Security in the Circumpolar Arctic*. Toronto : University of Toronto Press, 2021. P. 80–96.
2. Sergunin A. Arctic security perspectives from Russia // *Routledge Handbook of Arctic Security*. London : Routledge, 2020. P. 129–139.
3. Маслобоев А. В., Путилов В. А. Информационное измерение региональной безопасности в Арктике. Апатиты : КНЦ РАН, 2016. 222 с.
4. Шульц В. Л., Кульба В. В., Шелков А. Б., Чернов И. В. Сценарный анализа в управлении геополитическим информационным противоборством. М. : Наука, 2015. 542 с.
5. Gjørv G. H., Bazely D. R., Goloviznina M., Tanentzap A. J. Environmental and human security in the Arctic. Abindgon ; New York : Routledge, 2013. 312 p.
6. Цыгичко В. Н., Черешкин Д. С., Смолян Г. Л. Безопасность критических инфраструктур. М. : УРСС, 2019. 200 с.
7. Dover R., Dylan H., Goodman M. The Palgrave handbook of security, risk and intelligence. Palgrave Macmillan UK, 2017. 501 p.
8. Burkov V. N., Novikov D. A., Shchepkin A. V. Control Mechanisms for Ecological-Economic Systems // *Studies in Systems, Decision and Control*. 2015. Vol. 10. 166 p.
9. Северцев Н. А., Бецов А. В. Моделирование безопасности функционирования динамических систем. М. : ТЭИС, 2015. 327 с.
10. Юрков Н. К. Безопасность сложных технических систем // *Вестник Пензенского государственного университета*. 2013. № 1. С. 128–134.
11. Рябинин И. А. Надежность и безопасность сложных систем. СПб. : Политехника, 2000. 248 с.
12. Коротков А. С., Турлова А. В., Косов А. Д., Орехов А. А. Автоматизированная система контроля радиационной обстановки в районе размещения АЭС как инструмент обеспечения безопасности // *Атомная энергия*. 2018. Т. 125, № 1. С. 38–43.

13. Мельников Н. Н. [и др.]. Научные основы создания подземных комплексов для размещения атомных станций малой мощности в условиях Арктики. Апатиты : ФИЦ КНЦ РАН, 2020. 304 с.
14. Безлепки В. В., Семашко С. Е., Фролов А. С. Проект «АЭС-2006»: радиационное воздействие на окружающую среду // Безопасность окружающей среды. 2009. № 3. С. 135–137.
15. Ястребенецкий М. А. Безопасность атомных станций. Системы управления и защиты ядерных реакторов. Киев : Основа-Принт, 2011. 763 с.
16. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009). Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. М. : Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009. 100 с.
17. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии «Общие положения обеспечения безопасности атомных станций» (НП-001-15). М. : ФБУ НТЦ ЯРБ, 2016. 57 с.
18. Мельников Н. Н., Амосов П. В., Климин С. Г., Новожилова Н. В. Экологические аспекты безопасности подземной атомной станции малой мощности в условиях Арктики. Ярославль : Принтхаус-Ярославль, 2018. 170 с.
19. Маслобоев А. В. Концепция Центра перспективных исследований и обеспечения безопасности Арктики // Арктика: экология и экономика. 2019. № 2. С. 129–143.
20. Зацаринный А. А., Сучков А. П. Информационное взаимодействие в распределенных системах ситуационного управления. М. : ФИЦ ИУ РАН, 2021. 256 с.
21. Masloboev A. V. Regional management center framework for G2C-feedback and public safety support // Reliability and quality of complex systems. 2021. № 4.
22. Рыженко А. А., Хабибулин Р. Ш., Топольский Н. Г., Бедило М. В. Адаптивная система поддержки деятельности центров управления в кризисных ситуациях. М. : Академия ГПС МЧС России, 2014. 151 с.
23. Маслобоев А. В. Концептуальные основы разработки интеллектуальной информационно-управляющей системы обеспечения региональной безопасности Мурманской области // Арктика: экология и экономика. 2017. № 4. С. 87–101.
24. Толстов Г. П. Мера и интеграл. М. : Наука, 1976. 392 с.
25. Яковлев С. Ю., Шемякин А. С. Методы и программные средства информационного обеспечения техносферной безопасности полярных регионов (на примере Мурманской области) // История науки и техники. 2019. № 4. С. 46–54.
26. СП АС 03 Санитарные правила проектирования и эксплуатации атомных станций. М.: ФБУ НТЦ ЯРБ, 2003. 36 с.
27. Егоров Ю. А. Оценка экологической безопасности и последствий эксплуатации АЭС в России // Региональная экология. 2006. № 1–2. С. 53–68.

### Информация об авторах / Information about the authors

#### Андрей Владимирович Маслобоев

доктор технических наук, доцент,  
ведущий научный сотрудник,  
Институт информатики и математического  
моделирования технологических процессов  
Кольского научного центра Российской академии наук  
(Россия, Апатиты, ул. Ферсмана, 24А)  
E-mail: masloboev@iimm.ru

#### Andrey V. Masloboev

Doctor of technical sciences, associate professor,  
leading researcher,  
Institute of Informatics and Mathematical Modelling  
of Technological Processes of Kola Science Centre  
of the Russian Academy of Sciences  
(24A Fersmana street, Apatity, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /  
The authors declare no conflicts of interests.**

**Поступила в редакцию/Received 20.06.2021**

**Поступила после рецензирования/Revised 10.09.2021**

**Принята к публикации/Accepted 25.10.2021**

Кабинет Министров Республики Татарстан под эгидой правительства Российской Федерации 21–24 сентября 2022 года в столице Республики Татарстан г. Казани проводит Международный форум **KAZAN DIGITAL WEEK–2022**

### **Тематические направления KDW–2022**

- Интеллектуальные транспортные системы;
- Цифровые технологии в сфере государственного и муниципального управления;
- Цифровая индустрия 4.0;
- Кибербезопасность нового времени;
- Экосистема финтех;
- Инновации, интегрированные в бизнес;
- Цифровые технологии в здравоохранении и медицине;
- Цифровые технологии в образовании;
- Цифровые технологии в культуре;
- Цифровые технологии в сфере сельского хозяйства.

Информация об условиях участия в различных мероприятиях форума, алгоритм регистрации, о публикации научных статей и презентаций, а также, полный архив материалов KDW–2021 представлены на сайте [kazandigitalweek.ru/](http://kazandigitalweek.ru/) [kazandigitalweek.com](http://kazandigitalweek.com).

### **Приглашаем к публикации статей**

Статьи принимаются в строгом соответствии с тематическими направлениями. Автор должен указать тематическое направление статьи. Все статьи проходят проверку программой «Антиплагиат» и двустороннее слепое рецензирование. После отбора экспертной группой статьи будут опубликованы в сборнике материалов форума. Возможна публикация в журналах, включенных в международную реферативную базу данных Scopus и рецензируемых ВАК, индексируемых в РИНЦ. Статьи принимаются до 1 июня 2022 года на электронный адрес: [org@kazandigitalweek.ru](mailto:org@kazandigitalweek.ru).

### **Приглашаем принять участие в хакатон-соревновании**

В период подготовки KDW–2022 с мая по сентябрь 2022 года пройдет Всероссийская серия онлайн хакатон-соревнований DIGITAL SUPERHERO.

К участию в соревнованиях по хакатону приглашаются программисты, аналитики, data scientists. Финал состоится в дни проведения KDW–2022.

Информация о хакатон-соревнованиях – на сайтах [dshkazan.ru](http://dshkazan.ru), [kazandigitalweek.ru/](http://kazandigitalweek.ru/) [kazandigitalweek.com](http://kazandigitalweek.com) и в социальных сетях форума.

### **Приглашаем принять участие в выставке**

В период проведения Международного форума KAZAN DIGITAL WEEK–2022 на экспозиционной площадке МВЦ «КАЗАНЬ-ЭКСПО» будет проходить выставка высокотехнологических разработок, программного обеспечения, программно-аппаратных комплексов, действующих образцов техники и оборудования. На площадке выставки предоставляется возможность проведения презентаций и участия в переговорах в очном и онлайн форматах.

Запрос об условиях участия в выставке направлять на электронный адрес: [Artem.Safin@tatar.ru](mailto:Artem.Safin@tatar.ru)