

СОДЕРЖАНИЕ

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ ПРОБЛЕМ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА

Головкин В. В., Батищева О. М., Папшев В. А.
ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО
СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ РЕЗЬБОВЫХ ДЕТАЛЕЙ
В УСЛОВИЯХ НАРЕЗАНИЯ РЕЗЬБЫ С УЛЬТРАЗВУКОВЫМИ КОЛЕБАНИЯМИ 5

Громов А. А., Чебурков Ю. В., Годунов А. И., Юрков Н. К.
МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМЫ «СТРЕЛКОВОЕ ОРУЖИЕ – СТВОЛ – ПУЛЯ»
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ 12

Старостин И. Е., Дружинин А. А.
АНАЛИТИЧЕСКОЕ ПРИБЛИЖЕНИЕ РЕШЕНИЙ УРАВНЕНИЙ МЕТОДА
МАТЕМАТИЧЕСКОГО ПРОТОТИПИРОВАНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ
ПРОЦЕССОВ ПУТЕМ КАЧЕСТВЕННОГО АНАЛИЗА ЭТИХ УРАВНЕНИЙ 22

Пафилов Е. А., Годунов А. И., Юрков Н. К., Николаев О. В.
АЛГОРИТМЫ АДАПТИВНОГО ОБНАРУЖЕНИЯ СИГНАЛА,
ОТРАЖЕННОГО ОТ МАЛОРАЗМЕРНЫХ НАЗЕМНЫХ ЦЕЛЕЙ 32

Рыбаков И. М.
МОДЕЛИ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
ПАРАМЕТРОВ В СЛОЖНЫХ СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОНИКИ 44

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИИ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ
И РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ**

Дерябин Д. В., Горячев Н. В., Юрков Н. К.
ТЕХНОЛОГИЯ ОБРАБОТКИ МЕДИ И МЕДНЫХ СПЛАВОВ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ 51

Зырянов Ю. Т.
МЕТОДЫ ОПЕРАТИВНОЙ ОЦЕНКИ И ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИЦЕЛЬНО-НАВИГАЦИОННЫХ КОМПЛЕКСОВ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ СРЕДСТВ ОБЪЕКТИВНОГО КОНТРОЛЯ (часть 1) 62

Зырянов Ю. Т.
МЕТОДЫ ОПЕРАТИВНОЙ ОЦЕНКИ И ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИЦЕЛЬНО-НАВИГАЦИОННЫХ КОМПЛЕКСОВ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ СРЕДСТВ ОБЪЕКТИВНОГО КОНТРОЛЯ (часть 2) 72

Кубасов И. А.
ПРОМЫШЛЕННЫЙ ИНТЕРНЕТ ВЕЩЕЙ КАК РЕВОЛЮЦИОННЫЙ СКАЧОК РАЗВИТИЯ 83

Трофимов А. А., Кикот В. В., Фокина Е. А., Марков Д. М., Смирнов И. Е. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ СОЗДАНИЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ТЕКСТУРИРОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ ПЬЕЗОЭЛЕМЕНТОВ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ	90
---	----

ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

Самаров В. В. ТЕСТИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ВЫПОЛНЕНИЯ КОДА PYTHON ПРОГРАММ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ЭТАПА СЕРТИФИКАЦИОННЫХ ИСПЫТАНИЙ (РАЗРАБОТКИ) В СИСТЕМЕ СЕРТИФИКАЦИИ МИНОБОРОНЫ РОССИИ.....	96
---	----

Савельев В. Н., Новоточинов Н. С., Ямпурин Н. П. МОЛНИЕЗАЩИТА ПНЕВМОКЛАПАНА ВОЗДУШНОГО СУДНА.....	104
---	-----

БЕЗОПАСНОСТЬ В ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ

Masloboev A.V. SYSTEMATIC APPROACH FOR ENSURING THE RESILIENCE OF ECOLOGICAL-ECONOMIC SYSTEMS OF THE RUSSIAN ARCTIC (PART 2. ASSESSMENT PROCEDURE AND CRITERIA)	115
--	-----

CONTENT

FUNDAMENTALS OF RELIABILITY AND QUALITY ISSUES

Golovkin V.V., Batishcheva O.M., Papshev V.A. STUDY OF THE FORMATION OF THE STRESS-STRAIN STATE OF THE SURFACE LAYER OF THREADED PARTS UNDER THE CONDITIONS OF THREADING WITH ULTRASONIC VIBRATIONS	5
Gromov A.A., Cheburkov Yu.V., Godunov A.I., Yurkov N.K. MODELING OF ELEMENTS OF THE "SMALL ARMS – BARREL – BULLET" SYSTEM USING THE FINITE ELEMENT METHOD.....	12
Starostin I.E., Druzhinin A.A. ANALYTICAL APPROXIMATION OF SOLUTIONS OF EQUATIONS OF THE METHOD OF MATHEMATICAL PROTOTYPING OF ENERGY PROCESSES BY QUALITATIVE ANALYSIS OF THESE EQUATIONS.....	22
Pafikov E.A., Godunov A.I., Yurkov N.K., Nikolaev O.V. ADAPTIVE DETECTION ALGORITHMS FOR SIGNAL REFLECTED FROM SMALL-SIZED GROUND TARGETS.....	32
Rybakov I.M. MODELS AND METHODS FOR MEASURING ELECTRICAL PARAMETERS IN COMPLEX ELECTRONICS SYSTEMS.....	44

DESIGN AND TECHNOLOGY OF INSTRUMENTATION AND ELECTRONIC EQUIPMENT

Deryabin D.V., Goryachev N.V., Yurkov N.K. PROCESSING OF COPPER AND METAL MELTS BY ELECTROMAGNETIC PULSES.....	51
Zyryanov Yu.T. METHODS OF OPERATIONAL EVALUATION AND ENSURING THE ACCURACY CHARACTERISTICS OF OPTO-ELECTRONIC SIGHTING AND NAVIGATION COMPLEXES USING THESE OBJECTIVE CONTROL TOOLS (Part 1)	62
Zyryanov Yu.T. METHODS OF OPERATIONAL EVALUATION AND ENSURING THE ACCURACY CHARACTERISTICS OF OPTO-ELECTRONIC SIGHTING AND NAVIGATION COMPLEXES USING THESE OBJECTIVE CONTROL TOOLS (Part 2)	72
Kubasov I.A. INDUSTRIAL INTERNET OF THINGS AS A REVOLUTIONARY LEAP IN DEVELOPMENT	83
Trofimov A.A., Kikot V.V., Fokina E.A., Markov D.M., Smirnov I.E. RESEARCH OF TECHNOLOGY FOR CREATING HIGH-TEMPERATURE TEXTURED MATERIALS FOR MANUFACTURING MULTILAYER PIEZO TRANSDUCER ELEMENTS	90

DIAGNOSTIC METHODS FOR ENSURING RELIABILITY AND QUALITY OF COMPLEX SYSTEMS

Samarov V.V.

TESTING THE DYNAMIC EXECUTION OF PYTHON PROGRAM CODE
DURING THE CERTIFICATION TESTING (DEVELOPMENT) STAGE
IN THE CERTIFICATION SYSTEM OF THE MINISTRY OF DEFENSE OF RUSSIA 96

Saveliev V.N., Novotochinov N.S., Yampurin N.P.

LIGHTNING PROTECTION OF THE AIR VALVE OF THE AIRCRAFT 104

SAFETY IN EMERGENCY SITUATIONS

Masloboev A.V.

SYSTEMATIC APPROACH FOR ENSURING THE RESILIENCE OF ECOLOGICAL-ECONOMIC
SYSTEMS OF THE RUSSIAN ARCTIC (PART 2. ASSESSMENT PROCEDURE AND CRITERIA) 115

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ ПРОБЛЕМ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА

FUNDAMENTALS OF RELIABILITY AND QUALITY ISSUES

УДК 621.9.048

doi:10.21685/2307-4205-2023-2-1

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ РЕЗЬБОВЫХ ДЕТАЛЕЙ В УСЛОВИЯХ НАРЕЗАНИЯ РЕЗЬБЫ С УЛЬТРАЗВУКОВЫМИ КОЛЕБАНИЯМИ

В. В. Головкин¹, О. М. Батищева², В. А. Папшев³

^{1, 2, 3} Самарский государственный технический университет, Самара, Россия

¹ms-ap@samgtu.ru, ²omb@list.ru, ³pva_samara@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Предложен способ и специальные ультразвуковые устройства, повышающие эффективность технологического процесса нарезания резьбы с учетом особенностей процесса обработки. *Материалы и методы.* Представлена модель напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя впадины резьбы, полученная по результатам эксперимента с варьированием видов ультразвуковых колебаний, что позволило оценить их влияние на формирование напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя, формирующегося во впадинах резьбы. *Результаты и выводы.* Основные результаты работы иллюстрируются эпюрами распределения полей остаточных напряжений в упрочненном поверхностном слое впадины резьбы.

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние, остаточные напряжения, резьба, ультразвуковые колебания, упрочнение поверхностного слоя

Для цитирования: Головкин В. В., Батищева О. М., Папшев В. А. Исследование формирования напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя резьбовых деталей в условиях нарезания резьбы с ультразвуковыми колебаниями // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 2. С. 5–11. doi:10.21685/2307-4205-2023-2-1

STUDY OF THE FORMATION OF THE STRESS-STRAIN STATE OF THE SURFACE LAYER OF THREADED PARTS UNDER THE CONDITIONS OF THREADING WITH ULTRASONIC VIBRATIONS

V.V. Golovkin¹, O.M. Batishcheva², V.A. Papshev³

^{1, 2, 3} Samara State Technical University, Samara, Russia

¹ms-ap@samgtu.ru, ²omb@list.ru, ³pva_samara@mail.ru

Abstract. *Background.* A method and special ultrasonic devices are proposed that increase the efficiency of the technological process of threading, taking into account the features of the processing process. *Materials and methods.* A model of the stress-strain state of the surface layer of the thread cavity is presented, obtained from the results of an

experiment with varying types of ultrasonic vibrations, which made it possible to evaluate their influence on the formation of the stress-strain state of the surface layer formed in the thread cavity. *Results and conclusions.* The main results of the work are illustrated by diagrams of the distribution of residual stress fields in the hardened surface layer of the thread root.

Keywords: stress-strain state, residual stresses, thread, ultrasonic vibrations, hardening of the surface layer

For citation: Golovkin V.V., Batishcheva O.M., Papshev V.A. Study of the formation of the stress-strain state of the surface layer of threaded parts under the conditions of threading with ultrasonic vibrations. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2023;(2):5–11. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2023-2-1

Введение

В современном машиностроении, а также других отраслях промышленности наибольшее распространение получили технологии сборки на основе резьбовых соединений. Преимуществом резьбовых соединений по сравнению с прессовыми соединениями, а также соединениями с помощью заклепок является возможность многократной их разборки и последующей сборки при ремонте и техническом обслуживании агрегатов и машин. При этом соединение деталей осуществляется с необходимым оптимальным усилием (моментом затяжки), что часто является крайне важным условием сборки узла. По различным данным более 60 % сборочных единиц имеет резьбу. При этом качество крепежных резьбовых соединений зависит от всех стадий жизненного цикла изделия – проектирования, изготовления, сборки и эксплуатации. Отметим, что важным этапом является технологический процесс формирования резьбовой поверхности детали. При этом получать резьбу возможно различными способами, например, накатыванием, шлифованием, нарезанием лезвийными инструментами. Кроме того, при необходимости повышения качества поверхностного слоя ответственных резьбовых деталей их подвергают дополнительным упрочняющим операциям, например, обработке микрошариками, щетками, алмазному выглаживанию и др. В результате удается уменьшить шероховатость поверхности, увеличить степень деформационного упрочнения (наклепа), а также получить значительные по величине сжимающие остаточные напряжения, что особо значимо в условиях переменных нагрузок. При этом сжимающие остаточные напряжения суммируются с растягивающими рабочими напряжениями, тем самым повышая циклическую прочность [1, 2].

Следует отметить, что для повышения надежности деталей все более широкое применение получают материалы с высокими физико-механическими характеристиками, позволяющими значительно повысить работоспособность, в том числе ответственных резьбовых деталей. Однако в ряде случаев механическая обработка данных материалов – особенно нарезание резьбы – вызывает серьезные затруднения. Для повышения эффективности обработки применяют различные физико-химические методы, основанные на комбинированном воздействии различных видов энергии. Вследствие применения ультразвуковых технологий удалось повысить производительность операций, стойкость инструмента, точность и качество поверхностного слоя резьбы [1–3].

Анализ разрушения резьбовых деталей показал, что наиболее проблемным местом является впадина резьбы, которая является концентратором напряжений и, соответственно, в ней формируется усталостная трещина, приводящая к дальнейшему разрушению. Поэтому наиболее важным является определение остаточных напряжений, формирующихся именно во впадине резьбы. В соответствии с вышеизложенным целью данной работы является теоретико-экспериментальное определение процесса формирования остаточных напряжений во впадине резьбы в условиях нарезания с ультразвуковыми колебаниями. При этом сначала экспериментально определяется одна из компонент осевых остаточных напряжений, а далее расчетным путем оценивались три составляющие: осевые, окружные и радиальные напряжения.

Методика экспериментальных исследований

Экспериментальные исследования выполнялись с использованием ультразвуковых технологий и специального инструмента для нарезания резьб. Технологии и инструмент (рис. 1) разработаны в Самарском государственном техническом университете. В эксперименте использованы калиброванные заготовки из титанового сплава ВТ3-1 [1–3].

Методика заключалась в нарезании резьбы М5 (имеет меньшие прочностные свойства в сравнении с большими диаметрами и вместе с тем является наиболее распространенной). Режимы резания были следующими: скорость резания 0,6 м/мин, продольная подача 1 мм/об, частота ультразвуковых

колебаний, связанная с резонансной частотой ультразвукового инструмента, – 19 000 – 21 000 Гц, амплитуда колебаний – 5 мкм. Согласно методике нарезание производилось как без ультразвуковых колебаний, так и с ультразвуковыми колебаниями. Колебания были приложены соответственно в осевом, тангенциальном (окружном) и радиальном направлении.

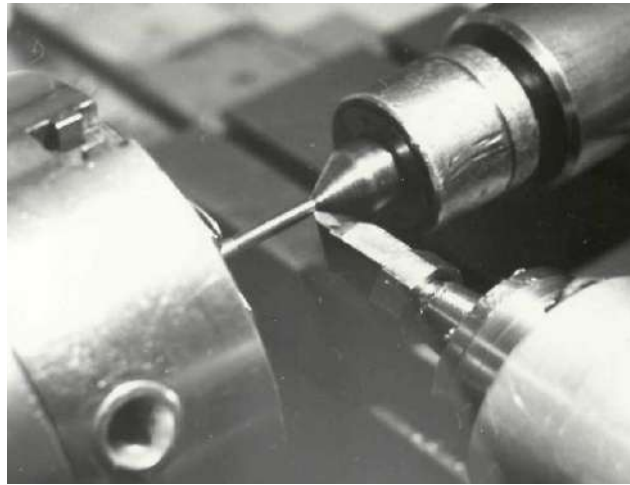


Рис. 1. Установка для ультразвукового нарезания резьбы

Цель экспериментальных исследований заключалась в оценке динамики состояния резьбового образца с использованием специальной методики [4]. На первом этапе половина поверхности впадин резьбы покрывалась лаком. Далее образец подвергался травлению. При травлении происходила деформация образцов и измерялись перемещения от действующих напряжений. Далее производился расчет по формуле

$$\sigma_z^{rez}(h_j) = \frac{C}{X_p(h_j)} \left[\frac{df(h)}{dh} \right]_j,$$

где $X_p(h_j)$ – коэффициент, учитывающий масштабный фактор; $f(h)$ – перемещение образца; C – коэффициент, определяемый по соотношению

$$C = \frac{E}{(1+\mu)(1-2\mu)} \left[(L-l) \frac{l}{P} + \frac{l^2}{2P} \right],$$

где E – модуль продольной упругости; μ – коэффициент Пуассона; L – длина образца с удлинителем; l – длина образца; P – шаг резьбы.

Анализ результатов эксперимента

В результате анализа выявлено, что в поверхностном слое заготовок из титанового сплава ВТЗ-1 при нарезании резьбы формируются сжимающие осевые остаточные напряжения, распределение которых происходит следующим образом:

1. В случае нарезания резьбы без воздействия ультразвука на поверхностный слой остаточные напряжения формируются следующим образом: около поверхности на глубине залегания 0,01 мм имеют значение около 100 МПа, при 0,10 мм достигают 440 МПа, а затем плавно уменьшаются (по модулю) до нуля на глубине 0,16 мм. Затем переходят в растягивающие величиной до 40 МПа.

2. При ведении ультразвуковых колебаний распределение остаточных напряжений меняется в зависимости от их направления. Например, при обработке с тангенциальными ультразвуковыми колебаниями напряжения уменьшаются до 40 МПа на глубине 0,01 мм, при 0,09 мм достигают значений 290 МПа (по модулю), а после 0,15 мм становятся растягивающими и имеют значение около 50 МПа. При введении в зону резания ультразвуковых колебаний в осевом и радиальном направлениях наблюдался значительный рост сжимающих остаточных напряжений (рис. 2).

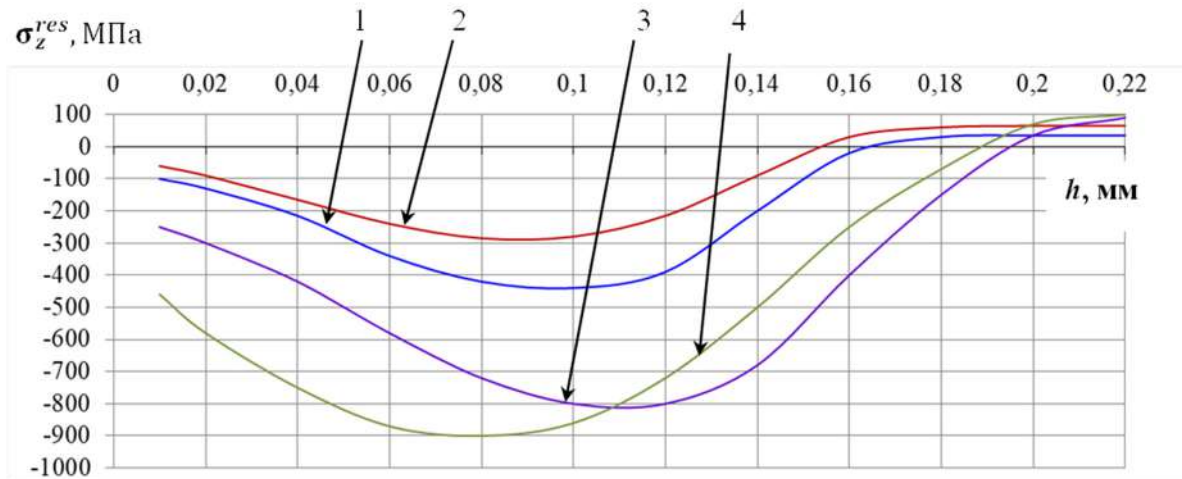


Рис. 2. Формирование осевых остаточных напряжений в поверхностном слое впадины резьбы М5 при обработке титанового сплава ВТ3-1: 1 – нарезание резьбы без ультразвуковых колебаний; 2 – нарезание резьбы с тангенциальными ультразвуковыми колебаниями; 3 – нарезание резьбы с осевыми ультразвуковыми колебаниями; 4 – нарезание резьбы с радиальными ультразвуковыми колебаниями

При осевых ультразвуковых колебаниях удалось достичь значений 810 МПа (по модулю) на глубине 0,11 мм, а при нарезании резьбы с радиальными ультразвуковыми колебаниями получили 900 МПа уже на глубине 0,08 мм.

Таким образом, в результате выполненных экспериментальных исследований установлено, что введение в зону резания ультразвуковых колебаний в осевом или радиальном направлении позволяет сформировать во впадине резьбы значительные по величине благоприятные остаточные напряжения.

Результаты и методика оценки напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя впадины резьбы

Специальная методика [5] оценки напряженно-деформированного состояния основана на том, что восстановление остаточных напряжений во впадине резьбы производится как в бесконечно малом цилиндрическом образце диаметром, равным диаметру исследуемой впадины резьбы. В качестве исходных данных берутся полученные экспериментальным путем зависимости распределения остаточных напряжений в осевом направлении.

На основе уравнения равновесия:

$$r \frac{d\sigma_r^{rez}}{dr} + \sigma_r^{rez} = \sigma_\theta^{rez}.$$

После определения пластических деформаций можно найти ε_z^0 и определить значения остаточных напряжений $\sigma_z^{rez}(r)$:

$$\varepsilon_z^0 = \frac{2}{a^2} \int_0^a r \left\{ q_z(r) - \frac{\mu}{E} [\sigma_r^{rez}(r) + \sigma_\theta^{rez}(r)] \right\} dr.$$

С учетом того, что имелись экспериментальные значения осевой компоненты остаточных напряжений, то при расчете последовательно задавали значения окружных остаточных напряжений до момента, пока расхождение экспериментальных и теоретических результатов будет минимальным (рис. 3–5).

Из представленных результатов видно, что значения остаточных напряжений в окружном и осевом направлениях близки. При этом в радиальном направлении формируются растягивающие напряжения и после 0,2 мм остаются постоянными. При радиальных ультразвуковых колебаниях получили 53 МПа, при осевых – 48 МПа, при тангенциальных – 13 МПа, без колебаний – 20 МПа.

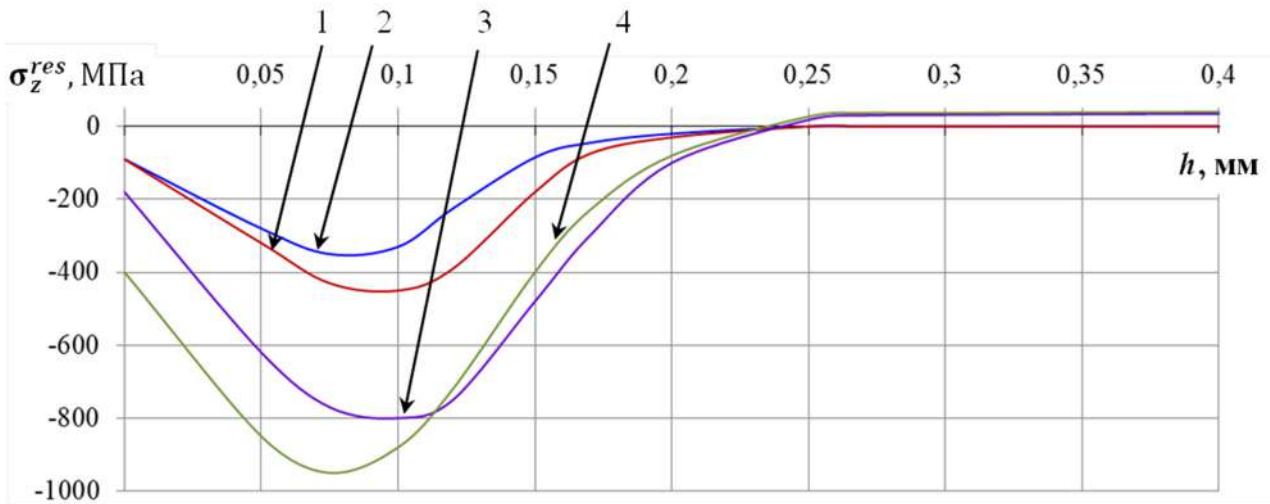


Рис. 3. Распределение окружных остаточных напряжений при обработке титанового сплава ВТ3-1:
 1 – резание с тангенциальными колебаниями; 2 – обычное резание;
 3 – резание с осевыми колебаниями; 4 – резание с радиальными колебаниями

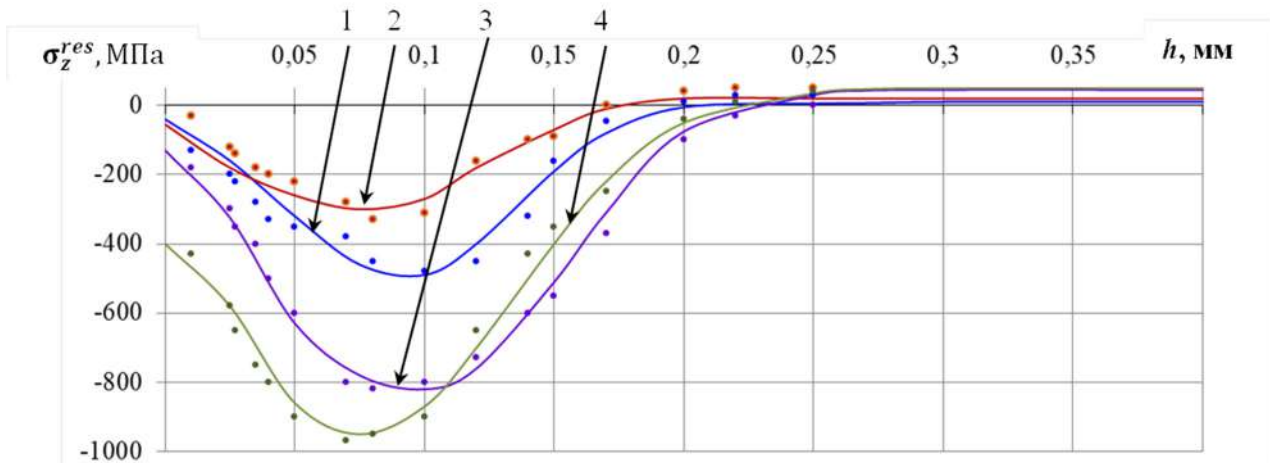


Рис. 4. Распределение осевых остаточных напряжений при обработке титанового сплава ВТ3-1:
 1 – резание с тангенциальными колебаниями; 2 – обычное резание; 3 – резание с осевыми колебаниями;
 4 – резание с радиальными колебаниями (точки – эксперимент, сплошная линия – расчет)

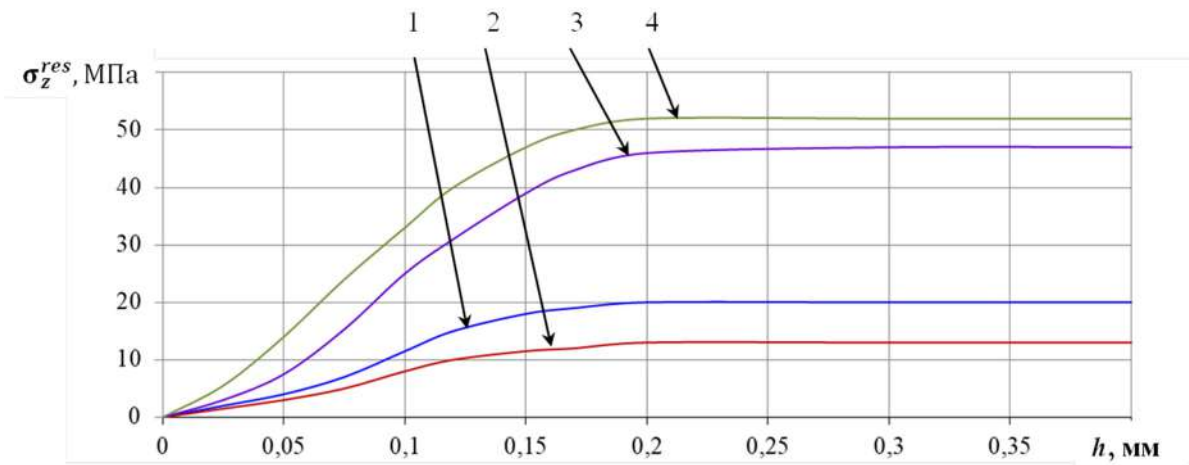


Рис. 5. Распределение радиальных остаточных напряжений при обработке титанового сплава ВТ3-1:
 1 – резание с тангенциальными колебаниями; 2 – обычное резание;
 3 – резание с осевыми колебаниями; 4 – резание с радиальными колебаниями

Формирование остаточных напряжений в окружном и осевом направлениях существенно отличается. Сначала происходит возрастание по модулю сжимающих остаточных напряжений до глубины 0,7–0,9 мм, затем уменьшение по модулю до нуля на глубине 0,16–0,20 мм.

Отклонение значений выполненных расчетов и результатов эксперимента в среднем составило 5–13 %. Важным является то, что обработка с применением ультразвуковых колебаний в осевом или радиальном направлении дает возможность достижения значений сжимающих напряжений (окружных и осевых), равных 800–900 МПа.

Заключение

Выполненные экспериментальные исследования влияния вынужденных ультразвуковых колебаний на формирование напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя впадины резьбы при обработке заготовок из титанового сплава ВТ3-1 позволили установить взаимосвязь влияния различных по направлению ультразвуковых колебаний на формирование полей остаточных напряжений. Показана эффективность применения осевых и радиальных ультразвуковых колебаний: значения остаточных сжимающих напряжений увеличиваются в 1,5–2 раза по сравнению с нарезанием резьбы без ультразвука. Разработана и апробирована математическая модель, дающая возможность определить расчетным путем распределение полей остаточных напряжений во впадине резьбы.

Представленные модели и методики могут быть использованы при прогнозировании эксплуатационного ресурса резьбовых деталей, работающих в условиях знакопеременных нагрузок.

Список литературы

1. Golovkin V., Batishcheva O., Papshev V. Ultrasonic influence on the quality formation of surface layer when cutting thread // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 709. P. 033043.
2. Golovkin V., Batishcheva O., Papshev V. Ultrasonic Impact Study on Strain Hardening of Thread Profile Surface Layer // *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2020. P. 1035–1041.
3. Golovkin V., Batishcheva O., Papshev V. Enhance the efficiency of the internal threads cutting process with taps by applying ultrasonic vibrations // *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 224. P. 01113.
4. Павлов В. Ф., Кирпичев В. А., Иванов В. Б. Остаточные напряжения и сопротивление усталости упрочненных деталей с концентраторами напряжений : монография. Самара : Изд-во СНЦ, 2008. 64 с.
5. Радченко В. П., Саушкин М. Н. Ползучесть и релаксация остаточных напряжений в упрочненных конструкциях. М. : Машиностроение-1, 2005. 226 с.

References

1. Golovkin V., Batishcheva O., Papshev V. Ultrasonic influence on the quality formation of surface layer when cutting thread. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020;709:033043.
2. Golovkin V., Batishcheva O., Papshev V. Ultrasonic Impact Study on Strain Hardening of Thread Profile Surface Layer. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2020:1035–1041.
3. Golovkin V., Batishcheva O., Papshev V. Enhance the efficiency of the internal threads cutting process with taps by applying ultrasonic vibrations. *MATEC Web of Conferences*. 2018;224:01113.
4. Pavlov V.F., Kirpichev V.A., Ivanov V.B. *Ostatochnyye napryazheniya i soprotivlenie ustalosti uprochnennykh detaley s kontsentratorami napryazheniy: monografiya = Residual stresses and fatigue resistance of hardened parts with stress concentrators : monograph*. Samara: Izd-vo SNTs, 2008:64. (In Russ.)
5. Radchenko V.P., Saushkin M.N. *Polzuchest' i relaksatsiya ostatochnykh napryazheniy v uprochnennykh konstruktivnykh = Creep and relaxation of residual stresses in reinforced structure*. Moscow: Mashinostroenie-1, 2005:226. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Валерий Викторович Головкин

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры транспортных процессов
и технологических комплексов,
Самарский государственный
технический университет
(Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244)
E-mail: ms-ap@samgtu.ru

Valery V. Golovkin

Candidate of technical sciences, associate professor,
associate professor of the sub-department
of transport processes and technological complexes,
Samara State Technical University
(144 Molodogvardeyskaya street, Samara, Russia)

Оксана Михайловна Батищева

кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой транспортных процессов
и технологических комплексов,
Самарский государственный
технический университет
(Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244)
E-mail: omb@list.ru

Валерий Александрович Папшев

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры транспортных процессов
и технологических комплексов,
Самарский государственный
технический университет
(Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244)
E-mail: pva_samara@mail.ru

Oksana M. Batishcheva

Candidate of technical sciences, associate professor,
head of the sub-department of transport processes
and technological complexes,
Samara State Technical University
(144 Molodogvardeyskaya street, Samara, Russia)

Valery A. Papshev

Candidate of technical sciences, associate professor,
associate professor of the sub-department
of transport processes and technological complexes,
Samara State Technical University
(144 Molodogvardeyskaya street, Samara, Russia)

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

Поступила в редакцию/Received 18.02.2023

Поступила после рецензирования/Revised 18.03.2023

Принята к публикации/Accepted 21.04.2023

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМЫ «СТРЕЛКОВОЕ ОРУЖИЕ – СТВОЛ – ПУЛЯ» С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

А. А. Громов¹, Ю. В. Чебурков², А. И. Годунов³, Н. К. Юрков⁴

^{1,2} Филиал Военной академии материально-технического обеспечения
имени генерала армии А. В. Хрулева в г. Пензе, Пенза, Россия

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

¹ darkzgrom@gmail.com, ² yuceburkov@mail.ru, ³ godunov@pnzgu.ru, ⁴ yurkov_NK@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Стрелковое оружие является неотъемлемой частью современного боя. В связи с развитием средств бронезащиты требуется повышать эффективность индивидуального стрелкового оружия. *Материалы и методы.* Одним из средств достижения цели по повышению эффективности образца является 3d моделирование. При использовании новых технических решений необходимо проведение оптимизации направленных на выбор наилучших конструктивных характеристик. В статье рассмотрен порядок проведения моделирования с целью оптимизации и выбора оптимальных технических характеристик с помощью программных комплексов системы автоматизированного проектирования элементов системы «стрелковое оружие – ствол – пуля» с использованием метода конечных элементов. *Результаты и выводы.* Смоделированная система позволяет на этапе проектирования спрогнозировать технические характеристики стрелкового оружия с целью повышения эффективности его действия.

Ключевые слова: модель, стрелковое оружие, пуля, патрон, система

Для цитирования: Громов А. А., Чебурков Ю. В., Годунов А. И., Юрков Н. К. Моделирование элементов системы «стрелковое оружие – ствол – пуля» с использованием метода конечных элементов // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 2. С. 12–21. doi:10.21685/2307-4205-2023-2-2

MODELING OF ELEMENTS OF THE "SMALL ARMS – BARREL – BULLET" SYSTEM USING THE FINITE ELEMENT METHOD

A.A. Gromov¹, Yu.V. Cheburkov², A.I. Godunov³, N.K. Yurkov⁴

^{1,2} Branch of the Military Academy of Logistics named after Army General A.V. Khrulev in Penza, Penza, Russia

^{3,4} Penza State University, Penza, Russia

¹ darkzgrom@gmail.com, ² yuceburkov@mail.ru, ³ godunov@pnzgu.ru, ⁴ yurkov_NK@mail.ru

Abstract. *Background.* Small arms are an integral part of modern combat. In connection with the development of armor protection means, it is required to increase the effectiveness of individual small arms. *Materials and methods.* One of the means to achieve the goal of improving the efficiency of the sample is 3d modeling. When using new technical solutions, it is necessary to carry out optimization aimed at choosing the best design characteristics. The article considers the procedure for conducting modeling in order to optimize and select the optimal technical characteristics using computer-aided design software systems for the elements of the "small arms – barrel – bullet" system using the finite element method. *Results and conclusions.* The simulated system allows at the design stage to predict the technical characteristics of small arms in order to increase the effectiveness of its action.

Keywords: model, small arms, bullet, cartridge, system

For citation: Gromov A.A., Cheburkov Yu.V., Godunov A.I., Yurkov N.K. Modeling of elements of the "small arms – barrel – bullet" system using the finite element method. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2023;(2):12–21. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2023-2-2

Введение

Главные политические установки военной доктрины Российской Федерации ориентированы на устранение войны из жизни человечества, упрочение международной стабильности и безопасности. Оборонительный характер военной доктрины не снижает, а наоборот, предъявляет более высокие требования к эффективности ракетно-артиллерийского вооружения и, в частности, индивидуального стрелкового оружия военнослужащего. Повышение эффективности ракетно-артиллерийского вооружения – главное требование при проектировании новых и модернизации существующих систем. Чем выше эффективность индивидуального стрелкового оружия, тем выше эффективность военнослужащего. Одним из способов повышения эффективности является моделирование систем вооружения с целью выбора оптимальных технических характеристик, позволяющих повысить эффективность действия стрелкового оружия. Рассмотрим способ моделирования системы «стрелковое оружие – ствол – пуля» с использованием метода конечных элементов.

Моделирование системы «стрелковое оружие – ствол – пуля» с использованием методов конечных элементов

Для моделирования движения пули по каналу ствола используем ряд программных комплексов, а именно: для создания моделей патрона и ствола в декартовой системе координат применен *SolidWorks*, а для непосредственного моделирования перемещения поражающего элемента внутри ствола образца стрелкового оружия (СО) выбран комплекс *ANSYS*, точнее – его приложения *AYTODYN* и *Explicit Dynamics – Mechanical*. Он позволил произвести расчеты давления пороховых газов с изменением массы пороховой навески.

Рассмотрим подробнее построение объемных моделей с использованием комплекса САПР *SolidWorks*. Построение модели патрона представим на примере 7,62 мм патрона образца 1943 г. с пулей со стальным сердечником [1]. Рассмотрение начнем с построения пули с оболочкой. Для начала была выбрана плоскость, в которой построен эскиз с применением набора инструментов, представленных на рабочей панели (рис. 1,а).

Используя инструмент «Повернутая бобышка», развернем эскиз вокруг созданной оси на 360° (рис. 1,б). Из представленного списка выберем материал с необходимыми характеристиками для придания физико-химических свойств элементу патрона. Законченная трехмерная модель пули с геометрическими размерами представлена на рис. 1,в.

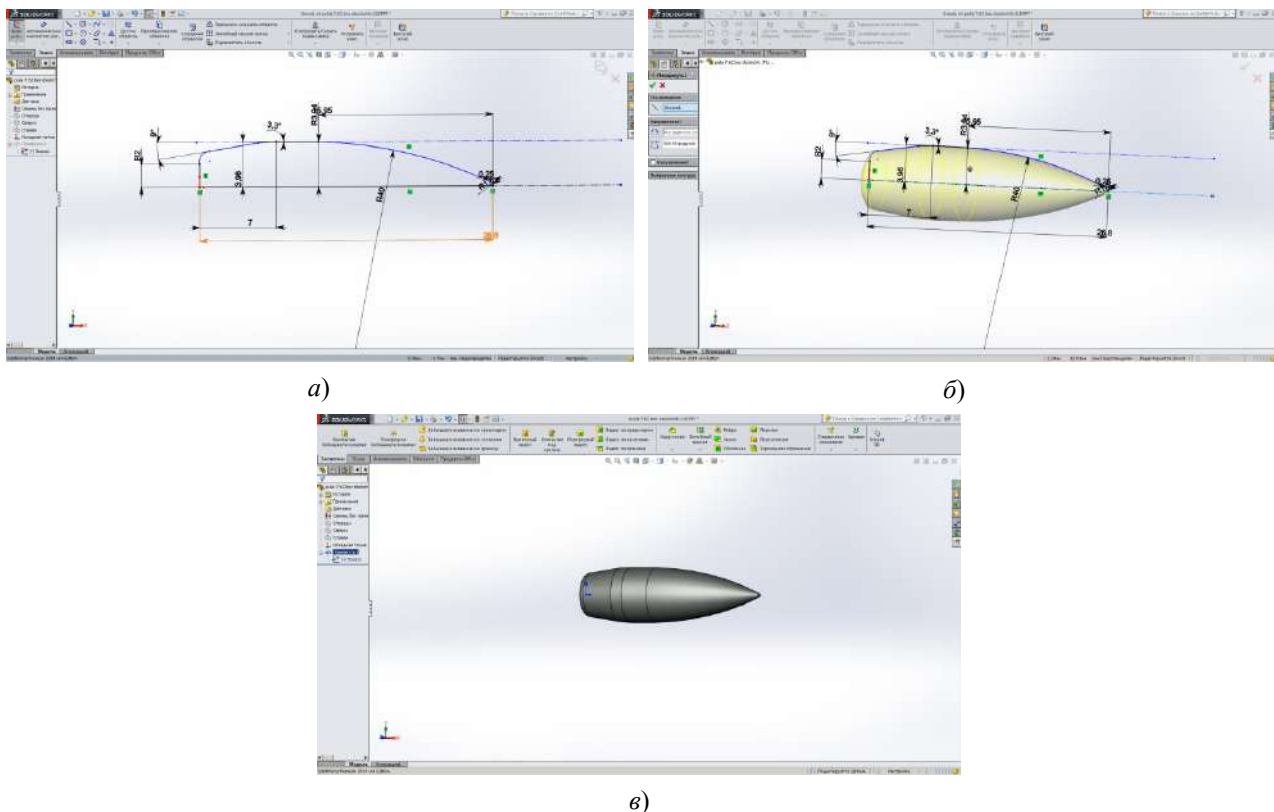
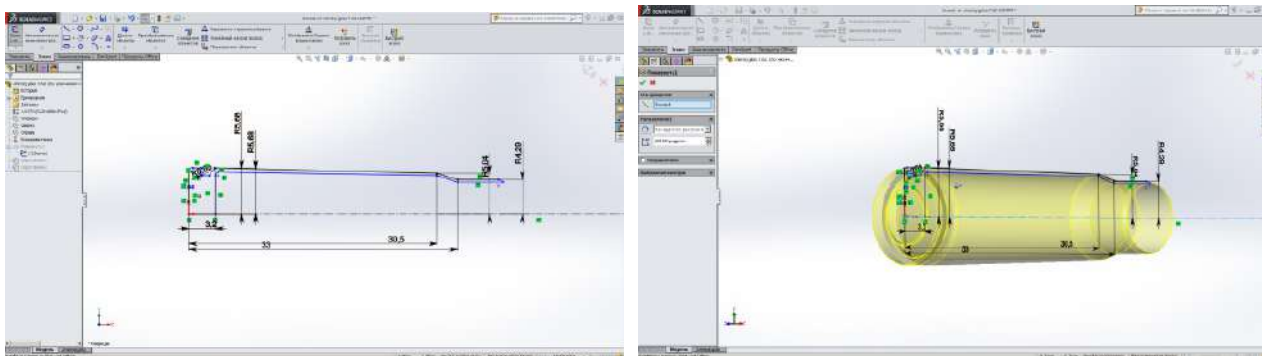


Рис. 1. Построение трехмерной модели пули:
а – построение эскиза пули; б – разворот эскиза пули вокруг оси X ; в – трехмерная модель 7,62 мм пули

Построение трехмерной модели гильзы производим по аналогичному алгоритму (рис. 2).

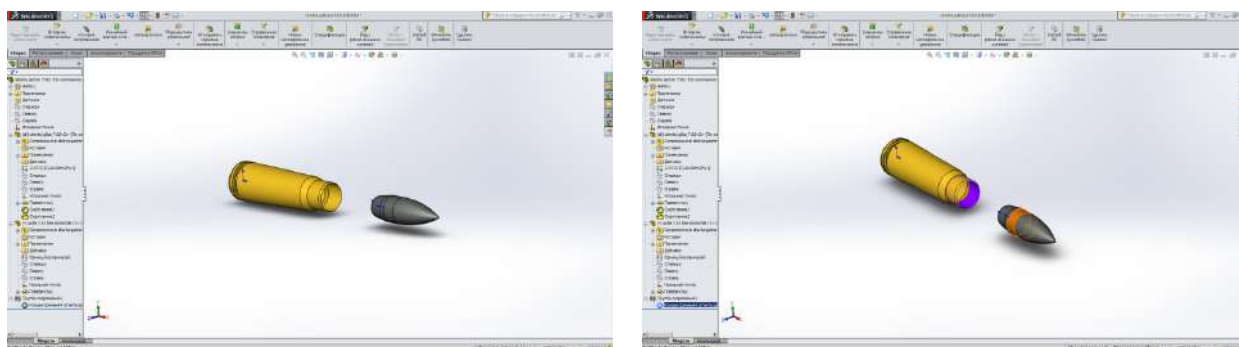


а)

б)

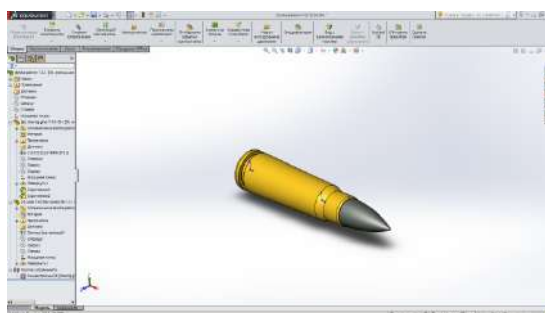
Рис. 2. Построение трехмерной модели гильзы:
а – построение эскиза гильзы; б – разворот эскиза гильзы вокруг оси X

Далее для последующих расчетов необходимо создать патрон в сборе. С целью выполнения подготовительных мероприятий была создана сборка, в которую добавлены спроектированные трехмерные модели пули и гильзы (рис. 3,а).



а)

б)



в)

Рис. 3. Моделирование сборки патрона:
а – добавление в сборку элементов; б – выбор поверхностей для контактного сопряжения; в – вид сборки после сопряжения

Соединение элементов сборки подразумевает выбор мест сопряжения всех его элементов, т.е. были произведены следующие действия: выбраны контактирующие поверхности, произведено выравнивание элементов относительно осей координат и заданы конкретные размеры смещения одной модели относительно другой (рис. 3,б). Выбираем «Концентричное сопряжение», задаем условия соосности двух деталей. В результате получили трехмерную сборку – модель 7,62 мм патрона образца 1943 г. (рис. 3,в).

Для расчета системы построим ствол. Принцип его построения коренным образом отличается от приведенного выше алгоритма. Все моделирование производилось строго по чертежам, которые представлены в альбомах на данный образец стрелкового оружия.

Моделирование ствола производим с использованием инструмента «Вытянутая бобышка». Построение начинаем с казенной части ствола. На выбранной плоскости в точке начала координат (для удобства дальнейшей работы с моделью) отображаем эскиз – окружность с радиусом, равным наружному размеру сечения казенной части ствола, указанного на чертеже (рис. 4,а). Окружность вытягиваем вдоль оси Z на расстояние до уменьшения диаметра ствола, указанного на чертеже (рис. 4,б).

Следом в торцевой части построенного цилиндра подобным образом создается еще один цилиндрический элемент, но с размерами, соответствующими данному участку на чертеже (рис. 4,в) и так далее, до выполнения размера длины ствола, установленного чертежом (рис. 4,г). По окончании построения цилиндрических частей началась обработка фасок, кромок и скруглений по требованиям чертежа (рис. 4,д). Построение канала ствола начнем с концентричного цилиндрического выреза в смоделированной детали (рис. 4,е,ж). Аналогичным способом построены все конические сужения и расширения в стволе (рис. 4,и).

Для создания нарезов в канале ствола был использован инструмент «Спираль». Для правильного создания им нарезов необходимых геометрических размеров был выбран диаметр окружности спирали и ее шаг (рис. 4,к). Для наиболее точных расчетов при моделировании формы нарезов должны соответствовать представленным на чертеже. Соблюдая эти условия, по размерам реальных нарезов на дополнительной справочной плоскости был построен режущий элемент. Он, в свою очередь, фиксировался на вершине спирали. При прохождении эскиза по данной кривой элементы ствола, находящиеся на его пути, исключались из модели. Для этого используем команду «Вырез по направлению» (рис. 4,л).

Так как по окончании этой операции не было изготовлено требуемое количество нарезов, то, чтобы сократить время на моделирование их режущих инструментов, был применен инструмент «круговой массив» (рис. 4,м). Он позволил на справочной окружности через определенное количество градусов повторить проектируемый элемент ствола необходимое количество раз.

Конечный этап моделирования ствола включает выбор сплава и придание ему требуемых физико-химических свойств и характеристик, чтобы их применить в дальнейших расчетах. Общий вид ствола представлен на рис. 4,н.

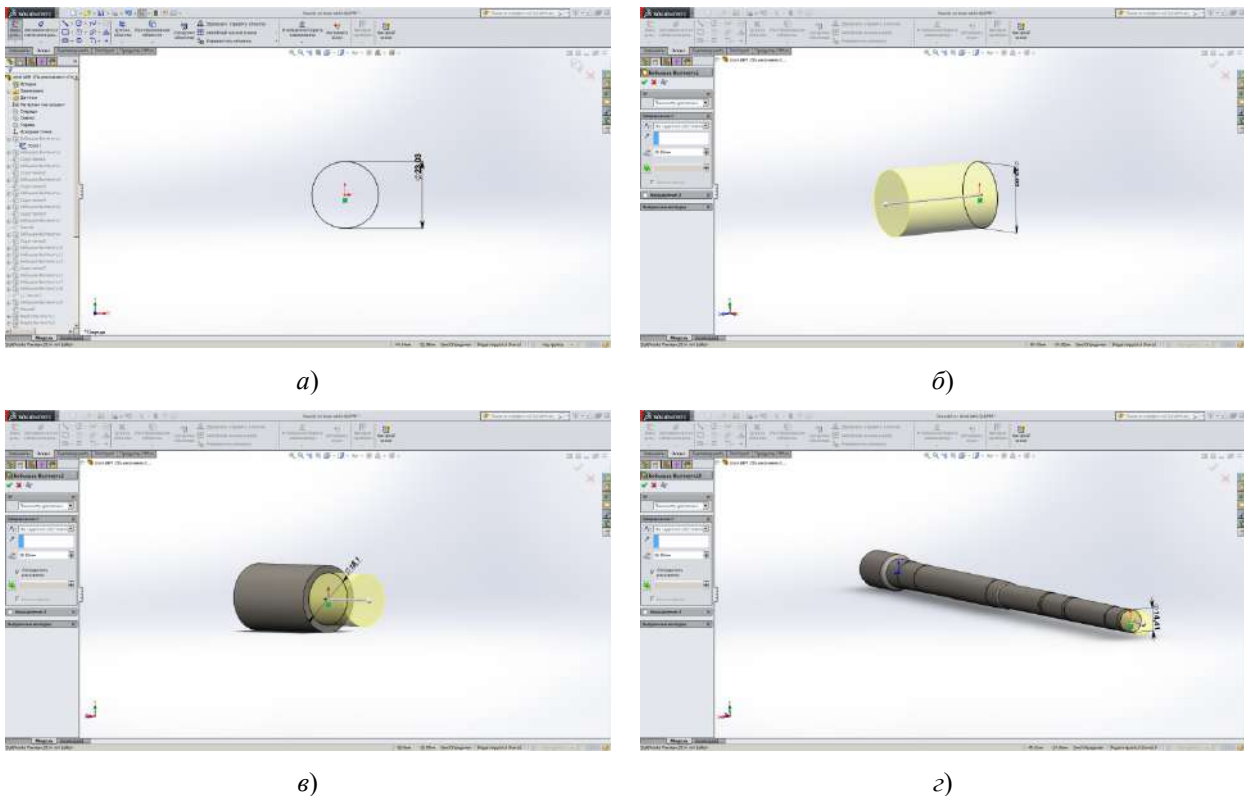
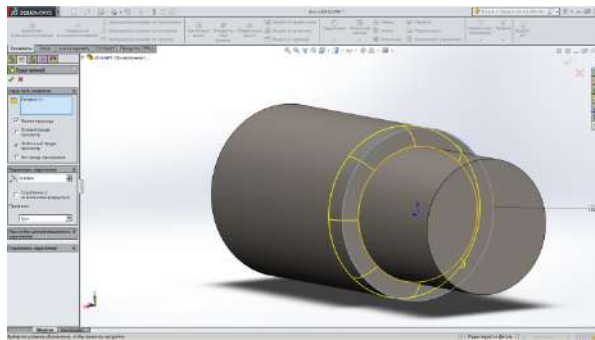
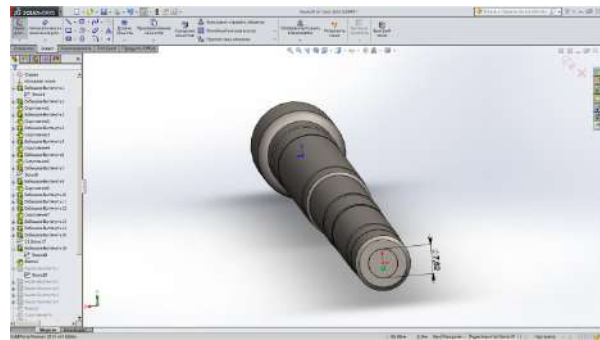


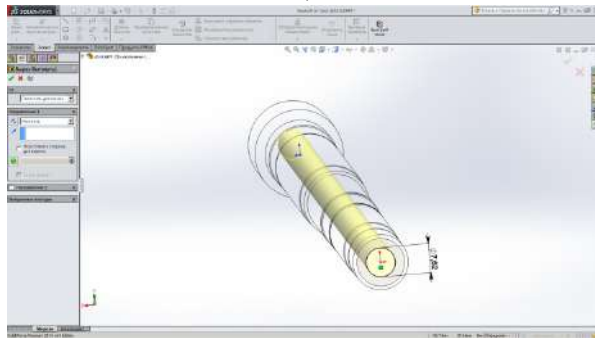
Рис. 4. Построение ствола: а – построение окружности с диаметром, равным размерам наружного сечения казенной части; б – вытягивание окружности вдоль оси. Построение цилиндрической заготовки казенной части ствола; в – построение последующих цилиндров; г – общий вид заготовки трехмерной модели ствола (начало)



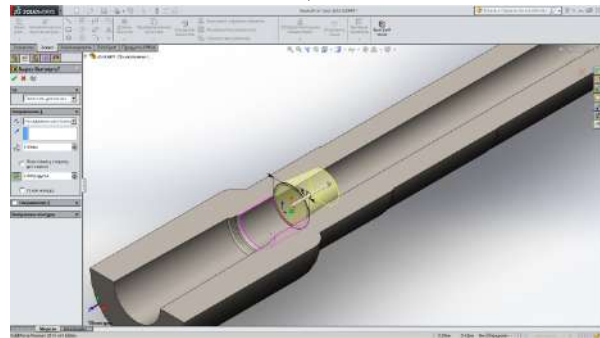
д)



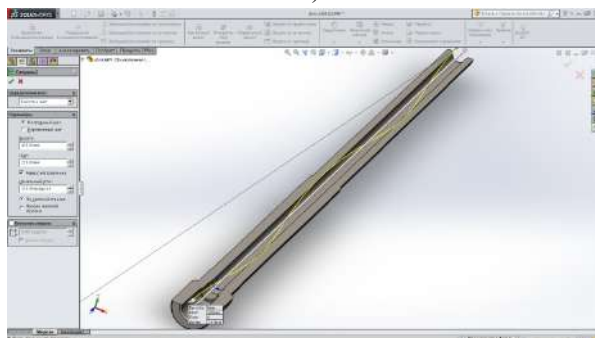
е)



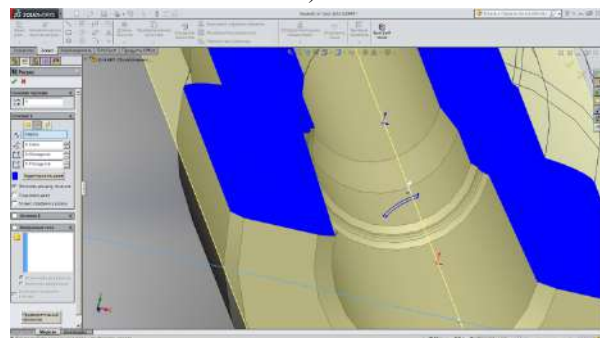
ж)



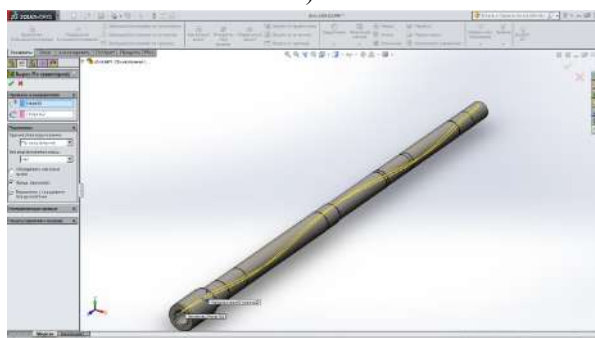
и)



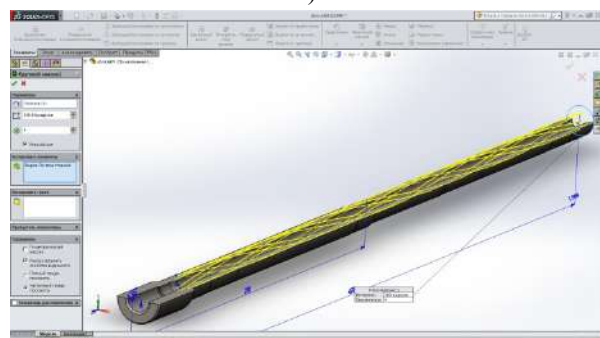
к)



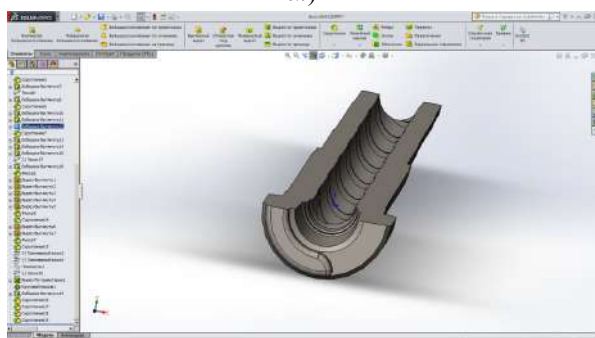
л)



м)



н)



п)

Рис. 4. Построение ствола: д – построение технологических скруглений; е – подготовка к моделированию сквозного отверстия; ж – отверстие в стволе, заготовка под канал ствола; и – изготовление конических сужений в казенной части; к – подготовка к моделированию нарезов в стволе; л – моделирование формы режущей поверхности; м – определение шага и длины нарезов; н – моделирование количества нарезов; п – общий вид смоделированного ствола с сечением в плоскости осей X, Z (окончание)

Следующим этапом при моделировании стало сопряжение спроектированных моделей патрона и ствола в декартовой системе координат. По аналогии со сборкой патрона выбираем поверхности для концентричного сопряжения. Здесь ими явились цилиндрические поверхности пули и патронника канала ствола.

Условием для сопряжения является заход гильзы до касания стенок патронника, а пули – до касания нарезов в стволе (рис. 5).

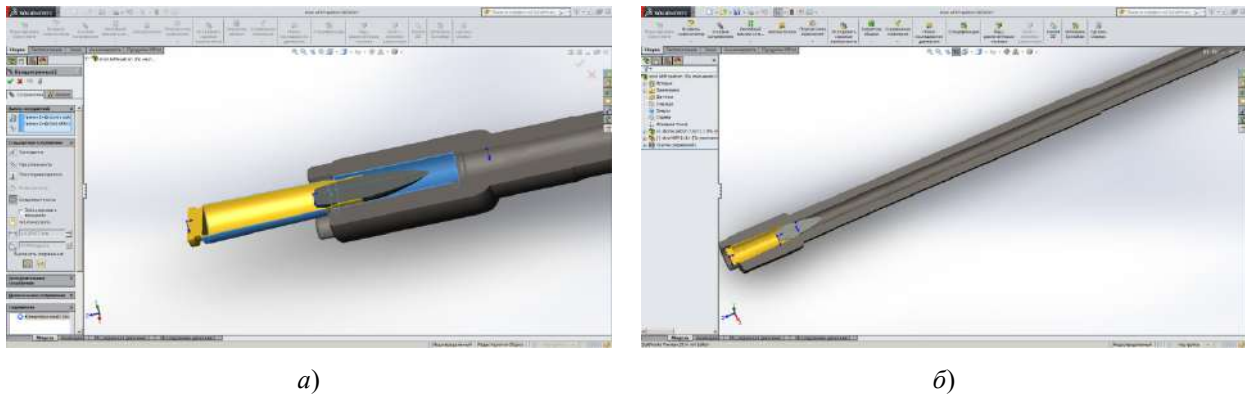


Рис. 5. Сборка патрона со стволом:
а – выбор поверхностей сопряжения; б – конечный вид сборки ствол–патрон

Модель «патрон – ствол» готова для использования в дальнейших расчетах в программном комплексе *ANSYS*. Программный комплекс *ANSYS* использовали для расчетов, связанных с механикой и газодинамикой. Рассмотрим подробнее процесс ввода начальных условий и их дальнейшего решения [2].

Первым делом поставили задачу, выбрали данные, требуемые для дальнейших расчетов, а это: приложение в комплексе, которое необходимо для решения расчетов (выбрали *Explicit Dynamics – Mechanical*); материал для каждого элемента трехмерной модели (при расчетах используются физико-химические характеристики заданного материала). Для дальнейших расчетов запускаем выбранное выше приложение. Задача ставилась на виртуальной рабочей поверхности. Общий вид представлен на рис. 6.

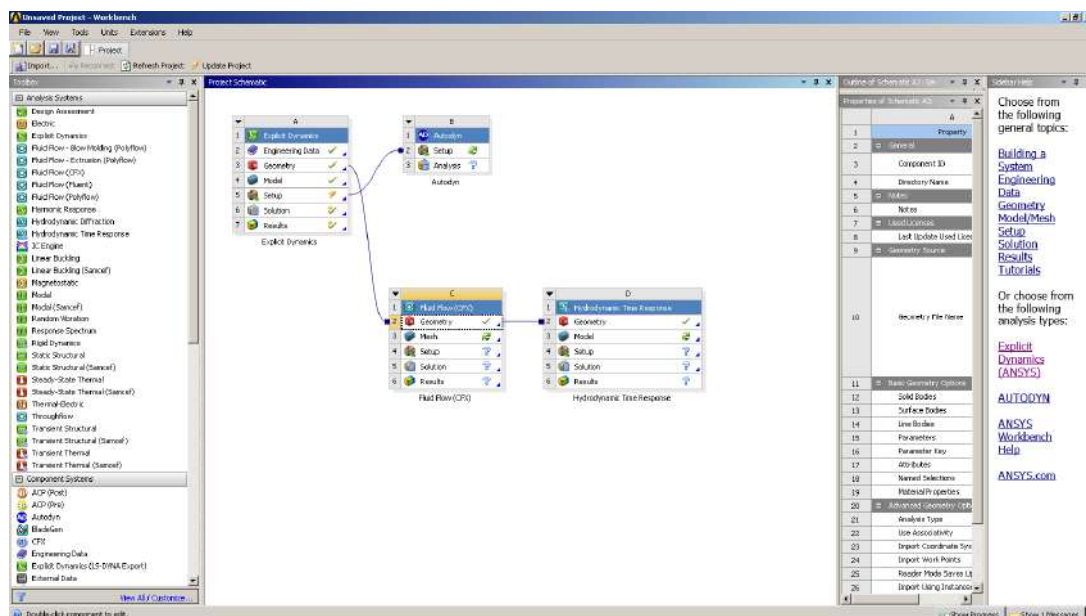


Рис. 6. Общий вид *Workbench*

Дальнейшая работа проводилась в приложении *Explicit Dynamics – Mechanical*, куда была загружена спроектированная модель (рис. 7,а). Здесь у каждого элемента было проверено соответствие физико-химических свойств. Выбраны требуемые поверхности взаимодействия (рис. 7,б).

Зафиксированы элементы, которые при детонации способны перемещаться, но по условиям должны быть неподвижны (гильза, ствол). Задаем место и время детонации заряда (рис. 7,б). Выставляем время процесса (т.е. установили конкретное время окончания процесса, как правило, это не более одной секунды). Выбираем количество циклов повторения расчетов (заданное время процесса делится на равные интервалы, через которые будет производиться полный алгоритм расчетов). Создаем структурную сетку каждого элемента (рис. 7,г).

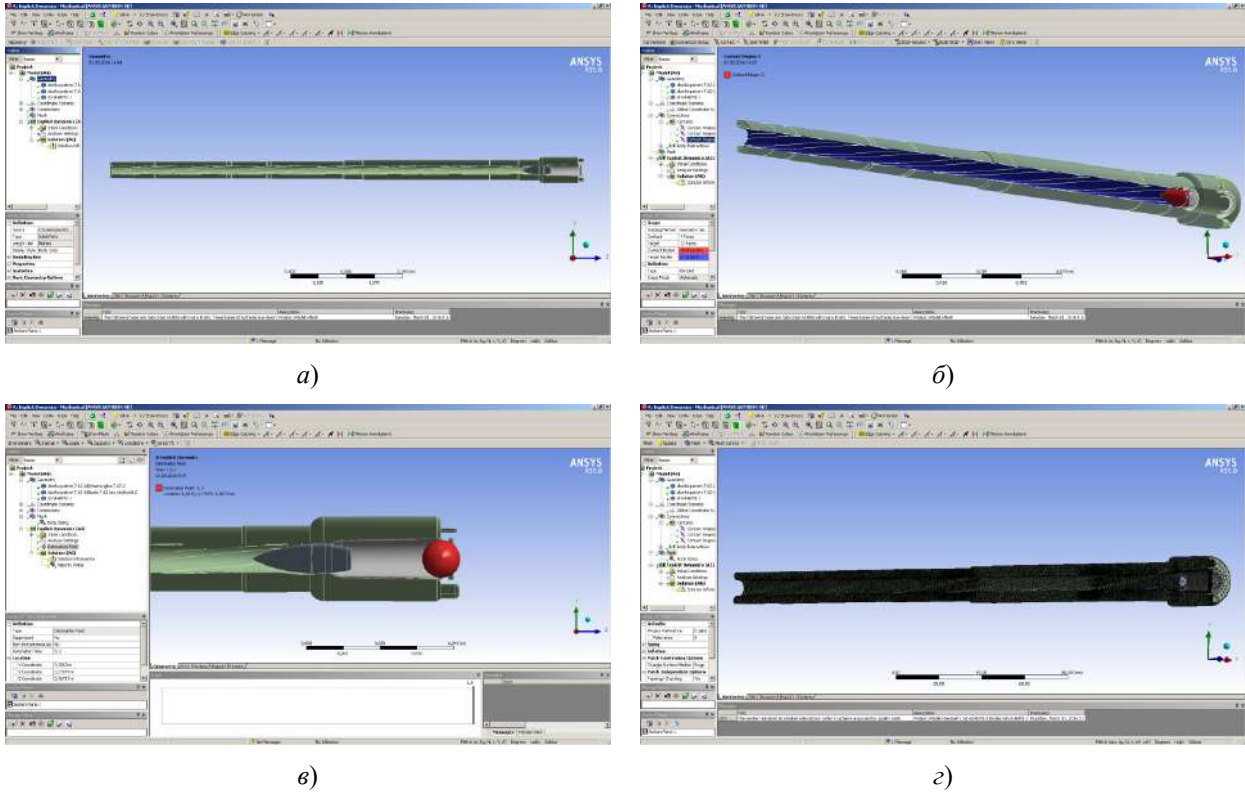


Рис. 7. *Explicit Dynamics – Mechanical*. Постановка задачи, подготовительные мероприятия: а – рабочее окно приложения *Explicit Dynamics – Mechanical* с экспортированной трехмерной моделью; б – выбор поверхностей взаимодействия; в – определение места и времени детонации; г – построение сетки каждого элемента модели

Каждый отдельный элемент в сетке представляет собой фигуру с восемью вершинами. Вычисления пластических деформаций приведены ниже. Плоскости, которые составляют равные углы с каждым из главных направлений расчетов, называем октаэдрическими плоскостями [3]. Касательное напряжение на этой плоскости определяется по формуле [4]

$$\tau_{oct} = \sqrt{\frac{2J_2}{3}}, \quad (1)$$

где второй инвариант напряжений девиаторов определяется по формуле

$$J_2 = \frac{1}{6} [(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{11} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2], \quad (2)$$

где σ_{ij} – общие тензоры напряжений в ij направлениях.

Направления 11, 22 и 33 являются основными напряжениями по направлениям. По вон Мизесу [4] критическое значение критерия текучести области при чистом сдвиге октаэдрической плоскости определяем

$$\tau_{oct} = \sqrt{\frac{2}{3}} k, \quad (3)$$

где k – предел текучести в чистом сдвиге.

Соответственно, критерий текучести выражаем как

$$f(J_2) = J_2 - k^2 = 0. \quad (4)$$

При выполнении этого условия будут происходить условия одноосного растяжения тела, когда

$$\sigma_1 = \sigma_y, \sigma_2 = \sigma_3 = 0. \quad (5)$$

Подставим эти значения в приведенные выше уравнения и получим одноосное напряжение текучести:

$$\sigma_y = \sqrt{3}k = \sqrt{3J_2}. \quad (6)$$

Напряженное состояние проверяется критерием текучести. Если критерий текучести превышен, то приращение эффективной пластической деформации вычисляется следующим образом:

$$\Delta \epsilon_{eff}^p = \frac{\sqrt{3J_2} - \sigma_y}{3G}. \quad (7)$$

Эффективная пластическая деформация является комплексным значением этих приращений и рассчитывается

$$\epsilon_{eff}^p = \int \Delta \epsilon_{eff}^p dt. \quad (8)$$

Эффективная интенсивная пластическая деформация определяется по формуле

$$\epsilon_{eff}^p = \frac{\Delta \epsilon_{eff}^p}{\Delta t}, \quad (9)$$

где Δt – текущее время.

Эффективная деформация определяется по формуле

$$\Delta \epsilon_{eff} = \int \Delta \epsilon_{eff} dt, \quad (10)$$

где

$$\Delta \epsilon_{eff} = \Delta t \left[\frac{2}{3} (\epsilon_{xx}^2 + \epsilon_{yy}^2 + \epsilon_{zz}^2 + \epsilon_{xy}^2 + \epsilon_{yz}^2 + \epsilon_{zx}^2) \right]^{\frac{1}{2}},$$

здесь ϵ_{ij} – общий тензор деформации в направлении ij , которое включает в себя упругую и пластическую составляющие.

Основное уравнение движения решается с помощью неявного переходного динамического анализа:

$$m \ddot{x} + c \dot{x} + kx = F(t), \quad (11)$$

где m – масса матрицы; c – матрица демпфирования; k – матрица жесткости; $F(t)$ – вектор нагрузки [5].

В любой момент времени t эти уравнения можно рассматривать как совокупность «статических» уравнений равновесия, которые также учитывают силы инерции и силы демпфирования. Используем метод интеграции, чтобы решить эти уравнения в дискретные моменты времени. Отрезок времени между последовательными точками называется временным шагом интегрирования. При решении дифференциальных уравнений должен быть произведен анализ динамики с определением массы, импульса и энергии в Лагранжевых координатах [6]. Это совместно с материалом модели и набор начальных и граничных условий определяет комплексное решение.

Для лагранжевой формулировки данной задачи в настоящее время используются уравнения динамики, в которых сетка перемещается и деформируется с материалом модели, сохраняя массу. Плотность в любой момент времени можно определить с помощью текущего объема зоны и ее начальной массы:

$$\frac{\rho_0 V_0}{V} = \frac{m}{V}. \quad (12)$$

Дифференциальные уравнения в частных производных выражаем через импульс сохранения энергии относительно ускорений для тензора напряжений σ_{ij} :

$$\rho \dot{x} = b_x + \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z};$$

$$\rho \dot{y} = b_y + \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial z};$$

$$\rho \dot{z} = b_z + \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z}.$$

Импульс сохранения энергии выражаем через

$$\dot{e} = \frac{1}{\rho} (\sigma_{xx} \dot{\epsilon}_{xx} + \sigma_{yy} \dot{\epsilon}_{yy} + \sigma_{zz} \dot{\epsilon}_{zz} + 2\sigma_{xx} \dot{\epsilon}_{xx}). \quad (13)$$

Эти уравнения решаются отдельно для каждого элемента в модели на основе входных значений на конец предыдущего временного шага. Малые интервалы времени используются для обеспечения устойчивости и точности решения. Берутся результаты из предыдущего момента времени для того, чтобы предсказать результаты в следующий момент времени. Требования для итерации не предъявляем [7].

При постановке задач и использовании уравнений динамики постоянными оставляем массу, количество движения и величину энергии. Только масса и импульс сохранения энергии остаются неизменными. Энергия накапливается с течением времени в узловых точках. Ее сохранение контролируется в процессе решения.

Заключение

Таким образом, при проведении моделирования с использованием программных комплексов системы автоматизированного проектирования на этапе проектирования рассчитываются оптимальные технические характеристики стрелкового оружия с целью повышения эффективности его действия.

Список литературы

1. Горов Э. А. Основания проектирования автоматического оружия: дополнительные главы к основному курсу. М. : Изд-во Артиллерийской инженерной академии, 1955. 195 с.
2. Басов К. А. ANSYS справочник пользователя. М. : Изд-во ДМК-Пресс, 2005. 640 с.
3. Захарынков В. Ф. [и др.]. Биомеханика системы «стрелок – оружие» и эффективность стрельбы. СПб : Балтийский государственный технический университет ; М. : Московский гос. техн. ун-т им. Н. Э. Баумана, 2013. 159 с.
4. Партон В. З. Механика разрушения. Теория и практика. М. : УРСС, 2007. 240 с.
5. Литвинов А. Н., Юрков Н. К. Моделирование напряженно-деформированного состояния в слоистых структурах РЭС при технологических и эксплуатационных воздействиях // Надежность и качество сложных систем. 2013. № 3. С. 16–22.
6. Морозов Е. М., Никишков Г. П. Метод конечных элементов в механике разрушения. М. : УРСС, 2008. 256 с.
7. Хади О. Ш., Литвинов А. Н. Моделирование состояния гетерогенных структур для повышения безопасности сложных технических систем в процессе их жизненного цикла // Надежность и качество сложных систем. 2014. № 3. С. 8–15.

References

1. Gorov E.A. *Osnovaniya proektirovaniya avtomaticheskogo oruzhiya: dopolnitel'nye glavy k osnovnomu kursu* = *Fundamentals of designing automatic weapons: additional chapters to the basic course*. Moscow: Izd-vo Artilleriyskoy inzhenernoy akademii, 1955:195. (In Russ.)
2. Basov K.A. *ANSYS spravochnik pol'zovatelya* = *ANSYS user's guide*. Moscow: Izd-vo DMK-Press, 2005:640. (In Russ.)

3. Zakharynkov V.F. et al. *Biomekhanika sistemy «strelok – oruzhie» i effektivnost' strel'by = Biomechanics of the "shooter – weapon" system and firing efficiency*. Saint Petersburg: Baltiyskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiy universitet; Moscow: Moskovskiy gos. tekhn. un-t im. N.E. Bauman, 2013:159. (In Russ.)
4. Parton V.Z. *Mekhanika razrusheniya. Teoriya i praktika = Mechanics of destruction. Theory and practice*. Moscow: URSS, 2007:240. (In Russ.)
5. Litvinov A.N., Yurkov N.K. Modeling of the stress-strain state in layered structures of RES under technological and operational impacts. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2013;(3):16–22. (In Russ.)
6. Morozov E.M., Nikishkov G.P. *Metod konechnykh elementov v mekhanike razrusheniya = Finite element method in fracture mechanics*. Moscow: URSS, 2008:256. (In Russ.)
7. Khadi O.Sh., Litvinov A.N. Modeling of the state of heterogeneous structures to improve the safety of complex technical systems during their life cycle. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2014;(3):8–15. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Алексей Александрович Громов

соискатель ученой степени кандидата технических наук,
курсовой офицер – преподаватель
факультета ракетно-артиллерийского вооружения,
Филиал Военной академии
материально-технического обеспечения
имени генерала армии А. В. Хрулева в г. Пензе
(Россия, г. Пенза, Военный городок)
E-mail: darkzgrom@gmail.com

Aleksey A. Gromov

Candidate of the academic degree
of candidate of technical sciences,
course officer – teacher of the faculty
of rocket and artillery armament,
Branch of the Military Academy of Logistics
named after Army General A.V. Khrulev in Penza
(Voenny gorodok, Penza, Russia)

Юрий Викторович Чебурков

кандидат технических наук, старший преподаватель
кафедры средств ближнего боя,
Филиал Военной академии
материально-технического обеспечения
имени генерала армии А. В. Хрулева в г. Пензе
(Россия, г. Пенза, Военный городок)
E-mail: yuseburkov@mail.ru

Yuriy V. Cheburkov

Candidate of technical sciences, senior lecturer
of the sub-department of melee weapons,
Branch of the Military Academy of Logistics
named after Army General A.V. Khrulev in Penza
(Voenny gorodok, Penza, Russia)

Анатолий Иванович Годунов

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры автоматики и телемеханики,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: godunov@pnzgu.ru

Anatoly I. Godunov

Doctor of technical sciences, professor,
professor of the sub-department
of automatics and telemechanics,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, 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 27.02.2023

Поступила после рецензирования / Revised 30.03.2023

Принята к публикации / Accepted 04.05.2023

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ПРИБЛИЖЕНИЕ РЕШЕНИЙ УРАВНЕНИЙ МЕТОДА МАТЕМАТИЧЕСКОГО ПРОТОТИПИРОВАНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПУТЕМ КАЧЕСТВЕННОГО АНАЛИЗА ЭТИХ УРАВНЕНИЙ

И. Е. Старостин¹, А. А. Дружинин²

^{1,2} Московский государственный технический университет гражданской авиации, Москва, Россия
¹ starostinigo@yandex.ru, ² alexs20017@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Решение задачи выбора оптимальных параметров, а также диагностики и прогнозирования технического состояния компонентов авиационного оборудования обуславливает необходимость построения моделей таких компонентов. На вход моделей подаются измеряемые характеристики, а на выходе получаются контролируемые характеристики. Авторами был предложен метод математического прототипирования энергетических процессов, позволяющих строить адекватные математические модели (не противоречащие общим физическим законам) динамики физических и химических процессов различной природы. Затем эти уравнения преобразовываются к моделям, непосредственно используемым для решения упомянутых практических задач. Для упрощения вычислений необходимо корректное задание аналитического приближения решений дифференциальных уравнений метода математического прототипирования энергетических процессов. Это и обуславливает актуальность упомянутой задачи. *Материалы и методы.* В случае использования специальных методов решения системы дифференциальных уравнений необходимо задать приближенное аналитическое выражение решения (общего или частного) искомой системы, коэффициенты которого определяются из системы уравнений. Аналитическое приближение решения систем дифференциальных уравнений метода математического прототипирования энергетических процессов базируется на концепции стремления системы к некоторому стационарному состоянию, изменяющемуся в результате обратной связи. *Результаты.* Предложенная методика задания аналитического приближения решений уравнений метода математического прототипирования энергетических процессов дает возможность задания класса корректных математических моделей (не противоречащих общим физическим законам, а также особенностям протекания физических и химических процессов в конкретной рассматриваемой системе) различных компонентов авиационного оборудования. В таком классе строятся модели (методами теории идентификации, машинного обучения и т.д.) с наименьшими вычислительными затратами. *Выводы.* Качественный анализ уравнений метода математического прототипирования энергетических процессов дает возможность задания максимально суженного класса математических моделей, в котором строится адекватная математическая модель требуемой точности произвольной системы с наименьшими вычислительными затратами.

Ключевые слова: метод математического прототипирования энергетических процессов, интегрирование дифференциальных уравнений, машинное обучение

Для цитирования: Старостин И. Е., Дружинин А. А. Аналитическое приближение решений уравнений метода математического прототипирования энергетических процессов путем качественного анализа этих уравнений // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 2. С. 22–31. doi:10.21685/2307-4205-2023-2-3

ANALYTICAL APPROXIMATION OF SOLUTIONS OF EQUATIONS OF THE METHOD OF MATHEMATICAL PROTOTYPING OF ENERGY PROCESSES BY QUALITATIVE ANALYSIS OF THESE EQUATIONS

I.E. Starostin¹, A.A. Druzhinin²

Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia
¹ starostinigo@yandex.ru, ² alexs20017@mail.ru

Abstract. *Background.* Solving the problem of choosing the optimal parameters, as well as diagnosing and predicting the technical condition of aircraft equipment components, necessitates the construction of a model of this components. At the input of the models, the measured characteristics are fed, and the controlled characteristics are obtained at the output. The authors proposed a method of mathematical prototyping of energy processes, allowing to build adequate mathematical models (which do not contradict the general physical laws) of the dynamics of physical and chemical

processes of various nature. Then these equations are converted to models that are directly used to solve the mentioned practical problems. To simplify calculations, it is necessary to correctly set the analytical approximation of solutions to differential equations of the method of mathematical prototyping of energy processes. This determines the urgency of the mentioned problem. *Materials and methods.* In the case of using special methods for solving a system of differential equations, it is necessary to specify an approximate analytical expression for the solution (general or particular) of the system being solved, the coefficients of which are determined from the system of equations being solved. The analytical approximation of the solution of systems of differential equations of the method of mathematical prototyping of energy processes is based on the concept of the system tending to some stationary state, which changes as a result of feedback. *Results.* The proposed method for setting the analytical approximation of solutions to the equations of the method of mathematical prototyping of energy processes makes it possible to set a class of correct mathematical models (which do not contradict the general physical laws, as well as the features of the flow of physical and chemical processes in a particular system under consideration) of various components of aviation equipment. In such a class, models are built (methods of identification theory, machine learning, etc.) with the lowest computational costs. *Conclusions.* Qualitative analysis of the equations of the method of mathematical prototyping of energy processes makes it possible to specify the most narrowed class of mathematical models, in which an adequate mathematical model of the required accuracy of an arbitrary system is built with the lowest computational costs.

Keywords: method of mathematical prototyping of energy processes, integration of differential equations, machine learning

For citation: Starostin I.E., Druzhinin A.A. Analytical approximation of solutions of equations of the method of mathematical prototyping of energy processes by qualitative analysis of these equations. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2023;(2):22–31. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2023-2-3

Введение

Построение математических моделей технических систем, в том числе и компонентов авиационного оборудования, имеет важное значение для решения задач проектирования и эксплуатации систем [1–4]. На вход таких моделей систем подаются измеряемые характеристики, параметры режимов работы, а на выходе получаем контрольные характеристики исследуемого объекта, необходимые для решения упомянутых практических задач [1–4].

Для построения упомянутых моделей систем авторами был предложен метод математического прототипирования энергетических процессов, в основу которого положены методы механики теории электрических и магнитных цепей, электродинамики, современной неравновесной термодинамики [5–8]. Предложенный метод представляет собой систему дифференциальных уравнений, численное решение которой универсальными (шаговыми) методами трудоемко [9]. Этому недостатка лишены специальные методы решения [9], основанные на аналитическом задании решений таких систем [9]. Аналитическое задание решения должно вбирать в себя особенности динамики, моделируемой решаемой системой дифференциальных уравнений [9]. Настоящая работа посвящена специальным методам решения уравнений динамики процессов, полученных методом математического прототипирования.

Материалы и методы

Система уравнений метода математического прототипирования энергетических процессов имеет вид [5]

$$\frac{d\bar{x}(t)}{dt} = \mathbf{B}(\bar{x}(t), \mathbf{U}(t), \mathbf{p}) \frac{\delta\Delta x(t)}{dt} + \left(\frac{d\bar{x}(t)}{dt} \right)_{ext}, \quad (1)$$

$$\frac{\delta\Delta x(t)}{dt} = \Delta A(\bar{x}(t), \mathbf{U}(t), \mathbf{p}) \Delta X(\bar{x}(t), \mathbf{U}(t), \mathbf{p}), \quad (2)$$

$$\Delta X(\bar{x}, \mathbf{U}, \mathbf{p}) = \mathbf{B}^T(\bar{x}, \mathbf{U}, \mathbf{p}) \bar{X}(\bar{x}, \mathbf{U}, \mathbf{p}), \quad \bar{X}(\bar{x}, \mathbf{U}, \mathbf{p}) = -\nabla_{\bar{x}} F(\bar{x}, \mathbf{U}, \mathbf{p}), \quad (3)$$

$$\mathbf{r}(t) = \mathbf{g}_r(\bar{x}(t), \mathbf{U}(t), \mathbf{p}), \quad \mathbf{z}(t) = \mathbf{g}_z(\bar{x}(t), \mathbf{U}(t), \mathbf{p}), \quad (4)$$

где \bar{x} – параметры состояния системы; Δx – координаты процессов в системе; $\delta\Delta x(t)/dt$ – скорости протекания физико-математических процессов (ФХП) в системе; $\mathbf{B}(\bar{x}, \mathbf{U}, \mathbf{p})$ – топологическая матрица системы, определяемая структурой системы и процессами в ней, законами сохранения; $\left(\frac{d\bar{x}(t)}{dt} \right)_{ext}$

– внешние потоки в систему (и их случайная составляющая [5]); $\Delta X(\bar{x}, U, \mathbf{p})$ – внутренние возмущения, движущие процессы в системе; $\bar{X}(\bar{x}, U, \mathbf{p})$ – частные производные свободной энергии $F(\bar{x}, U, \mathbf{p})$ по параметрам состояния \bar{x} ; $\Delta A(\bar{x}, U, \mathbf{p})$ – положительно определенная диссипативная матрица (или неотрицательно определенная невырожденная матрица в случае наличия инерционностей в системе [5, 6]); U – параметры системы, меняющиеся только в результате внешних воздействий на нее; \mathbf{p} – индивидуальные параметры системы, меняющиеся от экземпляра к экземпляру системы конкретного типа; r, z – измеряемые и контролируемые характеристики системы соответственно. Параметры состояния \bar{x} могут быть как координатами состояния – параметрами состояния, приращение которых обусловлено только протеканием процессов одного конкретного класса [6–8], так и параметрами состояния, имеющими практический смысл [5].

Для получения системы уравнений (1)–(3) метода математического прототипирования в численном виде необходимо задать функциональные разложения для следующих величин [5–7]:

– топологической матрицы $\mathbf{B}(\bar{x}, U, \mathbf{p})$:

$$\mathbf{B}(\bar{x}, U, \mathbf{p}) = \mathbf{B}(\bar{X}(\bar{x}, U, \mathbf{p}), \tilde{\mathbf{B}}(\bar{x}, U, \mathbf{p})), \quad (5)$$

$$\tilde{\mathbf{B}}(\bar{x}, U, \mathbf{p}) = \tilde{\mathbf{B}}^{(0)}(\mathbf{h}_B(\bar{x}, U, \mathbf{p})) + \sum_{i=1}^{N_B} \tilde{\mathbf{B}}_i \left(\prod_{j=1}^m \frac{h_{B,i,j}^{n_{B,i,j}}(\bar{x}, U, \mathbf{p})}{n_{B,i,j}!} \right), \quad m = \dim(\bar{x}), \quad (6)$$

где $\tilde{\mathbf{B}}^{(0)}(\mathbf{h}_B(\bar{x}, U, \mathbf{p}))$ – базовая составляющая независимой составляющей $\tilde{\mathbf{B}}(\bar{x}, U, \mathbf{p})$ матрицы баланса, а функции $\mathbf{h}_B(\bar{x}, U, \mathbf{p})$ определяют довесочные составляющие матрицы баланса;

– диссипативной матрицы $\mathbf{A}(\bar{x}, U, \mathbf{p})$:

$$\Delta \mathbf{A}(\bar{x}, U, \mathbf{p}) = \Delta \mathbf{A}^{(0)}(\mathbf{h}_A(\bar{x}, U, \mathbf{p})) + \sum_{i=1}^{N_A} \Delta \tilde{\mathbf{A}}_i \left(\prod_{j=1}^m \frac{h_{A,i,j}^{n_{A,i,j}}(\bar{x}, U, \mathbf{p})}{n_{A,i,j}!} \right), \quad (7)$$

где положительно определенная (или невырожденная неотрицательно определенная в случае наличия в системе инерционности) матрица $\Delta \mathbf{A}^{(0)}(\mathbf{h}_A(\bar{x}, U, \mathbf{p}))$ – базовая составляющая диссипативной матрицы, а неотрицательные функции $\mathbf{h}_A(\bar{x}, U, \mathbf{p})$ определяют довесочные составляющие диссипативной матрицы;

– свободной энергии $F(\bar{x}, U, \mathbf{p})$ или ее частных производных $\bar{X}(\bar{x}, U, \mathbf{p})$ по параметрам состояния x :

$$F(\bar{x}, U, \mathbf{p}) = F^{(0)}(\mathbf{h}_F(\bar{x}, U, \mathbf{p})) + \sum_{i=1}^{N_F} \tilde{F}_i \left(\prod_{j=1}^m \frac{h_{F,i,j}^{n_{F,i,j}}(\bar{x}, U, \mathbf{p})}{n_{F,i,j}!} \right), \quad (8)$$

$$\bar{X}_k(\bar{x}, U, \mathbf{p}) = \bar{X}_k^{(0)}(\mathbf{h}_F(\bar{x}, U, \mathbf{p})) + \sum_{i=1}^{N_F} \tilde{F}_i \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\prod_{j=1}^m \frac{h_{F,i,j}^{n_{F,i,j}}(\bar{x}, U, \mathbf{p})}{n_{F,i,j}!} \right), \quad k = 1, m, \quad (9)$$

где $F^{(0)}(\mathbf{h}_F(\bar{x}, U, \mathbf{p}))$ – базовая составляющая свободной энергии, удовлетворяющая полному дифференциалу по \bar{x} функции $\bar{X}_k^{(0)}(\mathbf{h}_F(\bar{x}, U, \mathbf{p}))$, $k = 1, m$ – базовые составляющие частных производных свободной энергии, а функции $\mathbf{h}_F(\bar{x}, U, \mathbf{p})$ определяют довесочные составляющие свободной энергии.

В выражениях (6)–(9) постоянные матрицы $\tilde{\mathbf{B}}_i$, $i = 1, N_B$, неотрицательно определенные $\Delta \tilde{\mathbf{A}}_i$, $i = 1, N_A$ и постоянные коэффициенты \tilde{F}_i , $i = 1, N_F$, постоянные для всех объектов систем рассматриваемого бренда, определяются из экспериментальных данных. Нетрудно видеть, что задаваемые в виде выражения (9) функциональные разложения частных производных $\bar{X}(\bar{x}, U, \mathbf{p})$ свободной энергии $F(\bar{x}, U, \mathbf{p})$, вытекающие из выражения (8), гарантированно удовлетворяют условию полного

дифференциала, что гарантирует существование функции свободной энергии $F(\bar{\mathbf{x}}, U, \mathbf{p})$. В уравнениях (1), (5), (6) защиты законы сохранения [6]. Также задаваемое (7) функциональное разложение диссипативной матрицы $\Delta\mathbf{A}(\bar{\mathbf{x}}, U, \mathbf{p})$ гарантирует ее положительную определенность (или неотрицательную определенность и невырожденность в случае наличия в системе инерционности) [5, 6]. Отсюда из уравнений (1)–(3) вытекает удовлетворяемость (1)–(7), (9) второму началу термодинамики [5, 6].

Также в функциональные разложения (6), (7), (9) могут быть заложены особенности протекания процессов в конкретной системе [5, 7]. Функциональные разложения (6), (7), (9), построенные в соответствии с теоремой Вейерштрасса о равномерном приближении функции полиномами [5, 7, 10], дают возможность строить в соответствии с (1)–(7), (9) сколь угодно точные функции состояния для соответствующих величин. Таким образом, модели (1)–(7), (9) являются корректными и могут быть построены из экспериментальных данных с требуемой точностью [5–7].

Для качественного анализа динамики представим координаты состояния $\bar{\mathbf{x}} = (\mathbf{x}^T, U, \mathbf{y}^T)^T$ в виде совокупности не зависимых параметров состояния (не связанных законами сохранения с параметрами баланса \mathbf{P}) \mathbf{X} и зависимых параметров состояния \mathbf{y} , связанных с \mathbf{X} и \mathbf{P} законами сохранения [5, 6]:

$$\mathbf{y} = \mathbf{y}(\mathbf{x}, \mathbf{P}, U, \mathbf{p}). \quad (10)$$

Затем, представив топологическую матрицу $\mathbf{B}(\bar{\mathbf{x}}, U, \mathbf{p})$ и $(d\bar{\mathbf{x}}(t)/dt)_{ext}$ в виде

$$\mathbf{B}(\bar{\mathbf{x}}, U, \mathbf{p}) = (\mathbf{B}_x^T(\mathbf{x}, \mathbf{y}, U, \mathbf{p}) \quad \mathbf{B}_y^T(\mathbf{x}, \mathbf{y}, U, \mathbf{p}))^T, \quad (11)$$

$$\left(\frac{d\bar{\mathbf{x}}(t)}{dt} \right)_{ext} = \left(\left(\frac{d\mathbf{x}^T(t)}{dt} \right)_{ext} \quad \left(\frac{d\mathbf{y}^T(t)}{dt} \right)_{ext} \right)^T, \quad (12)$$

система уравнений (1) представляется в виде [6]

$$\frac{d\mathbf{x}(t)}{dt} = \mathbf{B}_x(\mathbf{x}(t), \mathbf{y}(t), U(t), \mathbf{p}) \frac{\delta\Delta\mathbf{x}(t)}{dt} + \left(\frac{d\mathbf{x}(t)}{dt} \right)_{ext}, \quad (13)$$

$$\frac{d\mathbf{y}(t)}{dt} = \mathbf{B}_y(\mathbf{x}(t), \mathbf{y}(t), U(t), \mathbf{p}) \frac{\delta\Delta\mathbf{x}(t)}{dt} + \left(\frac{d\mathbf{y}(t)}{dt} \right)_{ext}. \quad (14)$$

Учитывая, что в случае отсутствия внешних потоков в систему ее параметры баланса \mathbf{P} неизменны, для внутренних возмущений $\mathbf{X}(\mathbf{x}, \mathbf{P}, U, \mathbf{p})$, сопряженных независимым параметрам состояния \mathbf{X} , определяемых с учетом уравнения законов сохранения (10) в силу [6]:

$$\mathbf{X}(\mathbf{x}, \mathbf{P}, U, \mathbf{p}) = -\nabla_{\mathbf{x}} F(\mathbf{x}, \mathbf{y}(\mathbf{x}, \mathbf{P}, U, \mathbf{p}), U, \mathbf{p}), \quad (15)$$

имеем с учетом уравнений сохранения и в силу независимости вариаций $\delta\Delta\mathbf{x}$ [6]:

$$\mathbf{B}_x^T(\mathbf{x}, \mathbf{y}(\mathbf{x}, \mathbf{P}, U, \mathbf{p}), U, \mathbf{p}) \mathbf{X}(\mathbf{x}, \mathbf{P}, U, \mathbf{p}) = \Delta\mathbf{X}(\mathbf{x}, \mathbf{y}(\mathbf{x}, \mathbf{P}, U, \mathbf{p}), U, \mathbf{p}). \quad (16)$$

Учитывая, что параметры баланса могут меняться только в результате внешних потоков, имеем [11]

$$\mathbf{J}_{\mathbf{P}, \mathbf{x}}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, U, \mathbf{p}) \mathbf{B}_x(\mathbf{x}, \mathbf{y}, U, \mathbf{p}) + \mathbf{J}_{\mathbf{P}, \mathbf{y}}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, U, \mathbf{p}) \mathbf{B}_y(\mathbf{x}, \mathbf{y}, U, \mathbf{p}) = 0,$$

где $\mathbf{J}_{\mathbf{P}, \mathbf{x}}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, U, \mathbf{p})$, $\mathbf{J}_{\mathbf{P}, \mathbf{y}}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, U, \mathbf{p})$ – матрицы Якоби функции параметров баланса $\mathbf{P} = \mathbf{P}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, U, \mathbf{p})$, получаемой из (10); отсюда имеем в силу (10), (13), (14) окончательно для параметров баланса [11]

$$\begin{aligned} \frac{d\mathbf{P}(t)}{dt} = & \mathbf{J}_{\mathbf{P}, \mathbf{x}}(\mathbf{x}(t), \mathbf{y}(\mathbf{x}(t), \mathbf{P}(t), U(t), \mathbf{p}), U(t), \mathbf{p}) \left(\frac{d\mathbf{x}(t)}{dt} \right)_{ext} + \\ & + \mathbf{J}_{\mathbf{P}, \mathbf{y}}(\mathbf{x}(t), \mathbf{y}(\mathbf{x}(t), \mathbf{P}(t), U(t), \mathbf{p}), U(t), \mathbf{p}) \left(\frac{d\mathbf{y}(t)}{dt} \right)_{ext}. \end{aligned} \quad (17)$$

Введя диссипативную матрицу $\mathbf{A}(\mathbf{x}, \mathbf{P}, \mathbf{p})$, сопряженную независимым параметрам состояния \mathbf{X} , в виде [6]

$$\mathbf{A}(\mathbf{x}, \mathbf{P}, \mathbf{U}, \mathbf{p}) = \mathbf{B}_x(\mathbf{x}, \mathbf{y}(\mathbf{x}, \mathbf{P}, \mathbf{U}, \mathbf{p}), \mathbf{U}, \mathbf{p}) \Delta \mathbf{A}(\mathbf{x}, \mathbf{y}(\mathbf{x}, \mathbf{P}, \mathbf{U}, \mathbf{p}), \mathbf{U}, \mathbf{p}) \mathbf{B}_x^T(\mathbf{x}, \mathbf{y}(\mathbf{x}, \mathbf{P}, \mathbf{U}, \mathbf{p}), \mathbf{U}, \mathbf{p}), \quad (18)$$

имеем в силу (2), (10), (13), (16) [6,11,12]:

$$\frac{d\mathbf{x}(t)}{dt} = \mathbf{A}(\mathbf{x}(t), \mathbf{P}(t), \mathbf{U}(t), \mathbf{p}) (\mathbf{X}(\mathbf{x}(t), \mathbf{P}(t), \mathbf{U}(t), \mathbf{p}) + \mathbf{X}_{ext}(\mathbf{x}(t), \mathbf{P}(t), \mathbf{U}(t), \mathbf{s}(t), \mathbf{p})), \quad (19)$$

где $\mathbf{X}_{ext}(\mathbf{x}, \mathbf{P}, \mathbf{U}, \mathbf{s}, \mathbf{p})$ – внешние силы, определяемые в соответствие с работами [11, 12]:

$$\mathbf{X}_{ext}(\mathbf{x}, \mathbf{P}, \mathbf{U}, \mathbf{s}, \mathbf{p}) = \mathbf{A}^{-1}(\mathbf{x}, \mathbf{P}, \mathbf{U}, \mathbf{p}) \left(\frac{d\mathbf{x}(t)}{dt} \right)_{ext}; \quad (20)$$

\mathbf{s} – параметры внешних потоков, меняющихся во времени. Приведенные преобразования могут быть выполнены как для исходной системы уравнений (1)–(7), (9), так и для упрощенной, получаемой путем замены в уравнениях (6), (7), (9) базисов [10] с обнулением части постоянных параметров в новом базисе [5].

Композиция функций для диссипативной матрицы $\mathbf{A}(\mathbf{x}, \mathbf{P}, \mathbf{U}, \mathbf{p})$ и внешних сил $\mathbf{X}_{ext}(\mathbf{x}, \mathbf{P}, \mathbf{U}, \mathbf{p})$ задается в виде

$$\mathbf{A}(\mathbf{x}, \mathbf{P}, \mathbf{U}, \mathbf{p}) = \mathbf{A}(\mathbf{x}, \mathbf{P}, \mathbf{U}, \mathbf{w}(\mathbf{x}, \mathbf{P}, \mathbf{U}, \mathbf{p}), \mathbf{p}), \quad (21)$$

$$\mathbf{X}_{ext}(\mathbf{x}, \mathbf{P}, \mathbf{U}, \mathbf{p}) = \mathbf{X}_{ext}(\mathbf{x}, \mathbf{P}, \mathbf{U}, \mathbf{v}(\mathbf{x}, \mathbf{P}, \mathbf{U}, \mathbf{p}), \mathbf{s}, \mathbf{p}), \quad (22)$$

таким, что при любых фиксированных \mathbf{w}^* диссипативная матрица $\mathbf{A}(\mathbf{x}, \mathbf{P}, \mathbf{U}, \mathbf{w}^*, \mathbf{p})$ также положительно определена (или невырождена и неотрицательно определена в случае инерционности), а также при любых фиксированных \mathbf{v}^* и \mathbf{s}^* внешние силы $\mathbf{X}_{ext}(\mathbf{x}, \mathbf{P}, \mathbf{U}, \mathbf{v}^*, \mathbf{s}^*, \mathbf{p})$ потенциальны по \mathbf{x} , т.е. существует такая скалярная функция $G(\mathbf{x}, \mathbf{P}, \mathbf{U}, \mathbf{v}^*, \mathbf{s}^*, \mathbf{p})$, что

$$\mathbf{X}_{ext}(\mathbf{x}, \mathbf{P}, \mathbf{U}, \mathbf{v}^*, \mathbf{s}^*, \mathbf{p}) = -\nabla_{\mathbf{x}} G(\mathbf{x}, \mathbf{P}, \mathbf{U}, \mathbf{v}^*, \mathbf{s}^*, \mathbf{p}). \quad (23)$$

Введя обобщенную свободную энергию $\tilde{F}(\mathbf{x}, \mathbf{P}, \mathbf{U}, \mathbf{v}^*, \mathbf{s}^*, \mathbf{p})$ [11, 12] в силу:

$$\tilde{F}(\mathbf{x}, \mathbf{P}, \mathbf{U}, \mathbf{v}^*, \mathbf{s}^*, \mathbf{p}) = F(\mathbf{x}, \mathbf{y}(\mathbf{x}, \mathbf{P}, \mathbf{U}, \mathbf{p}), \mathbf{U}, \mathbf{p}) + G(\mathbf{x}, \mathbf{P}, \mathbf{U}, \mathbf{v}^*, \mathbf{s}^*, \mathbf{p}), \quad (24)$$

задав области локально постоянных параметров \mathbf{w}^* , \mathbf{v}^* , \mathbf{s}^* , а также параметров баланса \mathbf{P}^* и параметров условий протекания процессов \mathbf{U}^* , имеем согласно выражениям (15), (19) – (24) для каждой из таких областей [11, 12]:

$$\frac{d\mathbf{x}(t)}{dt} = -\mathbf{A}(\mathbf{x}(t), \mathbf{P}^*, \mathbf{U}^*, \mathbf{w}^*, \mathbf{p}) \nabla_{\mathbf{x}} \tilde{F}(\mathbf{x}, \mathbf{P}^*, \mathbf{U}^*, \mathbf{v}^*, \mathbf{s}^*, \mathbf{p}) \Big|_{\mathbf{x}=\mathbf{x}(t)}. \quad (25)$$

Из преобразований (10)–(25) видно, что при стягивании областей постоянства параметров \mathbf{w}^* , \mathbf{v}^* , \mathbf{s}^* , \mathbf{P}^* , \mathbf{U}^* в точки, т.е. при $\mathbf{w}^* \rightarrow \mathbf{w}(\mathbf{x}, \mathbf{P}, \mathbf{U}, \mathbf{p})$, $\mathbf{v}^* \rightarrow \mathbf{v}(\mathbf{x}, \mathbf{P}, \mathbf{U}, \mathbf{p})$, $\mathbf{s}^* \rightarrow \mathbf{s}$, $\mathbf{P}^* \rightarrow \mathbf{P}$, $\mathbf{U}^* \rightarrow \mathbf{U}$ система уравнений (17), (25) эквивалентна системе уравнений (1) – (3) [11].

Из уравнения (25) видно, что динамика системы обусловливается стремлением системы в стационарное состояние, которое из-за перехода в другую область постоянства параметров \mathbf{w}^* , \mathbf{v}^* , \mathbf{s}^* , \mathbf{P}^* , \mathbf{U}^* изменяется [11, 12]. Отсюда аналитическое выражение решения (приближенного) задается в виде [13]

$$\mathbf{x}^{(0)}(t) = \sum_{i=1}^{N_x} \tilde{\mathbf{x}}_i^{(0)} \varphi_i \left(\theta_i \left(\tilde{\boldsymbol{\alpha}}(\boldsymbol{\alpha}_0, t), \mathbf{w}^*, \mathbf{q}^*, \gamma \right) - \Delta \theta_i \left(\mathbf{w}^*, \mathbf{q}^*, \gamma \right), \gamma \right) + \mathbf{x}^* \left(\mathbf{q}^*, \gamma \right), \quad (26)$$

где постоянные параметры γ , $\tilde{\mathbf{x}}_i^{(0)}$, $i=1, N_x$ определяются из выражения (25); кусочно постоянные параметры $\mathbf{q}^* = \mathbf{q}^*(\tilde{\boldsymbol{\alpha}}, \mathbf{v}^*, \mathbf{s}^*, \mathbf{P}^*, \mathbf{U}^*)$ характеризуют локальную область постоянства параметров \mathbf{w}^* , \mathbf{v}^* , \mathbf{s}^* , \mathbf{P}^* , \mathbf{U}^* ; $\mathbf{x}^*(\mathbf{q}^*, \gamma)$ характеризует стационарное состояние, соответствующее области постоянства параметров \mathbf{w}^* , \mathbf{v}^* , \mathbf{s}^* , \mathbf{P}^* , \mathbf{U}^* ; функция $\tilde{\boldsymbol{\alpha}}(\boldsymbol{\alpha}_0, t)$ определяется согласно [13]:

$$\tilde{\boldsymbol{\alpha}}(\boldsymbol{\alpha}_0, t) = \boldsymbol{\alpha}(\bar{\boldsymbol{\alpha}}_i + \epsilon_i(t), t), \quad t \in (t_i, t_{i+1}), \quad \bar{\boldsymbol{\alpha}}_{i+1} = \boldsymbol{\alpha}(\bar{\boldsymbol{\alpha}}_i + \epsilon_i(t_{i+1}), t_{i+1}), \quad i=1, \infty, \quad (27)$$

функция $\boldsymbol{\alpha}(\boldsymbol{\alpha}_0, t)$, для которой $\dim(\boldsymbol{\alpha}) = \dim(\mathbf{x})$, обладает свойством группы [13, 14] и имеет предел [13]:

$$\boldsymbol{\alpha}(\boldsymbol{\alpha}_0, 0) \equiv \boldsymbol{\alpha}_0, \quad \boldsymbol{\alpha}(\boldsymbol{\alpha}(\boldsymbol{\alpha}_0, \tau), t) \equiv \boldsymbol{\alpha}(\boldsymbol{\alpha}_0, t + \tau), \quad \exists \lim_{t \rightarrow +\infty} \boldsymbol{\alpha}(\boldsymbol{\alpha}_0, t) = \boldsymbol{\alpha}^*(\boldsymbol{\alpha}_0), \quad (28)$$

который может быть как конечным, так и бесконечным; каждая функция $\theta_i(\tilde{\boldsymbol{\alpha}}, \mathbf{w}^*, \mathbf{q}^*, \gamma)$, $i=1, N_x$ и $\varphi_i(\theta, \gamma)$, $i=1, N_x$ имеет предел [13]:

$$\exists \lim_{\tilde{\boldsymbol{\alpha}} \rightarrow \boldsymbol{\alpha}^*} \theta_i(\tilde{\boldsymbol{\alpha}}, \mathbf{w}^*, \mathbf{q}^*, \gamma) = \hat{\theta}_i(\boldsymbol{\alpha}^*, \mathbf{w}^*, \mathbf{q}^*, \gamma), \quad i=1, N_x, \quad (29)$$

$$\exists \lim_{\theta \rightarrow \hat{\theta}} \varphi_i(\theta, \gamma) = \hat{\varphi}_i(\hat{\theta}, \gamma) \neq \infty, \quad i=1, N_x. \quad (30)$$

Пределы $\hat{\theta}_i(\boldsymbol{\alpha}^*, \mathbf{w}^*, \mathbf{q}^*, \gamma)$, $i=1, N_x$ могут быть как конечными, так и бесконечными [13]. Более того, на выражение (26) накладываются дополнительные ограничения в виде взаимной однозначности между $\mathbf{x}^{(0)}$ и $\tilde{\boldsymbol{\alpha}}$. Отсюда выражение (26) относительно t также является группой, а значит, является общим решением автономной системы обыкновенных дифференциальных уравнений [14]. Из выражений (27)–(30) вытекает при фиксированных \mathbf{w}^* , \mathbf{q}^* асимптотическая устойчивость $\mathbf{x}^{(0)}(t)$ в силу (26) при $t \rightarrow +\infty$ [13]. Отсюда вытекает существование функции Ляпунова второго рода [6, 15], которой является обобщенная свободная энергия $\tilde{F}(\mathbf{x}, \mathbf{P}^*, \mathbf{U}^*, \mathbf{v}^*, \mathbf{s}^*, \mathbf{p})$ [6, 13]. А значит, существует положительно определенная диссипативная матрица $\mathbf{A}(\mathbf{x}, \mathbf{P}^*, \mathbf{U}^*, \mathbf{w}^*, \mathbf{p})$, удовлетворяющая (25) [6]. Отсюда вытекает существование такого дифференциального уравнения (25), общим решением которого является выражение (26) [13].

Разбив независимые параметры состояния \mathbf{X} на блоки, перепишем уравнение (25) в блочном виде и, используя коэффициенты эквивалентности внутренних возмущений [6], введя перекрестные возмущения [6], получим для каждого блока уравнения, аналогичные уравнению (19) [6]. Затем, используя преобразования, аналогичные (19)–(25), получим для каждого i -го блока $\mathbf{x}^{(i)}$ независимых координат состояния \mathbf{X} уравнения, аналогичные уравнению (25). Таким образом, для каждого i -го блока $\mathbf{x}^{(i)}$ аналитическое приближение решения аналогично уравнению (26):

$$\mathbf{x}^{(0,j)}(t) = \sum_{i=1}^{N_x} \tilde{\mathbf{x}}_i^{(0,j)} \varphi_{i,j} \left(\tilde{\theta}_{i,j} \left(\tilde{\boldsymbol{\alpha}}(\boldsymbol{\alpha}_0, t), \mathbf{w}^*, \mathbf{q}^{*(j)}, \gamma \right), \gamma \right) + \mathbf{x}^{*(j)} \left(\tilde{\mathbf{q}}^{*(j)}(t), \gamma \right), \quad (31)$$

$$\tilde{\theta}_{i,j} \left(\tilde{\boldsymbol{\alpha}}, \mathbf{w}^*, \mathbf{q}^{*(j)}, \gamma \right) = \theta_{i,j} \left(\tilde{\boldsymbol{\alpha}}^{(j)}, \mathbf{w}^*, \mathbf{q}^{*(j)}, \gamma \right) - \Delta \theta_{i,j} \left(\left\{ \tilde{\boldsymbol{\alpha}}^{(k)} \right\}_{k=1, k \neq j}^{\tilde{m}}, \mathbf{w}^*, \mathbf{q}^{*(j)}, \gamma \right), \quad (32)$$

$$\tilde{\mathbf{q}}^{*(j)}(t) = \tilde{\mathbf{q}}^{*(j)} \left(\left\{ \tilde{\boldsymbol{\alpha}}^{(k)}(\boldsymbol{\alpha}_0^{(k)}, t) \right\}_{k=1, k \neq j}^{\tilde{m}}, \mathbf{q}^{*(j)} \right), \quad j=1, \tilde{m}, \quad i=1, N_x, \quad (33)$$

где функции $\theta_{i,j}(\tilde{\boldsymbol{\alpha}}^{(j)}, \mathbf{w}^*, \mathbf{q}^{*(j)}, \gamma)$, $\Delta \theta_{i,j}(\left\{ \tilde{\boldsymbol{\alpha}}^{(k)} \right\}_{k=1, k \neq j}^{\tilde{m}}, \mathbf{w}^*, \mathbf{q}^{*(j)}, \gamma)$, $\varphi_{i,j}(\theta, \gamma)$, $i=1, N_x$, $\tilde{\mathbf{q}}^{*(j)}(\left\{ \tilde{\boldsymbol{\alpha}}^{(k)} \right\}_{k=1, k \neq j}^{\tilde{m}}, \mathbf{q}^{*(j)})$, $j=1, \tilde{m}$ имеют пределы

$$\exists \lim_{\tilde{\mathbf{a}}^{(j)} \rightarrow \mathbf{a}^{(j)}} \theta_{i,j}(\tilde{\mathbf{a}}^{(j)}, \mathbf{w}^*, \mathbf{q}^{*(j)}, \gamma) = \hat{\theta}_{i,j}(\mathbf{a}^{*(j)}, \mathbf{w}^*, \mathbf{q}^{*(j)}, \gamma), \quad j=1, \tilde{m}, \quad i=1, N_x, \quad (34)$$

$$\exists \lim_{\tilde{\mathbf{a}} \rightarrow \mathbf{a}^*} \diamond \theta_{i,j} \left(\left\{ \tilde{\mathbf{a}}^{(k)} \right\}_{\substack{k=1, \\ k \neq j}}^{\tilde{m}}, \mathbf{w}^*, \mathbf{q}^{*(j)}, \gamma \right) = \hat{\theta}_{i,j} \left(\left\{ \mathbf{a}^{*(k)} \right\}_{\substack{k=1, \\ k \neq j}}^{\tilde{m}}, \mathbf{w}^*, \mathbf{q}^{*(j)}, \gamma \right), \quad j=1, \tilde{m}, \quad i=1, N_x, \quad (35)$$

$$\exists \lim_{\tilde{\mathbf{a}} \rightarrow \mathbf{a}^*} \tilde{\mathbf{q}}^{*(j)} \left(\left\{ \tilde{\mathbf{a}}^{(k)} \right\}_{k=1, k \neq j}^{\tilde{m}}, \mathbf{q}^{*(j)} \right) = \hat{\mathbf{q}}^{*(j)} \left(\left\{ \mathbf{a}^{*(k)} \right\}_{k=1, k \neq j}^{\tilde{m}}, \mathbf{q}^{*(j)} \right), \quad j=1, \tilde{m}, \quad (36)$$

$$\exists \lim_{\hat{\theta} \rightarrow \hat{\theta}} \varphi_{i,j}(\theta, \gamma) = \hat{\varphi}_{i,j}(\hat{\theta}, \gamma) \neq \infty, \quad j=1, \tilde{m}, \quad i=1, N_x, \quad (37)$$

постоянные параметры γ , $\tilde{\mathbf{x}}_i^{(0,j)}$, $j=1, \tilde{m}$, $i=1, N_x$ определяются из уравнения (25); кусочно-постоянные параметры $\mathbf{q}^{*(j)} = \mathbf{q}^{*(j)}(\tilde{\mathbf{a}}, \mathbf{v}^*, \mathbf{s}^*, \mathbf{P}^*, \mathbf{U}^*)$, $j=1, \tilde{m}$ характеризуют локальную область постоянства параметров \mathbf{w}^* , \mathbf{v}^* , \mathbf{s}^* , \mathbf{P}^* , \mathbf{U}^* . Отсюда в силу (34)–(37) аналитическое решение $\mathbf{x}^{(0,j)}(t)$, $j=1, \tilde{m}$, даваемое (31)–(33), при фиксированных \mathbf{w}^* , $\mathbf{q}^{*(j)}$, $j=1, \tilde{m}$ асимптотически устойчиво. Значит, в силу приведенных выше рассуждений существует такая система (25), общим решением которой является аналитическое выражение (31)–(33). Более того, аналитическое выражение (31)–(33), как нетрудно видеть, вбирает в себя особенности динамики, обусловленные перекрестными эффектами.

Стягивая области постоянства параметров \mathbf{w}^* , \mathbf{v}^* , \mathbf{s}^* , \mathbf{P}^* , \mathbf{U}^* и соответственно \mathbf{q}^* , $\mathbf{q}^{*(j)}$, $j=1, \tilde{m}$ в точки, исходя из (10), (17), исходя из (31)–(33) (или из (26), (27), эквивалентных (31)–(33)) имеем [13]:

$$\bar{\mathbf{x}}^{(0)}(t) = \mathbf{h}(\mathbf{x}^{(0)}(t), \mathbf{a}) + \Delta \mathbf{h}(\mathbf{q}^*, \mathbf{a}), \quad \mathbf{x}^{(0)}(t) = \left\{ \mathbf{x}^{(0,k)}(t) \right\}_{k=1}^{\tilde{m}}, \quad (38)$$

где постоянные параметры \mathbf{a} и γ , $\tilde{\mathbf{x}}_i^{(0,j)}$, $j=1, \tilde{m}$, $i=1, N_x$ определяются из (1)–(3) путем приравнивания к нулю в дискретные моменты времени t_l , $l=1, N_t$ имеющих смысл флуктуаций невязок $\mathbf{o}^{(0)}(t)$, определяемых из (1) и (2) [13]:

$$\mathbf{o}^{(0)}(t) = \frac{d\bar{\mathbf{x}}^{(0)}(t)}{dt} - \mathbf{B}(\bar{\mathbf{x}}^{(0)}(t), \mathbf{U}(t), \mathbf{p}) \frac{\delta \Delta \mathbf{x}^{(0)}(t)}{dt} + \left(\frac{d\bar{\mathbf{x}}(t)}{dt} \right)_{ext}, \quad \mathbf{o}^{(0)}(t_l) = 0, \quad l=1, N_t, \quad (39)$$

$$\frac{\delta \Delta \mathbf{x}^{(0)}(t)}{dt} = \Delta \mathbf{A}(\bar{\mathbf{x}}^{(0)}(t), \mathbf{U}(t), \mathbf{p}) \Delta \mathbf{X}(\bar{\mathbf{x}}^{(0)}(t), \mathbf{U}(t), \mathbf{p}), \quad (40)$$

где N_t – число дискретных моментов времени. Постоянные параметры \mathbf{a} , γ , $\tilde{\mathbf{x}}_i^{(0,j)}$, $j=1, \tilde{m}$, $i=1, N_x$, а также постоянные величины в (6), (7), (9) определяются из экспериментальных данных $\mathbf{r}^{(3)}(t)$, используя соотношения (3), (5)–(7), (9), (31)–(33), (38)–(41), а также соотношения, вытекающие из (4) [13]:

$$\Delta \mathbf{r}(t) = \mathbf{r}^{(3)}(t) - \mathbf{g}_r(\bar{\mathbf{x}}^{(0)}(t), \mathbf{U}(t), \mathbf{p}), \quad \Delta \mathbf{r}(t_l) = 0, \quad l=1, N_t, \quad (41)$$

где $\Delta \mathbf{r}(t)$ – погрешность модели. Определив упомянутые выше параметры, определим контролируемые характеристики системы, используя (4) [13]:

$$\mathbf{z}(t) = \mathbf{g}_z(\bar{\mathbf{x}}^{(0)}(t), \mathbf{U}(t), \mathbf{p}). \quad (42)$$

Соотношения (3), (5)–(7), (9), (31)–(33), (38)–(42) дают возможность, оценив чувствительность невязок к постоянным величинам $\tilde{\mathbf{B}}_i$, $i=1, N_B$, $\Delta \tilde{\mathbf{A}}_i$, $i=1, N_A$, \tilde{F}_i , $i=1, N_F$, упрощать модель вышеописанным способом путем замены базиса функциональных разложений (6), (7), (9).

Более того, имея из экспериментальных данных лишь некоторые области изменения наблюдаемых параметров, мы из уравнений (3), (5)–(7), (9), (31)–(33), (38)–(41) оцениваем диапазоны изменения

постоянных параметров (в том числе и диссипативной матрицы), входящих в уравнения (6), (7), (9), а значит, можем оценить область в фазовом пространстве, в котором находится динамика решения [12].

Результаты

Аналитическое задание приближения решения уравнений метода математического прототипирования, вбирающее в себя особенности протекания физических и химических процессов в конкретной системе, дает возможность задать класс адекватных моделей требуемой точности. Такой класс задается в виде соотношений (3), (5)–(7), (9), (31)–(33), (38)–(42). В предложенном классе моделей систем различной физической и химической природы модель строится с наименьшими вычислительными затратами.

Обсуждение

Предложенный в настоящей работе класс моделей систем различной физической и химической природы может быть положен в основу архитектур нейронных сетей для диагностики и прогнозирования технического состояния, для проектирования компонентов авиационного оборудования. Такие модели могут быть как непрерывными, так и дискретными, как детерминированными, так и стохастическими.

Заключение

Задание аналитического приближения решения дает возможность строить модели систем различной физической и химической природы, которые могут быть положены в основу математического ядра систем автоматизированного проектирования компонентов авиационного оборудования, а также систем диагностики и прогнозирования технического состояния компонентов авиационного оборудования.

Список литературы

1. Юревич Е. И. Основы проектирования техники. СПб. : Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2012. 135 с.
2. Барзилович Е. Ю. Модели технического обслуживания сложных систем. М. : Высшая школа, 1982. 231 с.
3. Колодежный Л. П., Чернодаров А. В. Надежность и техническая диагностика. М. : Изд-во ВВА им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина, 2010. 452 с.
4. Бессекерский В. А., Попов Е. П. Теория систем автоматического управления. СПб. : Профессия, 2003. 768 с.
5. Khalyutin S. P., Starostin I. E., Agafonkina I. V. Generalized Method of Mathematical Prototyping of Energy Processes for Digital Twins Development // Energies. 2023. № 16. doi:10.3390/en16041933
6. Starostin I. E., Bykov V. I. Kinetic theorem of modern non-equilibrium thermodynamics. Raley, Noth Caroline, USA : Open Science Publishing, 2017. 229 p.
7. Старостин И. Е., Степанкин А. Г. Программная реализация методов современной неравновесной термодинамики и система симуляции физико-химических процессов SimulationNonEqProcSS v.0.1.0. Бо Бассен, Маврикий : Lambert academic publishing, 2019. 127 с.
8. Эткин В. А. Энергодинамика (синтез теорий переноса и преобразования энергии). СПб. : Наука, 2008. 409 с.
9. Калиткин Н. Н. Численные методы. СПб. : БХВ-Петербург, 2011. 592 с.
10. Дзядзык В. К. Введение в теорию равномерного приближения функции полиномами. М. : Наука, 1977. 512 с.
11. Быков В. И., Старостин И. Е., Халютин С. П. Анализ формирования диссипативных структур в сложных сосредоточенных системах на основе потенциально-потокowego метода. Кибернетический подход // Сложные системы. 2012. № 4. С. 72–89.
12. Быков В. И., Старостин И. Е., Халютин С. П. Качественный анализ динамики процессов в неравновесных системах на основе потенциально-потокowego метода методом обратной связи // Информатика и системы управления. 2013. № 3. С. 75–89.
13. Старостин И. Е. Аналитическое задание решений потенциально-потокowych уравнений и идентификация параметров системы // Фундаментальные, поисковые, прикладные исследования и инновационные проекты : сб. тр. Нац. науч.-практ. конф. М., 2022. С. 377–382.
14. Арнольд В. И. Обыкновенные дифференциальные уравнения. М. : МЦНМО, 2012. 144 с.
15. Красовский Н. Н. Некоторые задачи теории устойчивости движения. М. : Гос. изд-во физ.-мат. лит., 1959. 211 с.

References

1. Yurevich E.I. *Osnovy proektirovaniya tekhniki = Fundamentals of engineering design*. Saint Petersburg: Sankt-Peterburgskiy gosudarstvennyy politekhnicheskii universitet, 2012:135. (In Russ.)
2. Barzilovich E.Yu. *Modeli tekhnicheskogo obsluzhivaniya slozhnykh system = Models of maintenance of complex systems*. Moscow: Vysshaya shkola, 1982:231. (In Russ.)
3. Kolodezhnyy L.P., Chernodarov A.V. *Nadezhnost' i tekhnicheskaya diagnostika = Reliability and technical diagnostics*. Moscow: Izd-vo VVA im. prof. N.E. Zhukovskogo i Yu.A. Gagarina, 2010:452. (In Russ.)
4. Bessekerskiy V.A., Popov E.P. *Teoriya sistem avtomaticheskogo upravleniya = Theory of automatic control systems*. Saint Petersburg: Professiya, 2003:768. (In Russ.)
5. Khalyutin S.P., Starostin I.E., Agafonkina I.V. Generalized Method of Mathematical Prototyping of Energy Processes for Digital Twins Development. *Energies*. 2023;(16). doi:10.3390/en16041933
6. Starostin I.E., Bykov V.I. *Kinetic theorem of modern non-equilibrium thermodynamics*. Raley, Noth Caroline, USA: Open Science Publishing, 2017:229.
7. Starostin I.E., Stepankin A.G. *Programmnyaya realizatsiya metodov sovremennoy neravnovesnoy termodinamiki i sistema simulyatsii fiziko-khimicheskikh protsessov SimulationNonEqProcSS v.0.1.0 = Software implementation of methods of modern nonequilibrium thermodynamics and simulation system of physico-chemical processes SimulationNonEqProcSS v.0.1.0*. Bo Bassen, Mavrikiy: Lambert academic publishing, 2019:127. (In Russ.)
8. Etkin V.A. *Energodinamika (sintez teoriiy perenosa i preobrazovaniya energii) = Ergodynamics (synthesis of theories of energy transfer and transformation)*. Saint Petersburg: Nauka, 2008:409. (In Russ.)
9. Kalitkin N.N. *Chislennyye metody = Numerical methods*. Saint Petersburg: BKhV-Peterburg, 2011:592. (In Russ.)
10. Dzyadzyk V.K. *Vvedenie v teoriyu ravnomernogo priblizheniya funktsii polinomami = Introduction to the theory of uniform approximation of a function by polynomials*. Moscow: Nauka, 1977:512. (In Russ.)
11. Bykov V.I., Starostin I.E., Khalyutin S.P. Analysis of the formation of dissipative structures in complex concentrated systems based on the potentially streaming method. Cybernetic approach. *Slozhnye sistemy = Complex systems*. 2012;(4):72–89. (In Russ.)
12. Bykov V.I., Starostin I.E., Khalyutin S.P. Qualitative analysis of the dynamics of processes in nonequilibrium systems based on the potential-flow method by the feedback method. *Informatika i sistemy upravleniya = Informatics and control systems*. 2013;(3):75–89. (In Russ.)
13. Starostin I.E. Analytical assignment of solutions of potentially-flow equations and identification of system parameters. *Fundamental'nye, poiskovyye, prikladnyye issledovaniya i innovatsionnyye proekty: sb. tr. Nats. nauch.-prakt. konf. = Fundamental, search, applied research and innovative projects : proceedings of the National scientific and practical conference*. Moscow, 2022:377–382. (In Russ.)
14. Arnol'd V.I. *Obyknovennyye differentsial'nye uravneniya = Ordinary differential equations*. Moscow: MTsNMO, 2012:144. (In Russ.)
15. Krasovskiy N.N. *Nekotorye zadachi teorii ustoychivosti dvizheniya = Some problems of the theory of stability of motion*. Moscow: Gos. izd-vo fiz.-mat. lit., 1959:211. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Игорь Евгеньевич Старостин

доктор технических наук, доцент,
 профессор кафедры электротехники
 и авиационного электрооборудования,
 Московский государственный технический
 университет гражданской авиации
 (Россия, г. Москва, Кронштадтский бульвар, 20)
 E-mail: starostinigo@yandex.ru

Алексей Алексеевич Дружинин

студент,
 Московский государственный технический
 университет гражданской авиации
 (Россия, г. Москва, Кронштадтский бульвар, 20)
 E-mail: alexs20017@mail.ru

Igor E. Starostin

Doctor of technical sciences, associate professor,
 professor of the sub-department of electrical
 engineering and aviation electrical equipment,
 Moscow State Technical University of Civil Aviation
 (20 Kronstadtsky boulevard, Moscow, Russia)

Aleksey A. Druzhinin

Student,
 Moscow State Technical University of Civil Aviation
 (20 Kronstadtsky boulevard, Moscow, Russia)

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

Поступила в редакцию/Received 27.02.2023

Поступила после рецензирования/Revised 30.03.2023

Принята к публикации/Accepted 04.05.2023

АЛГОРИТМЫ АДАПТИВНОГО ОБНАРУЖЕНИЯ СИГНАЛА, ОТРАЖЕННОГО ОТ МАЛОРАЗМЕРНЫХ НАЗЕМНЫХ ЦЕЛЕЙ

Е. А. Пафиков¹, А. И. Годунов², Н. К. Юрков³, О. В. Николаев⁴

¹ Филиал Военной академии материально-технического обеспечения имени генерала армии А. В. Хрулева в г. Пензе, Пенза, Россия
^{2,3} Пензенский государственный университет, Пенза, Россия
⁴ Главное ракетно-артиллерийское управление, Москва, Россия
^{1,4} evgeniy_pafikov@mail.ru, ² godunov@pnzgu.ru, ³ yurkov_NK@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Решение задач обнаружения, селекции и распознавания малоразмерных наземных целей (МНЦ) (автомобилей различных классов, легкобронированных целей – бронированных машин пехоты и бронетранспортеров, сильнобронированных целей – танков) ведется как оптическими, оптико-электронными, тепловизионными, так и радиолокационными средствами разведки. Наиболее перспективными средствами разведки, обладающими свойствами всепогодности и всеуточности, являются радиолокационные средства и комплексированные системы. Использование различий в тонкой структуре отраженных сигналов позволяет формировать поляризационные, доплеровские, дальномерные, углочастотные, пространственно-временные и другие комбинированные радиолокационные портреты целей, которые являются основой для решения проблемы обнаружения/распознавания МНЦ при наличии средств снижения заметности и средств радиоэлектронной защиты, а также наличия мощных помеховых отражений от местных предметов. Решение проблемы селекции неподвижных и малоподвижных МНЦ возможно лишь при использовании поляризационных и поляризационно-дальномерных портретов и созданных на их основе алгоритмов адаптивного обнаружения сигнала. *Материалы и методы.* Предлагается провести анализ интегральных функций распределения для продольно-угловых и поперечно-угловых колебаний МНЦ, представленных в виде совокупности блестящих точек относительно центра масс и движущихся по неровной поверхности. Выявить, какие отличия в спектральных характеристиках этих колебаний для автомобилей и бронетанковой техники наиболее критические. Определить алгоритмы адаптивного обнаружения сигнала, отраженного от рассмотренных радиолокационных целей по выборочным значениям спектра элементов матрицы рассеяния и оценить их эффективность. *Результаты и выводы.* Таким образом, определены алгоритмы адаптивного обнаружения сигнала, отраженного от малоразмерных целей по выборочным значениям спектра элементов матрицы рассеяния, которые снижают корреляции отсчетов помехи на выходе процессора и дают возможность нахождения решающих правил в явном виде и получение уравнений для оценки максимального правдоподобия неизвестных параметров сигнального и помехового векторов.

Ключевые слова: спектральная характеристика, объекты бронетанковой техники, цель, алгоритм

Для цитирования: Пафиков Е. А., Годунов А. И., Юрков Н. К., Николаев О. В. Алгоритмы адаптивного обнаружения сигнала, отраженного от малоразмерных наземных целей // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 2. С. 32–43. doi:10.21685/2307-4205-2023-2-4

ADAPTIVE DETECTION ALGORITHMS FOR SIGNAL REFLECTED FROM SMALL-SIZED GROUND TARGETS

Е.А. Pafikov¹, А.И. Godunov², Н.К. Yurkov³, О.В. Nikolaev⁴

¹ Branch of the Military Academy of Logistics named after Army General A.V. Khrulev in Penza, Penza, Russia
^{2,3} Penza State University, Penza, Russia
⁴ Main Rocket and Artillery Directorate, Moscow, Russia
^{1,4} evgeniy_pafikov@mail.ru, ² godunov@pnzgu.ru, ³ yurkov_NK@mail.ru

Abstract. *Background.* Solving the problems of detection, selection and recognition of small ground targets (MNTs) (vehicles of various classes, lightly armored targets – armored infantry vehicles and armored personnel carriers, heavily armored targets – tanks) is carried out both by optical, optoelectronic, thermal imaging, and radar reconnaissance means. The most promising means of reconnaissance, which have the properties of all-weather and all-day operation,

are radar facilities and integrated systems. The use of differences in the fine structure of the reflected signals makes it possible to form polarization, Doppler, rangefinder, angle-frequency, space-time and other combined radar portraits of targets, which are the basis for solving the problem of detection and recognition of MNCs in the presence of means of reducing visibility and means of electronic protection, as well as the presence powerful interference reflections from local objects. The solution to the problem of selection of stationary and slow-moving MNCs is possible only with the use of polarization and polarization-rangefinder portraits and adaptive signal detection algorithms created on their basis. *Materials and methods.* The article proposes to analyze the integral distribution functions for the longitudinal-angular and transverse-angular oscillations of the MNC, presented as a set of shiny points relative to the center of mass and moving along an uneven surface. To reveal what differences in the spectral characteristics of these oscillations for cars and armored vehicles are the most critical. Determine the algorithms for adaptive detection of a signal reflected from the considered radar targets using sample values of the spectrum of the elements of the scattering matrix and evaluate their effectiveness. *Results and conclusions.* Thus, algorithms for adaptive detection of a signal reflected from small targets based on sample values of the spectrum of the elements of the scattering matrix are defined, which reduce the correlation of interference samples at the output of the processor and make it possible to find decision rules in explicit form and obtain equations for estimating the maximum likelihood of unknown signal and noise parameters. vectors.

Keywords: spectral characteristic, objects of armored vehicles, target, algorithm

For citation: Pafikov E.A., Godunov A.I., Yurkov N.K., Nikolaev O.V. Adaptive detection algorithms for signal reflected from small-sized ground targets. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2023;(2):32–43. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2023-2-4

Введение

В настоящее время стремительное развитие танков и бронированных машин оказывает существенное воздействие на формы и методы ведения боевых действий. Их активное применение приводит к развитию систем противодействия и разработке средств борьбы с ними.

Одним из важнейших объектов поражения, согласно мнению специалистов, является бронетанковая техника, которая и в будущем сохранит свое значение основной ударной силы сухопутных войск. При использовании обычных систем оружия ей отводится решающая роль при проведении как наступательных, так и оборонительных операций [1]. Поэтому борьба с объектами бронетанковой техники (ОБТ) на современном этапе и перспективе является первоочередной задачей, к решению которой будут привлечены практически все виды Вооруженных сил и родов войск.

Алгоритмы адаптивного обнаружение сигнала

Движение объектов ОБТ по неровностям трассы без отрыва от ее поверхности приводит к появлению вибраций, которые зависят от формы пространственного спектра неровностей дороги, собственных колебательных характеристик объекта как механической системы, скорости движения и типа грунта. Составляющая спектра, связанная с действием этого фактора, имеет сплошной вид с локальными максимумами, обусловленными амплитудно-частотными характеристиками подвески ходовой части объекта и характеристиками грунта. Некоторым из возбуждаемых при этом колебаний удается поставить в соответствие собственные колебания поддрессорной массы на подвеске и колебания колеса на шине или катка на бандаже. Резонансные частоты подвески у тяжелых и легких гусеничных объектов составляют 1,1 и 1,4 Гц соответственно. Для гусеничной техники характерны также вибрации, возбуждаемые при движении катков по неровностям трассы, сосредоточенные в диапазоне частот 20...60 Гц [1–4]. При движении колесной техники по неровностям трассы вибрации возбуждаются [2]:

- за счет колебаний кузова в диапазоне частот 1...2 Гц;
- за счет колебаний мостов в диапазоне частот 5...13 Гц;
- за счет колебаний двигателя на подвеске в диапазоне частот 5...30 Гц. Основная энергия сигнала при движении колесной техники по неровностям дороги приходится на диапазон частот 1...20 Гц, а максимум спектральной плотности – на диапазон частот 6...12 Гц [2];
- удары при отрыве ходовой части объекта от поверхности трассы движения возбуждают колебания с частотами, равными единицам герц;
- вибрации, связанные с наличием гусеничного движителя, возникают за счет движения опорных катков по профилированной гусенице и возбуждают излучение на так называемой «траковой» частоте и ее гармониках. Спектр этого излучения зависит от скорости движения объекта, а значение «траковой» частоты можно определить из соотношения

$$f = 2 V / L,$$

где L – длина гусеницы, м; V – скорость объекта, м/с.

При скоростях движения 3...15 м/с значение частоты «траковой» составляющей в спектре находится в диапазоне 15...60 Гц [1]. Достаточно интенсивное излучение возбуждается в диапазоне 16...20 Гц за счет многополярности подвески гусениц. Значения частот колебаний, возбуждаемых вследствие нецентрированности колес и катков, можно определить из соотношения

$$f = 2V / d,$$

где V – скорость движения, м/с; d – диаметр катка, м.

Как видно из соотношения, спектр колебаний зависит от скорости движения. При движении со скоростями 3...15 м/с он сосредоточен в диапазоне частот от 0,5 до 1 Гц [2–4]. Удары траков гусениц о дорогу с твердым покрытием приводят к возбуждению колебаний, значение частоты которых зависит от скорости движения и лежит в диапазоне от 10 до 60 Гц;

Неравномерность движения объекта, связанная с изменением скорости движения объекта по величине или направлению, приводит к силовым воздействиям на грунт и, соответственно, к возбуждению соответствующих вибраций. Эти воздействия носят кратковременный характер (по времени равны длительности маневра) и выражаются в виде всплесков энергии вибраций.

Из проведенного анализа следует, что механизмы возбуждения вибраций объектов техники различных классов определяют структуру частотных спектров их сигналов и несут информацию о конструктивных особенностях и, следовательно, классах объектов. При этом параметры механизмов возбуждения, связанных со скоростью движения, режимом работы двигателей объектов и степенью неровности поверхности движения, изменяют свои значения в довольно широких пределах, что находит свое отражение в вариациях структур спектров доплеровских сигналов.

Анализ выполненных ранее работ [1–9] показал, что для гусеничных машин наиболее существенными являются колебания корпуса относительно продольной и поперечной осей. При этом в спектре отраженного сигнала могут наблюдаться два характерных пика, обусловленных продольно-угловыми и поперечно-угловыми резонансами подрессоренной массы.

Учитывая, что наземная цель может быть описана совокупностью N_0 элементарных отражателей с эффективной поверхностью рассеивания (ЭПР) $\sigma_p = \sigma_0$ и одного доминирующего отражателя с $\sigma_1 = aN_0\sigma_0$, где a – отношение ЭПР доминирующего отражателя к сумме отражателей с σ_0 , ширину спектра $G(\Omega)$ отраженного сигнала в соответствии с выражением $\Delta\Omega_2 = \sqrt{M_2 \{G(\Omega)\}}$ [2, 3] можно представить в виде

$$\Delta\Omega_2 = \sqrt{\frac{4K^2 L^2 \left(aN_0 \sum_{p=1}^{N_0} l_p^2 + \sum_{q=1}^{N_0} l_q^2 \right)}{aN_0^2 v}} M^2 \{|\xi|\} KL\xi \sqrt{M_2 \{|\xi|\}}, \quad (1)$$

где L – протяженность цели; K – волновое число; M_2 – 2-й момент распределения модуля скорости изменения коэффициента ширины объекта наблюдения; ξ – коэффициент «ширины» цели; v – число пар отражателей; $|\xi|$ – модуль скорости угла наблюдения цели; $l_p l_q$ – проекция расстояния между двумя отражателями на оси, перпендикулярную и параллельную к направлению облучения.

С учетом соотношения $\Delta\Omega_2 = 2\pi\Delta F_2$ выражение (1) может быть преобразовано к виду [2]

$$\Delta F_2 = \frac{\xi L_H}{\lambda} \sqrt{\Omega_\theta^2 \sigma_\theta^2 \cos^2 \phi + \Omega_\epsilon^2 \sigma_\epsilon^2 \sin^2 \phi}, \quad (2)$$

где $\sigma_\theta \sigma_\epsilon$ – среднеквадратические отклонения амплитуд продольно-угловых и поперечно-угловых колебаний; $\Omega_\theta \Omega_\epsilon$ – частоты продольно-угловых и поперечно-угловых колебаний; ϕ – ракурс цели; L_H – высота цели.

Примем для объекта $L_H = 2,5$ м, тогда для РЛС, работающей в 2-миллиметровом диапазоне радиоволн, выражение (2) примет вид

$$\Delta F_2 = \sqrt{(\Omega_\theta \sigma_\theta \cos \phi)^2 + (\Omega_\epsilon \sigma_\epsilon \sin \phi)^2} = 11,7\phi L_H = \eta. \quad (3)$$

Определим пределы изменения η при изменении $\sigma_\theta, \sigma_\varepsilon, \phi$.

Плотность вероятности скорости движения $W(V)$ может быть представлена в виде [2]

$$W(V) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}1,39} e^{-\frac{0,5(V-V_0)^2}{1,39^2}},$$

где V – скорость объекта, м/с; V_0 – математическое ожидание его скорости. Плотность распределения $\sigma_\theta, \sigma_\varepsilon$ может быть получена из соотношения

$$W(\sigma_\varepsilon) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}0,026} e^{-\frac{(\sigma_\varepsilon-0,51)^2}{2 \cdot 0,026^2}}; \quad (4)$$

$$W(\sigma_\theta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}0,14} e^{-\frac{(\sigma_\theta-2)^2}{2 \cdot 0,14^2}}. \quad (5)$$

Для выявления практически возможных значений эффективной ширины спектра флуктуации сигнала, отраженного от объекта, был также рассмотрен равновероятный закон распределения скоростей. Для этого случая:

$$W(\sigma_\varepsilon) = \begin{cases} 0, & \text{если } \sigma_\varepsilon < 0,4^0, \\ 1, & \text{если } 0,4^0 \leq \sigma_\varepsilon \leq 0,8^0, \\ 0, & \text{если } \sigma_\varepsilon > 0,8^0; \end{cases} \quad (6)$$

$$W(\sigma_\theta) = \begin{cases} 0, & \text{для } \sigma_\theta < 1^0, \\ 1, & \text{для } 1^0 \leq \sigma_\theta \leq 2^0, \\ 0, & \text{для } \sigma_\theta > 2^0. \end{cases} \quad (7)$$

Предположим, что углы визирования объектов лежат в пределах $\pm 180^\circ$. Для упрощения вычислений закон распределения углов визирования можно принять равновероятным

$$W(\phi) = \begin{cases} 0, & \text{если } \phi < 0, \\ \frac{1}{2\pi}, & \text{если } 0 \leq \phi \leq 2\pi, \\ 0, & \text{если } \phi > 2\pi. \end{cases} \quad (8)$$

В этом случае функция распределения нескольких случайных величин $\Phi(\eta)$ может быть представлена в виде [2]

$$\Phi(\eta) = \int_{-\infty}^{\eta} \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{90^0} f[\sigma_\theta, \phi, \sigma_\varepsilon(\sigma_0, \phi, \eta)] \frac{d\sigma_\varepsilon(\sigma_\theta, \phi, \eta)}{d\eta} d\phi_0 d\sigma_0 d\eta. \quad (9)$$

Для плотностей распределения (6) и (7) с учетом перевода градусной меры в радианную имеем

$$\Phi(\eta) = \frac{10^6}{4,32\pi^2} \int_0^{\eta} \int_{-\infty}^{0,025 \cdot 2\pi} \int_0^{\eta} \frac{\eta}{(\eta^2 - \sigma_0^2 \cos^2 \phi) \sin^2 \phi} \exp\left[-\frac{1}{2} \frac{(\sigma_\theta - 0,035)^2}{0,0024^2}\right] \times \\ \times \exp\left[-\frac{1}{2} \frac{(\sqrt{\eta^2 - \sigma_0^2 \cos^2 \phi} - 0,086 \sin \phi)^2}{0,0045^2 \sin^2 \phi}\right] d\phi d\sigma_0 d\eta; \quad (10)$$

$$\Phi(\eta) = \frac{10^4}{4,88\pi} \int_{0,0175}^{\eta} \int_0^{0,035} \int_0^{2\pi} \eta [(\eta^2 - \sigma_\theta^2 \cos^2 \phi) \sin \phi]^{-1} d\phi d\sigma_0 d\eta. \quad (11)$$

Определение $\Phi(\eta)$ с помощью выражений (10) и (11) вызывает серьезные трудности, поэтому вычисления проводились на основе метода Монте-Карло.

Анализ выражения (3) и распределения $W(\sigma_\theta)$ показывает, что ΔF_2 зависят от угла визирования и скорости движения.

Для движущихся автомобилей в литературе [2–4] имеются данные не по угловым, а по линейным перемещениям корпуса, обусловленными воздействием трассы.

Применительно к этому случаю выражение (1) может быть записано в виде [2]

$$\Delta\Omega_2 = k\Delta IF_{\text{виб}} / \sqrt{2} \quad (12)$$

или

$$\Delta\Omega_2 = \Delta IF_{\text{виб}} / \lambda\sqrt{2}, \quad (13)$$

где $F_{\text{виб}}$ – частота вибраций корпуса автомобиля; ΔI – амплитуда этих вибраций.

Из материалов, приведенных в работах [2–4], следует, что частота и амплитуда вибрации для автомобилей могут быть связаны соотношением

$$\Delta I(\text{мм}) \approx 0,51 / F_{\text{виб}}^2. \quad (14)$$

Объединяя уравнения (12), (13) и (14), получим $\Delta F_2 \approx 0,36 / \lambda F_{\text{виб}}$ или применительно к радиолокационной станции миллиметрового диапазона [2]:

$$\Delta F_2 \approx 42 / F_{\text{виб}}. \quad (15)$$

С использованием тех же материалов были вычислены вероятности появления ΔF_2 , превышающие некоторую величину $\Delta F_{2i} = P(\Delta F_2 \leq \Delta F_{2i})$.

В работе [2] амплитуды продольно-угловых и поперечно-угловых колебаний движущихся объектов распределены по нормальным законам. В результате дифференцирования, являющегося линейной операцией, свойство нормальности сохраняется.

Комбинация этих законов (сумма проекций на линию визирования) будет. Поэтому скорость флуктуаций угла наблюдения ξ будет также нормальной. Для нормального закона в соответствии с выражением (1) могут быть записаны следующие соотношения для спектральных моментов:

$$\frac{M_4\{\xi\}}{M_2^2\{\xi\}} = 3\mu, \quad (16)$$

где

$$\mu = \frac{\left(aN_0 \sum_{p=1}^{N_0} I_p^4 + \sum_{q=1}^{V_0} I_q^4 \right) (aN_0^2 + V_0)}{\left(aN_0 \sum_{p=1}^{N_0} I_p^4 + \sum_{q=1}^{V_0} I_q^4 \right)^2} \quad (17)$$

или $\gamma = 3\mu$.

Параметр γ характеризует форму спектра сигнала. Расчеты показывают, что для $N = 5$ и $q = 1$ имеем $\mu = 1,7$; $\gamma = 5,1$.

Для аппроксимации спектра отраженного сигнала от бронированной цели воспользуемся выражением [2]

$$G(\Omega) = \left(1 - 0,21 \frac{\Omega}{\Delta\Omega_2^2} \right)^{-n} \quad (18)$$

или, заменяя $\Omega = 2\pi F$, получим

$$G(F) = \left(1 - 0,21 \frac{\Omega}{\Delta\Omega_2^2} \right)^{-n}. \quad (19)$$

Спектральная плотность флуктуаций сигнала, отраженного от движущегося автомобиля, может быть аппроксимирована выражением [2, 4]

$$G(F) = \left(1 + 0,14 \frac{F_2^2}{\Delta F_2^2}\right)^{-3}. \quad (20)$$

Расчеты, проведенные для $N = 6$ и $\alpha = 9$ (объекта типа автомобиль), дают $\mu = 1,4$. Для этого случая $\gamma = 4,2$, $\eta \cong 5$.

Вычисленные на основе предложенных моделей интегральные функции распределения показывают, что пределы изменений среднеквадратической ширины спектров сигналов, отраженных от различных классов имеют существенные отличия. Так, в пределах от 0 до 20 Гц лежит 87 % всех значений среднеквадратической ширины спектра от объектов 2-го класса и только 13 % от объектов 1-го класса. Существенно (с вероятностью $\sim 0,9$) отличаются также и коэффициенты формы спектральных плотностей γ флуктуаций сигнала, отраженного от этих объектов.

Целесообразно рассмотреть возможность синтеза адаптивных процедур на основе критерия отношения правдоподобия (ОП), обладающих свойством асимптотического подобия, т.е. независимости вероятности ложных тревог от неизвестных параметров помехи, а также возможность нахождения в явном виде структуры решающих правил (РП) и получения уравнений для оценки максимального правдоподобия неизвестных параметров как помехи, так и сигнала. К этому следует добавить также, что РП ОП всегда являются функциями достаточных статистик, если последние существуют [3, 4].

Итак, будем полагать, что осуществляется спектральный анализ временного ряда в полосе частот ΔF в l -м канале дальности. Тогда на выходе процессора БПФ наблюдается выборка $y_{nl} = \{y_{1l}, y_{2l}, \dots, y_{nl}\}$, которая может состоять из спектральных компонент шума либо из компонент суммы сигнальной компоненты $GS(f)$ с заданной интенсивностью G и шума. Будем считать, что параметры спектра помехи неизвестны.

Очевидно, что выборочные значения спектра можно представить в виде

$$y_n = \lambda GS_n(f) + \theta_n(f), \quad (21)$$

где $\lambda = 1$ с вероятностью P_1 , $\lambda = 0$ с вероятностью P_2 ($P_1 + P_2 = 1$); $S_n(f)$ – спектральные компоненты сигнала; G – случайный параметр, по смыслу представляющий собой амплитуду спектральной плотности сигнала, распределенную равномерно в диапазоне $\Delta G = G_2 - G_1$. Выборочные значения спектра помехи будем полагать распределенными нормально с корреляционной матрицей $K_Q = \sigma_f^2 \|\delta_{ij}\|$. Здесь σ_f^2 – неизвестная интенсивность спектра шума, которая также распределена равномерно в интервале $\Delta \sigma_f^2$.

Оптимальный алгоритм обнаружения состоит в сравнении с порогом ОП:

$$\Lambda(y_n) = \frac{W(y_n / H_1)}{W(y_n / H_0)}, \quad (22)$$

где $W(y_n / H_{i,0})$ – плотности распределения выборки конкурирующих гипотез о наличии и отсутствии сигнала соответственно, определяемые как

$$\begin{cases} W(y_n / H_0) = \frac{1}{(2\pi\sigma_f^2)^{n/2}} \exp(-n/2), \\ W(y_n / H_1) = \frac{1}{(2\pi\sigma_f^2)^{n/2}} \exp\left(-\frac{1}{2\sigma^2} (Y_n - \hat{G}S_n)^T (y_n - \hat{G}S_n)\right). \end{cases} \quad (23)$$

Оценки максимального правдоподобия параметров σ_f^2, σ^2, G находятся из системы уравнений [1, 4]

$$\frac{\partial \ln W(y_n / H_0)}{\partial (\sigma_f^2)} = 0; \quad \frac{\partial \ln W(y_n / H_1)}{\partial (\sigma^2)} = 0; \quad \frac{\partial \ln W(y_n / H_1)}{\partial (G)} = 0.$$

После преобразования и решения оценки неизвестных параметров будут иметь вид

$$\hat{\sigma}_f^2 = \frac{y_n^T y_n}{n}; \quad \hat{\sigma}^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{G} S_i)^2; \quad \hat{G} = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i S_i}{\sum_{i=1}^n S_i^2}. \quad (24)$$

После подстановки (23), (24) в соотношение (22) отношение правдоподобия нетрудно записать как

$$\Lambda(y_n) = \left[\frac{\sum_{i=1}^n y_i^2}{\sum_{i=1}^n y_i^2} - \frac{1}{S_0} \left(\sum_{i=1}^n y_i S_i \right)^2 \right]^{n/2},$$

где $S_0 = \sum_{i=1}^n S_i^2$.

Выражение, определяемое (23), необходимо сравнивать с порогом $C_{12} = \frac{P_2}{P_1} \frac{a_2(y_n)}{a_1(y_n)}$ [2, 5, 6].

Величина $a_2(y_n)$ имеет отношение к ситуации, когда принимается и обрабатывается чисто шумовая выборка, поэтому в соответствии с [2] определится как

$$a_2(y_n) = W(\hat{\sigma}_f^2) \frac{2\pi}{\det^{1/2} D_1}.$$

Здесь $D_1 = -\frac{\partial \ln W(y_n / H_0)}{\partial (\hat{\sigma}_f^2)} = \frac{n}{2} \frac{1}{Y_n^T Y_n}$.

Окончательно величина $a_2(y_n)$ может быть найдена по соотношению

$$a_2(y_n) = \frac{2}{\Delta \hat{\sigma}_f^2} \sqrt{2\pi / n^3} Y_n^T Y_n.$$

Величина $a_1(y_n)$ найдется аналогичным образом:

$$a_1(y_n) = W(\hat{G}, \hat{\sigma}^2) \frac{2\pi}{\det^{1/2} D_1}.$$

Полагая, что численные значения оценок параметров \hat{G} и $\hat{\sigma}^2$ независимы и распределены равномерно в пределах интервалов ΔG , $\Delta \sigma^2$ для их совместного распределения, нетрудно записать

$$W(\hat{G}, \hat{\sigma}^2) = \frac{1}{\Delta \sigma^2}.$$

Матрица D_1 , как и ранее, может быть определена как

$$D_1 = \left\| \begin{array}{cc} \frac{\partial^2 \ln W(y_n / H_1)}{\partial G^2} & -\frac{\partial^2 \ln W(y_n / H_1)}{\partial G \partial (\sigma^2)} \\ \frac{\partial^2 \ln W(y_n / H_1)}{\partial (\sigma^2) \partial G} & -\frac{\partial^2 \ln W(y_n / H_1)}{\partial (G^2)^2} \end{array} \right\|_{\substack{G = \hat{G} \\ \sigma^2 = \hat{\sigma}^2}} \quad (25)$$

Осуществляя расчеты согласно (25) с учетом (23), после достаточно громоздких преобразований получим для элементов матрицы D_1

$$\left. \frac{\partial \ln W(y_n / H_1)}{\partial G^2} \right|_{\substack{G = \hat{G} \\ \sigma^2 = \hat{\sigma}^2}} = -\frac{S_0 n}{(Y_n - \hat{G} S_n)^T (Y_n - \hat{G} S_n)} = -\frac{S_0 n}{Q_1(\hat{G})};$$

$$\left. \frac{\partial \ln W(y_n / H_1)}{\partial (\sigma^2)^2} \right|_{\substack{G = \hat{G} \\ \sigma^2 = \hat{\sigma}^2}} = -\frac{n^3}{2Q_1^2(\hat{G})}; \quad \left. \frac{\partial \ln W(y_n / H_1)}{\partial G \partial (G^2)} \right|_{\substack{G = \hat{G} \\ \sigma^2 = \hat{\sigma}^2}} = 0.$$

Тогда

$$\det D_1 = \frac{n^4}{2} \frac{S_0}{\theta_L^3(\hat{G})}, \tag{26}$$

а

$$a_1(y_n) = \frac{2\pi\sqrt{2}\theta_1^{3/2}(\hat{G})}{\Delta G \Delta \sigma^2 n^2 S_0^{1/2}}. \tag{27}$$

С учетом уравнений (26), (27) порог C_{12} нетрудно записать в виде

$$G_{12} = \frac{P_2}{P_1} \frac{\Delta G}{\sqrt{\pi}} \sqrt{S_0 / 2\hat{\sigma}^2} \frac{\hat{\sigma}_f^2}{\hat{\sigma}^2}. \tag{28}$$

Видно, что порог является функцией оценок параметров дисперсий выборочных значений спектра, т.е. является переменным. Взяв логарифм от соотношений (22) и (23) с учетом их равенства, получим решающее правило обнаружения:

$$\left(\frac{n}{2} - 1 \right) \ln \hat{\sigma}_f^2 + \left(\frac{3}{2} - \frac{n}{2} \right) \ln \hat{\sigma}^2 > \frac{H_1}{H_0} \ln R \tag{29}$$

или, что аналогично, через элементы выборочных значений спектра характеристики практически совпадают, а при $P_F > 0,1$ отличие составляет 10–15 %, что объясняется усложнением алгоритма и ошибками при определении оценок неизвестных параметров.

Таким образом, определены алгоритмы адаптивного обнаружения сигнала, отраженного от РЛЦ по выборочным значениям спектра элементов матрицы рассеяния, оценена их эффективность. Приведенные алгоритмы были использованы при проектировании реальных устройств обнаружения РЛЦ по спектральным преобразованиям отраженного сигнала:

$$\left(\frac{n}{2} - 1 \right) \ln \sum_{i=1}^n y_i^2 - \left(\frac{3}{2} - \frac{n}{2} \right) \ln \left[\sum_{i=1}^n y_i^2 - \frac{1}{S_0} \left(\sum_{i=1}^n y_i S_i \right)^2 \right] > \frac{H_1}{H_0} \ln R. \tag{30}$$

Здесь $R = \frac{P_2}{P_1} \frac{\Delta G}{\sqrt{\pi}} \sqrt{S_0 / 2}$.

Вариант функциональной схемы обнаружителя, синтезированного в соответствии с выражением (30), изображен на рис. 1.

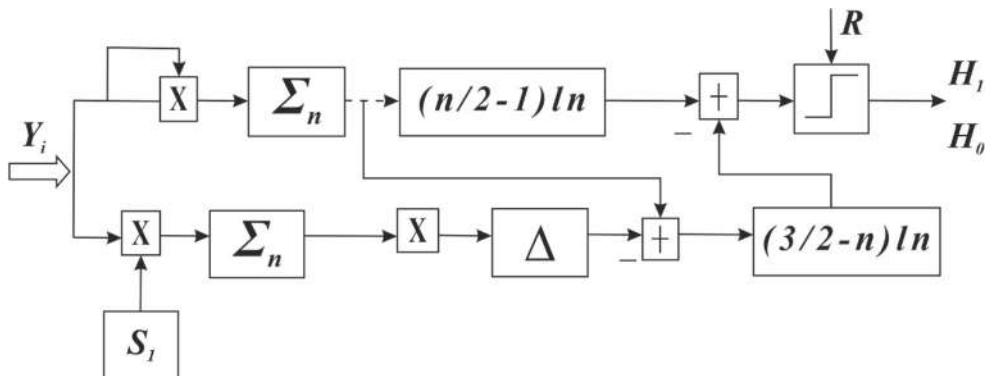


Рис. 1. Структурная схема спектрального адаптивного обнаружителя на основе отношения правдоподобия

Здесь символом \widehat{S}_i обозначен генератор ожидаемых значений спектральной плотности на частотах $f_i, i = \overline{1, n}$ при выполнении гипотезы H_1 . Отметим, что суммирование в выражение (10) может быть выполнено на n -отводных линиях задержки [1, 2]. Найдем характеристики обнаружения, соответствующие полученному алгоритму. Если пренебречь зависимостью порога от элементов выборки, то для оценки эффективности обнаружения целесообразно вернуться к соотношению (3). Тогда решение о наличии сигнала будет принято в случае, если

$$\sum_{i=1}^n y_i / \left(\sum_{i=1}^n y_i^2 - Z_n^2 \right) \geq C. \quad (31)$$

Соотношение (11) может быть преобразовано к виду

$$\sum_{i=1}^n y_i / \left(\sum_{i=1}^n y_i^2 - Z_n^2 \right) = 1 + Z_n^2 / \sum_{i=1}^{n-1} Z_i^2, \quad (32)$$

где Z_i – независимые нормально распределенные величины с параметрами $(0, \sigma)$ при $i \neq n$ и (τ_n, σ) при $i = n$. В свою очередь:

$$m_n = \begin{cases} 0, & \text{при } \lambda = 0, \\ G\sqrt{S_0}, & \text{при } \lambda = 1. \end{cases}$$

Из формулы (32) видно, что алгоритм обнаружения сводится к сравнению с порогом величины $T^2 = \frac{Z_n^2}{\sum_{i=1}^n Z_i^2}$.

Для расчета характеристик обнаружения определим вероятность $P(T^2 \geq C_1 = C - 1)$. Очевидно, что

$$P(T^2 \geq C_1) = 1 - F(\sqrt{C_1}) + F(-\sqrt{C_1}),$$

где $F(\cdot)$ – интегральный закон распределения для T^2 .

Вводя новую переменную $t = \sqrt{n-1}T = \frac{Z_n}{\sqrt{(1/n-1)\sum_{i=1}^{n-1} Z_i^2}}$, вероятность превышения порога

можно представить в виде

$$P(T^2 \geq C_1) = 1 - F_t(\sqrt{(n-1)C_1}) + F_t(-\sqrt{(n-1)C_1}). \quad (33)$$

В выражении (33) закон распределения величины t будет описываться распределением Стьюдента [1, 7], причем при выполнении гипотезы H_1 оно будет нецентральным, а при H_0 – центральным. Поскольку это распределение хорошо изучено и табулировано, характеристики обнаружения могут быть найдены для малых вероятностей ложной тревоги P_F . Для больших P_F и размера выборки $n > 10$ можно воспользоваться приближением

$$\sum_{i=1}^{n-1} Z_i^2 \approx (n-1)\sigma^2.$$

Тогда алгоритм обнаружения сводится к тому, что гипотеза H_1 принимается в случае, если $Z_n^2 \geq (n-1)\sigma^2 C_1 = K_0$, что с точностью до постоянного коэффициента совпадает с алгоритмом обнаружения сигнала с неизвестной амплитудой в шуме известной интенсивности.

Характеристики обнаружения, рассчитанные по соотношению (33) при $n = 15$ и $q = \frac{S_0}{2\sigma^2} = 10$, приведены на рис. 2 под цифрами 1 и 2 соответственно.

Здесь же символами (*) обозначена кривая для известных значений параметров спектра шума. Видно, что при малых значениях P_F характеристики практически совпадают, а при $P_F > 0,1$ отличие составляет 10–15 %, что объясняется усложнением алгоритма и ошибками при определении оценок неизвестных параметров.

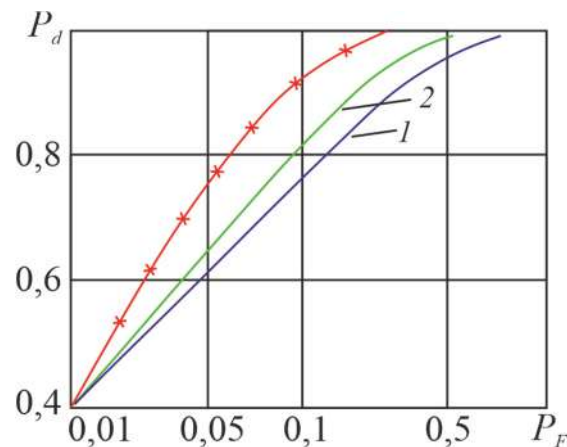


Рис. 2. Характеристики адаптивного спектрального обнаружения

Заключение

Таким образом, определены алгоритмы адаптивного обнаружения сигнала, отраженного от малоразмерных целей по выборочным значениям спектра элементов матрицы рассеяния, оценена их эффективность. Приведенные алгоритмы были использованы при проектировании реальных устройств обнаружения МРЦ по спектральным преобразованиям отраженного сигнала.

Для совместного использования устройств доплеровской селекции предложим практически важные рекомендации:

1. Переход из временной области в спектральную приводит к снижению корреляции отсчетов помехи на выходе процессора БПФ. Расширение спектра помехи от 15 до 70 Гц приводит к существенному снижению вероятности обнаружения. Способ с «плавающим» порогом дает выигрыш в пороговом отношении сигнал/помеха до 3дБ. Увеличение глубины флуктуации полезного сигнала приводит к незначительным (не более 2 дБ) потерям в пороговом отношении сигнал/помеха, вследствие чего способ с плавающим порогом является более устойчивым.

2. Спектральные адаптивные способы, синтезированные на основе критерия отношения правдоподобия, обладают свойством асимптотического подобию. Достоинством указанных способов является также возможность нахождения решающих правил в явном виде и получение уравнений для оценки максимального правдоподобия неизвестных параметров сигнального и помехового векторов.

Список литературы

1. Акиншин Н. С., Быстров Р. П., Румянцев В. Л. Миллиметровая радиолокация. Методы обнаружения негауссовских сигналов. М. : Радиотехника, 2010. 528 с.
2. Вознесенский А. В., Акиншин Н. С., Александров С. Б. Статистический анализ спектральных признаков распознавания наземных целей // Вопросы специальной радиоэлектроники. Сер.: РЛТ. 1988. Вып. 14. С. 53–60.
3. Акиншин Н. С., Голубицкий В. Э., Александров С. Б. [и др.]. Статистические характеристики огибающей сигналов, отраженных от движущихся наземных целей в КВЧ ММД волн // Оборонная техника. 1988. № 7. С. 37–42.
4. Акиншин Н. С., Румянцев В. Л., Процюк С. В. Методы построения систем обнаружения негауссовских сигналов. Тула : ЗАО НПФ «Лидар», 1999. 233 с.
5. Подчуфаров А. Ю., Викторов А. В., Крапивкин Г. И. Распознавание мешающих отражений по виду их спектра // Вестник Тульского государственного университета. Сер.: Проблемы специального машиностроения. 2003. № 6, ч. 2. С. 97–100.
6. Акиншин Н. С., Вознесенский А. В., Александров С. Б. Модель сигнала отраженного от движущейся наземной цели // Вопросы специальной радиоэлектроники. Сер.: РЛТ. 1988. Вып. 14. С. 40–42.
7. Акиншин Н. С., Зотов Ю. М., Александров С. Б. [и др.]. Исследование эффективности обнаружителей негауссовских сигналов, основанных на различиях спектров сигнала и помехи // Вопросы специальной радиоэлектроники. Сер.: РЛТ. 1989. Вып. 20. С. 49–61.

8. Акиншин Н. С., Никитин Н. А., Александров С. Б. Статистические характеристики спектров сигналов, отраженных от неподвижных наземных целей в КВЧ ММ ДВ // Вопросы специальной радиоэлектроники. Сер.: РЛТ. 1987. Вып. 17. С. 104–105.
9. Акиншин Н. С., Лискин В. М., Александров С. Б. Анализ возможности обнаружения неподвижных наземных объектов и различения их классов в КВЧ ММ ДВ // Оборонная техника. 1987. № 5. С. 45–50.
10. Акиншин Н. С., Лискин В. М., Никитин Н. А., Процюк С. В. Анализ спектральных характеристик сигналов, отраженных от наземных объектов в интересах их распознавания // Оборонная техника. 1986. № 12. С. 43–46.

References

1. Akinshin N.S., Bystrov R.P., Rumyantsev V.L. *Millimetrovaya radiolokatsiya. Metody obnaruzheniya negaussovskikh signalov = Millimeter radar. Methods of detecting non-Gaussian signals*. Moscow: Radiotekhnika, 2010:528. (In Russ.)
2. Voznesenskiy A.V., Akinshin N.S., Aleksandrov S.B. Statistical analysis of spectral signs of recognition of ground targets. *Voprosy spetsial'noy radioelektroniki. Ser.: RLT = Questions of special radio electronics. Ser.: RLT*. 1988;(14):53–60. (In Russ.)
3. Akinshin N.S., Golubitskiy V.E., Aleksandrov S.B. et al. Statistical characteristics of the envelope of signals reflected from moving ground targets in EHF MMD waves. *Oboronnaya tekhnika = Defense technology*. 1988;(7):37–42. (In Russ.)
4. Akinshin N.S., Rumyantsev V.L., Protsyuk S.V. *Metody postroeniya sistem obnaruzheniya negaussovskikh signalov = Methods of constructing systems for detecting non-Gaussian signals*. Tula: ZAO NPF «Lidar», 1999:233. (In Russ.)
5. Podchufarov A.Yu., Viktorov A.V., Krapivkin G.I. Recognition of interfering reflections by the type of their spectrum. *Vestnik Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Ser.: Problemy spetsial'nogo mashinostroeniya = Bulletin of Tula State University. Ser.: Problems of special mechanical engineering*. 2003;(6):97–100. (In Russ.)
6. Akinshin N.S., Voznesenskiy A.B., Aleksandrov S.B. Model of a signal reflected from a moving ground target. *Voprosy spetsial'noy radioelektroniki. Ser.: RLT = Questions of special radio electronics. Ser.: RLT*. 1988;(14):40–42. (In Russ.)
7. Akinshin N.S., Zotov Yu.M., Aleksandrov S.B. et al. Investigation of the effectiveness of detectors of non-Gaussian signals based on differences in signal and interference spectra. *Voprosy spetsial'noy radioelektroniki. Ser.: RLT = Questions of special radio electronics. Ser.: RLT*. 1989;(20):49–61. (In Russ.)
8. Akinshin N.S., Nikitin N.A., Aleksandrov S.B. Statistical characteristics of signal spectra reflected from stationary ground targets in EHF MM DV. *Voprosy spetsial'noy radioelektroniki. Ser.: RLT = Questions of special radioelectronics. Ser.: RLT*. 1987;(17):104–105. (In Russ.)
9. Akinshin N.S., Liskin V.M., Aleksandrov S.B. Analysis of the possibility of detecting stationary ground objects and distinguishing their classes in EHF MM DV. *Oboronnaya tekhnika = Defense equipment*. 1987;(5):45–50. (In Russ.)
10. Akinshin N.S., Liskin V.M., Nikitin N.A., Protsyuk S.V. Analysis of spectral characteristics of signals reflected from ground objects in the interests of their recognition. *Oboronnaya tekhnika = Defense equipment*. 1986;(12):43–46. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Евгений Анатольевич Пафиков

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры производства
и эксплуатации боеприпасов,
Филиал Военной академии
материально-технического обеспечения
имени генерала армии А. В. Хрулева в г. Пензе
(Россия, г. Пенза, Военный городок)
E-mail: evgeniy_pafikov@mail.ru

Evgeniy A. Pafikov

Candidate of technical sciences, associate professor,
associate professor of the sub-department
of production and operation of ammunition,
Branch of the Military Academy of Logistics
named after Army General A.V. Khrulev in Penza
(Voennyi gorodok, Penza, Russia)

Анатолий Иванович Годунов

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры автоматизации и телемеханики,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: godunov@pnzgu.ru

Anatoly I. Godunov

Doctor of technical sciences, professor,
professor of the sub-department
of automatics and telemechanics,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, 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

Олег Владимирович Николаев

начальник отдела высокоточных систем,
Главное ракетно-артиллерийское управление
(Россия, г. Москва, Большой Козловский переулок, 6)
E-mail: evgeniy_pafikov@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)

Oleg V. Nikolaev

Head of the high-precision systems department,
Main Rocket and Artillery Directorate
(6 Bolshoy Kozlovsky lane, Moscow, Russia)

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

Поступила в редакцию/Received 24.02.2023

Поступила после рецензирования/Revised 27.03.2023

Принята к публикации/Accepted 28.04.2023

МОДЕЛИ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ В СЛОЖНЫХ СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОНИКИ

И. М. Рыбаков

Пензенский государственный университет, Пенза, Россия
rybakov_im@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Исследование динамических процессов сложных структур является основой при изучении поведения базовых элементов электронной аппаратуры. Проектирование сложных систем электроники обычно требует детального представления основных узлов и деталей. Чтобы выполнить проектирование сложной системы электронной аппаратуры, требуется всестороннее понимание функционирования внутрисистемных процессов. *Материалы и методы.* В настоящее время существует множество решений на основе численного, аналитического и эмпирических подходов. Аналитические методы, в свою очередь, делятся на строгие теоретические и основанные на методе конформных преобразований. Численные методы реализуются с применением программных средств, в основе которых лежат два базовых метода: метод граничных элементов и метод конечных элементов. *Результаты.* На практике же предпочтительней использовать относительно простые модели, так как такие выражения легко встраивать в современные САПР, предназначенные для проектирования электронных устройств. В литературе можно найти сравнение результатов, полученных с помощью вычислений, с экспериментально измеренными значениями. Для практического применения той или иной модели необходимо знать точность ее результатов. *Выводы.* Современные процессоры и ПЛИС работают на высокой частоте, начиная от 100 МГц и выше. На такой частоте время нарастания сигнала будет составлять наносекунды, а большая емкость линии может воспрепятствовать и существенно его увеличить, что приведет к потере бита. Емкость линии сильно влияет на ее импеданс. Не выдержанный импеданс передающей линии может привести к отражению сигнала на ее конце и возврату к передатчику. Это может привести к выходу его из строя, а также к ложным срабатываниям приемника.

Ключевые слова: численный метод, аналитический метод, метод конечных элементов, печатный монтаж, сложные системы, электрические параметры

Для цитирования: Рыбаков И. М. Модели и методы измерения электрических параметров в сложных системах электроники // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 2. С. 44–50. doi:10.21685/2307-4205-2023-2-5

MODELS AND METHODS FOR MEASURING ELECTRICAL PARAMETERS IN COMPLEX ELECTRONICS SYSTEMS

I.M. Rybakov

Penza State University, Penza, Russia
rybakov_im@mail.ru

Abstract. *Background.* The study of dynamic processes of complex structures is the basis for studying the behavior of the basic elements of electronic equipment. Designing complex electronics systems usually requires a detailed representation of the main components and parts. To complete the design of a complex electronics system, a comprehensive understanding of the functioning of internal system processes is required. *Materials and methods.* Currently, there are many solutions based on numerical, analytical and empirical approaches. Analytical methods, in turn, are divided into strict theoretical and based on the method of conformal transformations. Numerical methods are implemented using software tools based on two basic methods: the boundary element method and the finite element method. *Results.* In practice, it is preferable to use relatively simple models, since such expressions are easy to embed in modern CAD designed for the design of electronic devices. In the literature one can find a comparison of the results obtained with the help of calculations with experimentally measured values. For the practical application of a particular model, it is necessary to know the accuracy of its results. *Conclusions.* Modern processors and FPGAs operate at a high frequency – starting from 100 MHz and higher. At such a frequency, the rise time of the signal will be nanoseconds, and the large capacitance of the line can prevent and significantly increase it, which will lead to a loss of a bit. Line capacitance

greatly affects its impedance. An unbalanced transmission line impedance can cause the signal to be reflected at the end of the line and returned to the transmitter. This can lead to its failure, as well as to false positives of the receiver.

Keywords: numerical method, analytical method, finite element method, printed wiring, complex systems, electrical parameters

For citation: Rybakov I.M. Models and methods for measuring electrical parameters in complex electronics systems. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2023;(2):44–50. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2023-2-5

Введение

Чтобы решить проблему расчета погонной емкости такого объекта, необходимо рассмотреть ее более детально. Микрополосковая линия – несимметричная полосковая линия для передачи электромагнитных волн в воздушной или, как правило, в диэлектрической среде, вдоль двух или нескольких проводников, имеющих форму тонких полосок и пластин [1]. Линии получили название микрополосковые, так как в результате высокой диэлектрической проницаемости подложки ее толщина и поперечные размеры полосы много меньше длины волны в свободном пространстве.

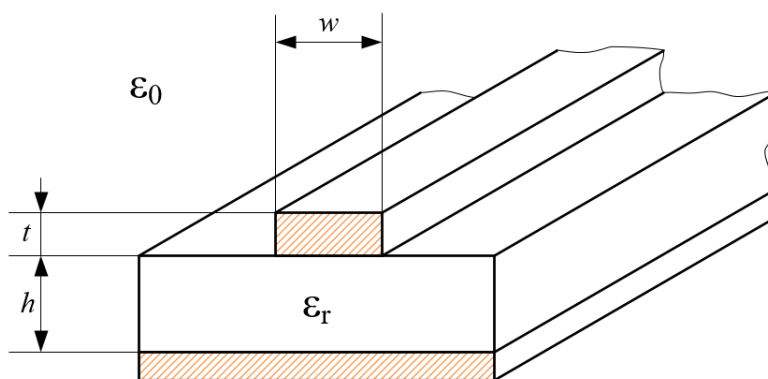


Рис. 1. Поперечное сечение микрополосковой линии

Как видно из рис. 1, конструкция микрополосковой линии чрезвычайно проста: металлический проводник (полоска) шириной w и толщиной t лежит на обеспечивающей прочность и жесткость конструкции подложке толщиной h , выполненной из однородного диэлектрика с относительной проницаемостью ϵ_r и покрытой с внешней стороны слоем металла. Структура поля в линии носит достаточно сложный характер, как показано на рис. 2.

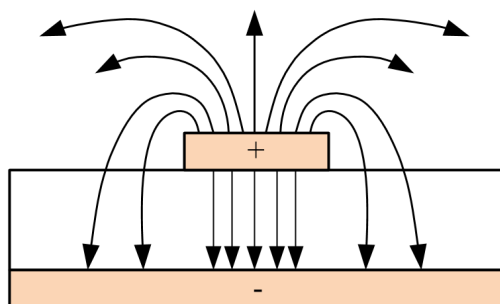


Рис. 2. Структура электрического поля в микрополосковой линии

Теоретический анализ поля в микрополосковой линии усложняется тем, что лишь часть поля концентрируется в заполненном диэлектриком промежутке между полоской и заземленным проводником, а остальная – над и рядом с полоской в воздухе. Поэтому распространяющаяся в линии мода не чистая *ТЕМ*, а *квази-ТЕМ*. С помощью термина «квази-ТЕМ» подчеркивается, что различие в структуре полей, обусловленное присутствием в линии слоистой среды воздух-диэлектрик двух мод, невелико. На низких частотах анализ, выполненный в предположении, что распространяется мода *квази-*

TEM, дает вполне приемлемую точность, однако по мере повышения частоты становятся все более заметными продольные составляющие полей, что сказывается на результатах анализа. В частности, заметно проявляется дисперсия, т.е. волновое сопротивление линии и эффективная диэлектрическая проницаемость начинают зависеть от частоты [2].

Преимущества микрополосковой линии, как и симметричной полосковой, проявляются в полной мере в тех случаях, когда необходимо создать гибридные цепи, состоящие из элементов с сосредоточенными и распределенными параметрами. Всеми достоинствами, присущими симметричной полосковой линии по сравнению с другими линиями передачи, обладает в равной степени и микрополосковая линия, кроме одного. В микрополосковой линии существенно сильнее взаимное влияние между соседними проводниками, что обусловлено более открытой структурой линии и отсутствием симметрии относительно горизонтальной оси (рис. 3, 4).

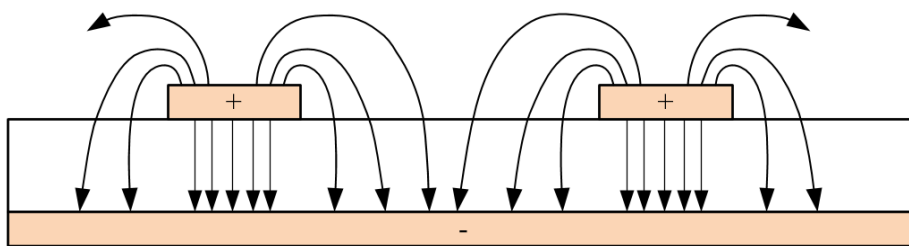


Рис. 3. Электрические поля микрополосковой линии при передаче одинаковых сигналов

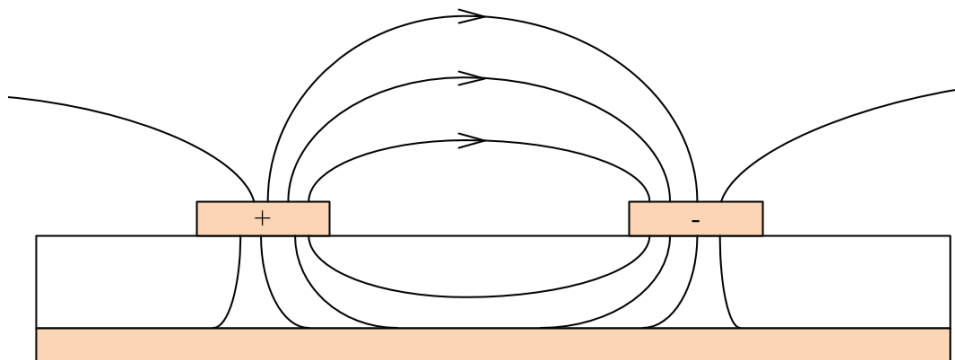


Рис. 4. Электрические поля микрополосковой линии при передаче разных сигналов

При близком расположении соседних линий передачи они попадают в электрическое поле данной линии, что определяет перекрестные помехи из одной линии в другую [3].

Импеданс микрополосковой линии

Импеданс напрямую зависит от электрической емкости. Далее было дано выражение для определения импеданса линии, однако не является полным и пригодным для проведения расчетов, так как не учитывает потери в линии, а также ее эффективную диэлектрическую проницаемость.

Уравнение для емкости микрополосковой линии в общем виде

$$C = \frac{\sqrt{\epsilon_{eff}}}{u_0 Z_0}. \quad (1)$$

Модели определения емкости микрополосковой линии

Пользоваться выражением (1) несколько не удобно, так как в нем никак не фигурируют значения толщины диэлектрика, ширины и длины микрополосковой линии. Поэтому для того, чтобы адекватно рассчитать значение емкости, необходимо применять немного усложненные модели, которые будут описаны ниже.

Также для реальных случаев, когда толщина металла имеет конкретную величину t (1), необходимо вводить значение эффективной ширины микрополосковой линии w_{eff} , которая является поправочным коэффициентом конечной толщины металла для проводника, чтобы учесть увеличение емкости.

Модель Кауппа

Каупп в своей работе [4] приводит экспериментально измеренные значения диэлектрической проницаемости для нескольких видов диэлектриков, параметры которых представлены в табл. 1.

Таблица 1

Значения экспериментально измеренной диэлектрической проницаемости

Тип диэлектрика	Толщина диэлектрика, мм	ϵ_r ($F = 25$ МГц)
G-10 Fiber– Glass-Epoxy	1,5	4,70
G-10 Fiber– Glass-Epoxy	1,12	4,80
G-10 Fiber– Glass-Epoxy	0,2	5,23
Nylon Phenolic	0,5	4,19
Nylon Phenolic	1,4	4,39
Rexolite	1,5	2,89
Воздух	–	1

Опираясь на эти данные, приводится формула для расчета эффективной диэлектрической проницаемости:

$$\epsilon_{eff} = 0,475\epsilon_r + 0,67, \quad (2)$$

где ϵ_r – собственная диэлектрическая проницаемость материала, измеряемая, как правило, на частоте 25 МГц.

Значения поправочного коэффициента для ширины проводника выводятся из формулы определения импеданса:

$$w_{eff} = 0,8w + t, \\ C = 1,43\epsilon_{eff} \frac{1}{\ln\left(5,98 \frac{h}{w_{eff}}\right)}. \quad (3)$$

Модель Шнайдера

В данной модели эффективное значение диэлектрической проницаемости всегда зависит именно от отношения ширины проводника к его высоте w/h и основывается на строгих конформных преобразованиях, поскольку такое отображение отражает угол преломления силовых линий электрического поля на границе между диэлектриком и воздухом. Конформные отображения не будут рассматриваться в данной работе в силу своей сложности и громоздкости, а будут использоваться уже выведенные выражения, что существенно упрощает их понимание и применение. Выражение для определения эффективной диэлектрической проницаемости принимает вид

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + \frac{10h}{w}\right)^{-0,5}. \quad (4)$$

Выражение для определения емкости имеет схожий вид с моделью Кауппа, однако строго зависит от отношения w/h . Так, при $w/h \leq 1$ выражение будет иметь вид

$$C = 1,43 \frac{\epsilon_{eff}}{\ln\left(\frac{8h}{w} + \frac{w}{4h}\right)}. \quad (5)$$

А при $\frac{w}{h} \geq 1$ выражение сильно отличается и имеет вид

$$C = 0,225\epsilon_{eff} \left[\frac{w}{h} + 2,42 - 0,44 \frac{h}{w} + \left(1 - \frac{h}{w}\right)^6 \right]. \quad (6)$$

Модель Уэллера – Шнайдера

В данном случае используется несколько упрощенная модель в связи с тем, что оригинальная модель Г. Уэллера представляет из себя выражения для определения волнового сопротивления с учетом потерь в линии.

В данной модели не приводятся соотношений для определения эффективной диэлектрической проницаемости, однако, основываясь на предположении Гунстена, график для своей модели использует выражение эффективной диэлектрической проницаемости из модели Шнайдера, т.е. выражение (4).

Выражение эффективной толщины проводника принимает вид

$$w_{eff} = w + \frac{t}{\pi} \ln \left[\frac{4e}{\sqrt{\left(\frac{t}{h}\right)^2 + \left[\frac{1}{\pi \left(\frac{w}{t} + 1,1\right)} \right]^2}} \right], \quad (7)$$

а выражение для емкости:

$$C = \frac{2,85\epsilon_r}{\ln \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{8h}{w_{eff}} \right) \left(\frac{8h}{w_{eff}} \right) + \sqrt{\left(\frac{8h}{w_{eff}} \right)^2 + \pi^2} \right]}. \quad (8)$$

Модель Поха

В данной модели в отличие от вышеперечисленных импеданс вычисляется исходя из расчета емкости микрополосковой линии. Здесь используются численные методы, основанные на спектральном анализе с учетом краевых эффектов. Цель этой модели – получить удобную формулу для расчета, используя обычный карманный калькулятор, поэтому в данном разделе не будут приводиться сложные и громоздкие выражения, а будет приведен лишь конкретный результат. Также стоит отметить, что здесь отсутствуют соотношения для определения поправочного коэффициента w_{eff} , поскольку авторы решили пойти путем нормализации переменных относительно половины ширины микрополосковой линии, что позволило обойтись лишь двумя уравнениями, зависящими от соотношений $\frac{w}{h}$.

Так для $\frac{w}{h} \leq 0,6$:

$$C = \frac{0,707(1 + \epsilon_r)}{\ln \left(\frac{8h}{w} \right) + \frac{1}{16(1 + \epsilon_r)} \left(\frac{w}{h} \right)^2 + \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r} \left[0,041 \left(\frac{w}{h} \right)^2 - 0,454 \right]}, \quad (9)$$

а для $\frac{w}{h} > 0,6$:

$$C = 0,225 \frac{w}{h} + 0,143 \left[\ln \left(\frac{w}{2h} \right) + 1,547 + 1,416\epsilon_r + (1,112 + 0,028\epsilon_r) \frac{h}{w} \right]. \quad (10)$$

Модель Сакураи и Тамару

Данная модель основана на численных методах, учитывающих двумерные эффекты. Однако по заявлению авторов такой метод является весьма сложным и требует много времени для реализации в САД-системах.

Емкость в данной модели определяется весьма простым способом:

$$C = 0,255\epsilon_r \left(1,15 \frac{w}{h} + 2,8 \left(\frac{t}{h} \right)^{0,222} \right). \quad (11)$$

В данной формуле первый член можно рассматривать как вклад от нижней и верхней поверхностей микрополосковой линии, а второй представляет собой величину вклада боковых стенок той же микрополосковой линии.

Модель Кумара

Данная модель предназначена для расчета характеристического импеданса на основе связанных емкостей. Модель, взятая для расчета импеданса, основана на конформных преобразованиях без учета эффективной ширины проводника и имеет вид

$$C = 0,225\epsilon_{eff} \left[\frac{w}{h} + \frac{2\pi}{\ln\left(\frac{4h}{t}\right)} \right]. \quad (12)$$

Выражение для эффективной диэлектрической проницаемости сформулировано эмпирическим путем и имеет вид

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + \frac{w}{10t} \right)^{-1}. \quad (13)$$

В дальнейших исследованиях будет проведен сравнительный анализ моделей расчета электрической емкости микрополосковой линии.

Заключение

Чтобы сравнить между собой модели, представленные в работе, необходимо провести расчеты для каждой из них, а также знать реальную величину емкости микрополосковой линии. Также для корректного сравнения необходимо определить процент ошибки каждой модели относительно экспериментальных данных, так как передающая линия электрических схем является важной составляющей в электронной аппаратуре. Во время проектирования электрической схемы, а также после топологии любого высокоскоростного устройства необходимо понимать, что на целостность сигнала существенное влияние оказывает погонная емкость. Неучет этого параметра приведет к нарушению работы устройства в связи с задержками сигнала. Скорость нарастания или спада сигнала будет не соответствовать ожидаемому времени, что приведет к ошибкам при работе с каким-либо приемопередатчиком, процессором или программируемой логической интегральной схемой.

Список литературы

1. Якимов А. Н. Оценка влияния краевых эффектов на излучение микроволновой антенны // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2020. Т. 1. С. 31–33.
2. Горелов А. А., Дианков С. Ю., Посысаев Е. И. Минимизация состава испытаний радиоэлектронной аппаратуры военного назначения на воздействие апериодических электромагнитных полей // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2021. Т. 2. С. 41–44.
3. Якимов А. Н. Оценка допустимой погрешности конечно-элементной геометрической модели микроволновой антенны // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2022. Т. 1. С. 69–71.
4. Тюгашев А. А. Проблемы надежного интеллектуального управления сложными системами в режиме реального времени // Надежность и качество сложных систем. 2020. № 3. С. 28–36. doi:10.21685/2307-4205-2020-3-4

5. Мельничук А. И., Горячев Н. В., Юрков Н. К. К проблеме автоматизированного проектирования антенны Вивальди для излучения сверхширокополосного электромагнитного импульса // Надежность и качество сложных систем. 2021. № 1. С. 87–101. doi:10.21685/2307-4205-2021-1-9
6. Комаров В. А., Сарафанов А. В. Повышение качества наземной экспериментальной отработки бортовой радиоэлектронной аппаратуры систем управления космических аппаратов // Надежность и качество сложных систем. 2022. № 3. С. 61–69. doi:10.21685/2307-4205-2022-3-8
7. Rybakov I. M. Information System for Measuring Thermophysical Parameters of Electronic Appliances Based on Temperature Field Models // 19th Technical Scientific Conference on Aviation Dedicated to the Memory of N. E. Zhukovsky, TSCZh. 2022. P. 50–53. doi:10.1109/TSCZh55469.2022.9802495
8. Godnev A. G., Lysenko A. V., Yurkov N. K. [et al.]. A Technique for Designing a Wide-Band Capacitive Level Gauge for Automated Information and Measurement Petrochemical Accounting Systems // Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies, MWENT 2020 : proceedings (Moscow, March 11–13, 2020). Moscow, 2020. P. 9067435. doi:10.1109/MWENT47943.2020.9067435

References

1. Yakimov A.N. Evaluation of the influence of edge effects on microwave antenna radiation. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2020;1:31–33. (In Russ.)
2. Gorelov A.A., Diankov S.Yu., Posysaev E.I. Minimization of the composition of tests of military electronic equipment for the effects of aperiodic electromagnetic fields. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2021;2:41–44. (In Russ.)
3. Yakimov A.N. Estimation of the permissible error of a finite element geometric model of a microwave antenna. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2022;1:69–71. (In Russ.)
4. Tyugashev A.A. Problems of reliable intelligent control of complex systems in real time. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2020;(3):28–36. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2020-3-4
5. Mel'nychuk A.I., Goryachev N.V., Yurkov N.K. On the problem of computer-aided design of the Vivaldi antenna for ultra-wideband electromagnetic pulse radiation. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2021;(1):87–101. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2021-1-9
6. Komarov V.A., Sarafanov A.V. Improving the quality of ground-based experimental testing of onboard electronic equipment of spacecraft control systems. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2022;(3):61–69. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2022-3-8
7. Rybakov I.M. Information System for Measuring Thermophysical Parameters of Electronic Appliances Based on Temperature Field Models. *19th Technical Scientific Conference on Aviation Dedicated to the Memory of N.E. Zhukovsky, TSCZh*. 2022:50–53. doi:10.1109/TSCZh55469.2022.9802495
8. Godnev A.G., Lysenko A.V., Yurkov N.K. et al. A Technique for Designing a Wide-Band Capacitive Level Gauge for Automated Information and Measurement Petrochemical Accounting Systems. *Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies, MWENT 2020: proceedings (Moscow, March 11–13, 2020)*. Moscow, 2020:9067435. doi:10.1109/MWENT47943.2020.9067435

Информация об авторах / Information about the authors

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

Илья М. Рыбаков

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

**Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов /
The author declares no conflicts of interests.**

Поступила в редакцию/Received 17.03.2023

Поступила после рецензирования/Revised 06.04.2023

Принята к публикации/Accepted 01.05.2023

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИИ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

DESIGN AND TECHNOLOGY OF INSTRUMENTATION AND ELECTRONIC EQUIPMENT

УДК 621.77.01

doi:10.21685/2307-4205-2023-2-6

ТЕХНОЛОГИЯ ОБРАБОТКИ МЕДИ И МЕДНЫХ СПЛАВОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ

Д. В. Дерябин¹, Н. В. Горячев², Н. К. Юрков³

¹ Научно-исследовательский институт электронно-механических приборов, Пенза, Россия

^{2,3} Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

¹ niiemp@niiemp.ru, ² ra4foc@yandex.ru, ³ yurkov_NK@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Технология электромагнитных импульсов представляет собой бесконтактный импульсный процесс с большим потенциалом для соединения разнородных материалов. Этот метод использует импульсные электромагнитные поля для формирования и соединения металлов с высокой проводимостью, таких как алюминий или медь. Этот процесс позволяет выполнять соединения с геометрическим замыканием и с натягом за счет сжатия или расширения профильных структур сплавов с закрытым поперечным сечением, а также металлургических сварных швов. Несмотря на технологические преимущества и потенциал, было обнаружено лишь скромное внедрение в промышленное применение. Настоящая научная статья призвана раскрыть промышленный интерес и применимость технологии электромагнитных импульсов в различных подсекторах микроэлектронной промышленности, продвигая легкие и высокоточные инженерные компоненты. *Материалы и методы.* На основании численных и экспериментальных исследований электрические соединения медь–медь и медь–алюминий производятся методом электромагнитно-импульсной опрессовки. Определены основные параметры и проанализировано их влияние на процесс соединения и достижимую прочность соединения. Уделяется внимание разработке электромагнитных приводов. Применяются основы теории магнитной и импульсной сварки. *Результаты.* Даны выводы и указания по проектированию изготовления соединений по технологии электромагнитного импульса. Для численных исследований представлен упрощенный подход к моделированию. Этот несвязанный подход позволяет успешно разрабатывать процесс и конструкцию соединения для опрессовки электромагнитным импульсом. Указаны различные параметры сварки, обуславливающие разную морфологию поверхности, раздела с разной механической прочностью. Оценивается влияние поверхности оправки на качество соединения. *Выводы.* Экспериментально определены критерии свариваемости для соединений меди и алюминия. Оценивается влияние нескольких параметров процесса экспериментальной сварки, а именно: энергии разряда, зазоров и дырок с помощью разрушающих испытаний.

Ключевые слова: сварочное соединение, ударная сварка, электромагнитно-импульсная обжимка, магнитно-импульсная сварка, численное моделирование, проектирование соединений, формирование соединения

Для цитирования: Дерябин Д. В., Горячев Н. В., Юрков Н. К. Технология обработки меди и медных сплавов электромагнитными импульсами // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 2. С. 51–61. doi:10.21685/2307-4205-2023-2-6

PROCESSING OF COPPER AND METAL MELTS BY ELECTROMAGNETIC PULSES

D.V. Deryabin¹, N.V. Goryachev², N.K. Yurkov³

¹ Research Institute of Electronic and Mechanical Devices, Penza, Russia

^{2,3} Penza State University, Penza, Russia

¹ niiemp@niiemp.ru, ² ra4foc@yandex.ru, ³ yurkov_NK@mail.ru

Abstract. *Background.* Electromagnetic Pulse Technology (TEM) is a non-contact pulse process with great potential for connecting dissimilar materials. This method uses pulsed electromagnetic fields to form and connect metals with high conductivity, such as aluminum or copper. This process makes it possible to perform connections with geometric closure and tension due to compression or expansion of profile structures of alloys with a closed cross section, as well as metallurgical welds. Despite the technological advantages and potential, only a modest introduction into industrial applications has been found. This scientific article aims to reveal the industrial interest and applicability of electromagnetic pulse technology in various subsectors of the microelectronic industry, promoting lightweight and high-precision engineering components. *Materials and methods.* Based on numerical and experimental studies, copper-copper and copper-aluminum electrical connections are produced by electromagnetic pulse crimping. The main parameters are determined and their influence on the connection process and the achievable strength of the connection is analyzed. Attention is paid to the development of electromagnetic drives. The fundamentals of the theory of magnetic and pulsed welding are applied. *Results.* Conclusions and instructions on the design of the manufacture of compounds using electromagnetic pulse technology are given. A simplified approach to modeling is presented for numerical studies. This unrelated approach makes it possible to successfully develop the process and design of the connection for electromagnetic pulse crimping. Various welding parameters are indicated, which determine the different morphology of the surface, the section with different mechanical strength. The influence of the mandrel surface on the quality of the joint is evaluated. *Conclusions.* The weldability criteria for copper and aluminum compounds have been experimentally determined. The influence of several parameters of the experimental welding process, namely the discharge energy, gaps and holes, is evaluated using destructive tests.

Keywords: welding joint, impact welding, electromagnetic pulse crimping, magnetic pulse welding, numerical modeling, joint design, joint formation

For citation: Deryabin D.V., Goryachev N.V., Yurkov N.K. Processing of copper and metal melts by electromagnetic pulses. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2023;(2):51–61. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2023-2-6

Введение

В связи с повышенной тенденцией на высокоточную микроэлектронику необходимость в облегченных и обработанных конструкциях полупроводниковой техники особо актуальна. Разрабатываются новые системы материалов с улучшенными свойствами, уменьшенной толщиной и новыми комбинациями материалов, что приводит к значительным изменениям в сборочных операциях. Эффективные методы соединения необходимы для преодоления металлургической и термической несовместимости разнородных материалов, таких как медь, алюминий или алюминий–пластик, армированное волокно и т.д. Чтобы продемонстрировать возможности усовершенствованного процесса соединения/формования для преодоления трудностей, присущих комбинированию материалов разного типа и толщины, были изучены различные тематические исследования. В данной научной статье представлена всесторонняя теория о соединениях с натягом, геометрической посадкой и сварных соединениях, изготовленных с помощью технологии электромагнитных импульсов.

Технология электромагнитных импульсов (ТЕМИ) – это процесс с высокой скоростью деформации, который может быть гибким и экономичным дополнением или альтернативой обычному процессу листовой формовки или соединения металлов/сплавов. Этот бесконтактный метод использует импульсные магнитные поля для приложения сил к металлической заготовке, предпочтительно изготовленной из материала с высокой электропроводностью [1]. Принцип основан на физических эффектах, описанных Максвеллом, т.е. на временном изменении магнитного поля. Поле индуцирует электрические токи в близлежащих проводниках и дополнительно воздействует на эти проводники силой Лоренца (сила взаимодействия электромагнитного поля на заряженную частицу) (рис. 1) [2].

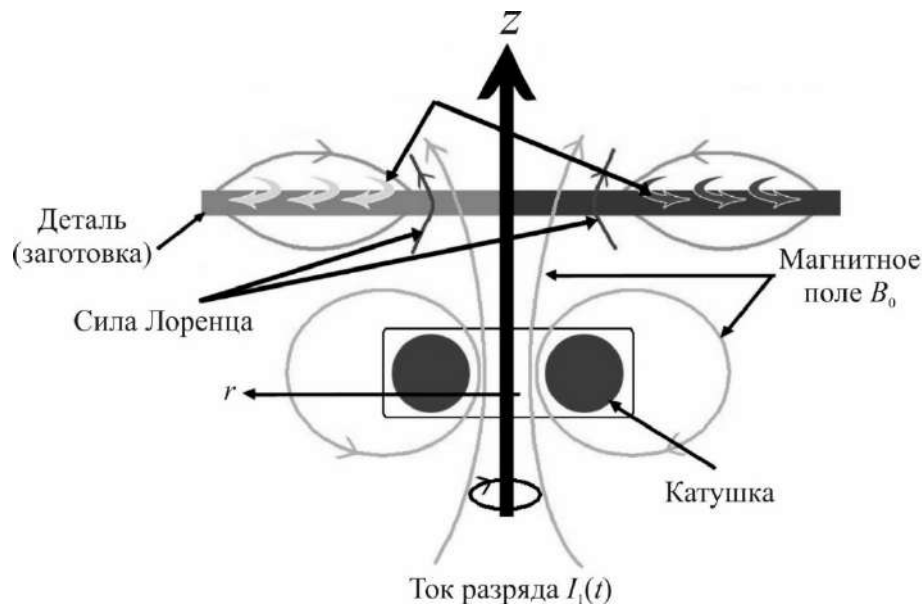


Рис. 1. Распространение силы Лоренца в пространстве

Энергия, необходимая для процесса, накапливается в конденсаторной батарее (с полной емкостью C), заряженной при начальном напряжении V_0 . Затем эта энергия разряжается в виде тока $I(t)$, что течет через катушку (плоскую спираль, винтовую и т.д.) с использованием высокоскоростных переключающих игнитронов. В результате этого разряда тока, который представляет собой сильно затухающую синусоидальную волну, нестационарное магнитное поле B_0 производится в катушке, которая проникает в заготовку, расположенную вблизи катушки. Это переходное магнитное поле B_0 индуцирует вихревые токи в заготовке, которые ограничивают проникновение магнитного поля B_0 в заготовку и для создания собственного наведенного магнитного поля в направлении, противоположном генерируемому в катушке B_0 . Отталкивающие магнитные поля B_0 и B_1 взаимодействуют между собой, в результате чего на заготовку действуют объемные силы, называемые силами Лоренца. Эти силы создают магнитное давление на заготовку. Если это магнитное давление выше, чем предел текучести заготовки, происходит динамическая деформация заготовки [3]. Деформацию заготовки можно оценить с помощью процесса формирования электромагнитных импульсов.

Формирование электромагнитных импульсов (ФЭИ) – это процесс, при котором преобразование заготовки является результатом действия сил Лоренца на деталь, следствием отталкивающего взаимодействия между нестационарным магнитным полем, создаваемым в катушке переходными токами, и магнитным полем, создаваемым в изделии. В зависимости от силы электромагнитного поля может использоваться ТЕМИ.

Далее рассмотрим основные технологические операции на основе ФЭИ.

Основные технологические операции с применением ФЭИ

Электромагнитная импульсная резка (ЭИР) – это процесс, который отличается от обычных процессов резки; при электромагнитно-импульсной резке заготовка не обрезается между двумя механическими инструментами. Текущий индуктор заменяет половину обычного режущего инструмента. В процессе части заготовки разгоняются, вследствие чего происходит деформация и происходит расслоение материала [4]. В зависимости от настройки формы и геометрии заготовки деталь может быть сжата, расширена или деформирована. С помощью специального штампа также можно выполнять операции перфорации.

Электромагнитно-импульсная сварка (ЭИС) представляет собой процесс холодной сварки в твердом состоянии, осуществляемый магнитным высокоскоростным ударом под малым углом между двумя металлическими поверхностями [5]. Этот процесс имеет тот же принцип работы, что и сварка взрывом [6], т.е. основан на столкновении частиц с высокой скоростью удара, в данном случае приводимыми в движение электромагнитной силой. Если условия правильные, т.е. скорость заготовки и угол точки столкновения, в зависимости от начального расстояния зазора между сопрягаемыми поверхностями и расстояния перекрытия между катушкой и деталью, струйная обработка

поверхностных слоев в точке столкновения между двумя склеиваемыми поверхностями возникает под действием силы удара, что приводит к эффективному сварному шву. При ударе естественно окисленные поверхности отрываются и выбрасываются за счет близкого угла удара и очень высоких скоростей. Поверхности, которые затем становятся вязкопластичными, прижимаются к тесному контакту магнитным давлением, что позволяет обмениваться валентными электронами и связываться на атомном уровне. Этот эффект позволил бы постоянно связывать сильно разнородные металлы. Следует отметить, что для ЭИС давления в точке соприкосновения сопрягаемых поверхностей имеют значения порядка 1 ГПа (индукционная сварка композитов использует давление около 1МПа) [7]. ЭИС различных металлов и сплавов обычно выполняется на геометрии сварки труб для таких компонентов, как топливные фильтры, капсулы высокого давления, приводные валы и т.д. Преимущества ЭИС включают: производство металлургической связки без образования швов и зазоров; имеет превосходное качество сварки с точки зрения сцепления материалов (для многих типов разнородных металлов) до уровня, при котором проблемы с коррозией в месте соединения могут быть решены вмешательством человека.

Электромагнитно-импульсный обжим (ЭМО) имеет аналогичные технологические особенности ЭИС, за исключением того, что внутренняя часть сборки заменяет матрицу, обычно используемую в ЭИР. При этом не ожидается оценка осевой формы подгонки заготовок или создание механических соединений по форме с помощью накатных или специально разработанных поверхностей, а также посредством вычислительной геометрии канавок на поверхности материала. Принцип работы ЭМО с деталью-заготовкой представлен на рис. 2.

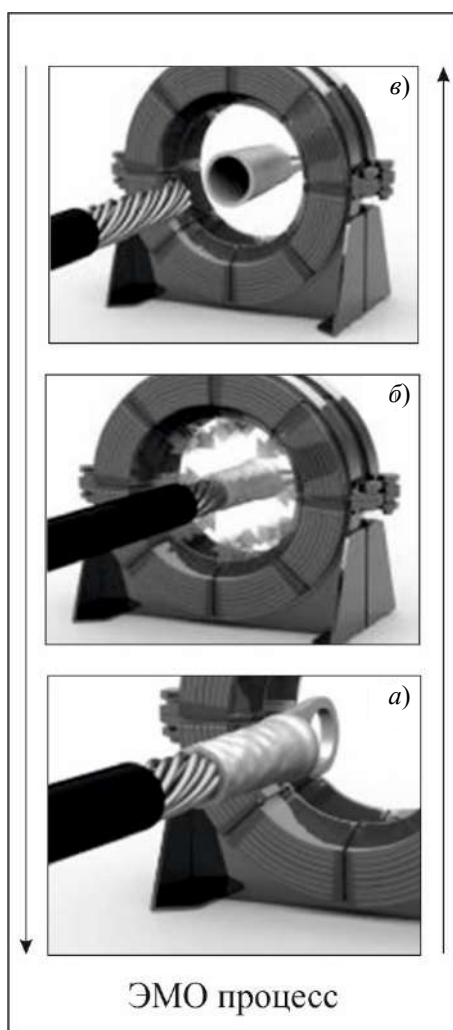


Рис. 2. Принцип работы ЭМО: *а* – ввод заготовки (материала); *б* – процесс деформации внешней заготовки (материала) относительно внутренней посредством электрического заряда; *в* – удаление заготовки (материала)

На рис. 2 ЭМО процесс представлен для снятия обжатия с алюминиевого кабельного наконечника поверх медного провода. Здесь магнитные силы генерируются концентрически по направлению к центру кольцеобразной катушки. Два соединительных элемента размещены внутри катушки. В результате разряда тока, который создает силы, необходимые для сжатия трубчатого конца соединителя, достигается механическая блокировка между материалами, что приводит к превосходному результату технологической операции [8].

Структура явления электромагнитного процесса. Описание физических особенностей

Основная идея, лежащая в основе электромагнитных процессов, состоит в том, что сильное магнитное поле индуцирует электрические токи в вязкопластичных электрических проводниках, в результате чего возникают силы Лоренца, вызывающие их деформацию. Электромагнитные процессы металлообработки могут быть описаны гармонической по времени магнитной формулой Максвелла.

Показав, что электрические токи могут влиять на стрелку компаса, Эрстед (1820 г.) доказал, что электрические и магнитные поля – это два взаимосвязанных физических явления. Позже Ампер, Фарадей и Гаусс разработали математические модели для описания электромагнитных явлений, которые легли в основу единой теории электродинамики, разработанной Джеймсом Клерком Максвеллом [9].

Первое уравнение Максвелла основано на работе, представленной Фарадеем, в которой показано, что изменяющееся во времени магнитное поле B всегда сопровождается изменяющимся в пространстве неконсервативным электрическим полем E , и наоборот:

$$\nabla E = \frac{\partial B}{\partial t}, \quad (1)$$

где t представляет время и символ ∇ – оператор скручивания.

Гауссовский закон электричества, более известный как второе уравнение Максвелла, утверждает, что плотность электрического потока D через любую замкнутую поверхность, пропорциональна заключенному электрическому заряду Q . Если заряд Q непрерывно распределяется по объему, Гауссовский закон будет даваться следующим уравнением:

$$\nabla D = \rho, \quad (2)$$

где ρ – плотность заряда (кулоны на кубический метр).

Основная идея закона Ампера – Максвелла или же его третьего уравнения состоит в том, что электрический ток или изменяющийся электрический поток через поверхность создает циркулирующее магнитное поле вокруг любого пути, ограничивающего эту поверхность. Другими словами, Максвелл исправил закон Ампера, заявив, что магнитные поля могут создаваться двумя способами: электрическим током (это был первоначальный «закон Ампера») и изменением магнитного поля (поправка Максвелла) [10]. Модификация Максвелла к закону Ампера очень важна: она показывает, что не только изменяющееся магнитное поле индуцирует электрическое поле, но и изменяющееся электрическое поле индуцирует магнитное поле. Тогда дифференциальное уравнение, приписываемое Амперу – Максвеллу, имеет вид

$$\nabla H = J, \quad (3)$$

где H является магнитной напряженностью поля; J – плотность электрического тока.

Четвертое уравнение Максвелла связано со свойствами магнитного потока. Магнитные полюса встречаются в природе всегда как равные и противоположные пары. Источниками магнитного поля являются токи или движущиеся заряды. Фактически можно утверждать, что электрический заряд является первоисточником электрических и магнитных полей; следовательно, магнетизм является результатом электрически заряженных частиц. Поскольку магнитных зарядов не существует, линии магнитного потока должны быть замкнутыми. Все линии, входящие в замкнутую поверхность, должны также выходить из нее. Этот постулат приводит к формулировке четвертого уравнения Максвелла, которое можно выразить следующим образом: поскольку поле колеблется с одной фиксированной частотой, векторное преобразование дает стационарное уравнение, которое решается для амплитуды и фазы A . Это преобразование задается следующими уравнениями, где a – комплексное число:

$$A = \text{Re}[a(\cos \omega t + j \sin \omega t)] = \text{Re}[ae^{j\omega t}]. \quad (4)$$

Подставляя в уравнение (4) и разделив комплексный член, можно получить уравнение, которое решает гармонические во времени магнитные задачи, учитывая, что магнитная проницаемость μ постоянна для гармонических задач:

$$\nabla \left(\frac{1}{\mu(B)} \nabla a \right) = -j + j \sin \omega t - \nabla V . \quad (5)$$

Отметим, что решение такого набора дифференциальных уравнений в частных производных подразумевает знание нескольких свойств цепи и материала. Входной ток и частота могут быть рассчитаны или измерены. Для расчетов предположим, что система электромагнитных импульсов может быть описана эквивалентной электрической схемой. Она состоит из первичного колебательного контура, соединенного со вторичной LR -цепью (рис. 3).

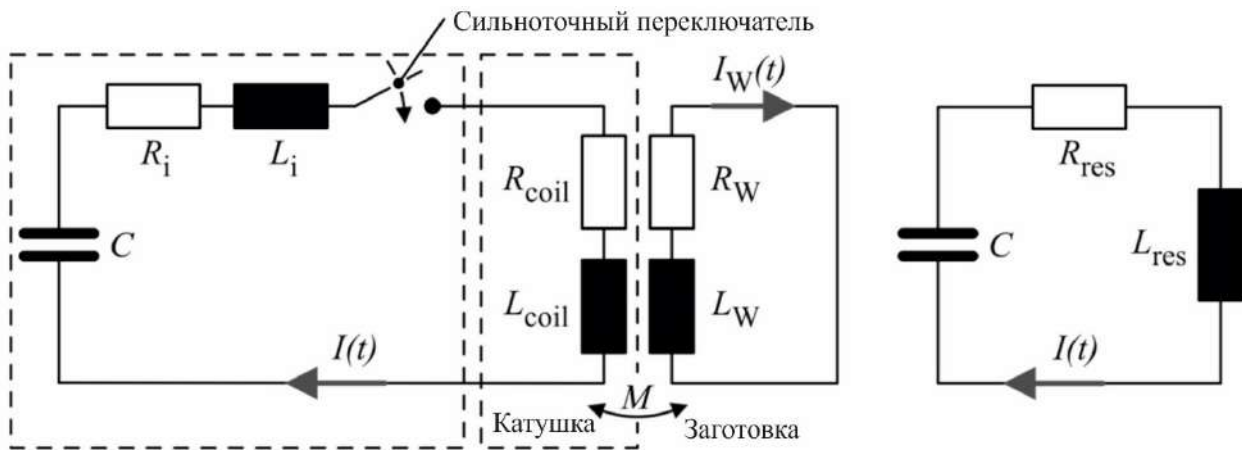


Рис. 3. Эквивалентная схема колебательного контура установки для работы с электромагнитной импульсной технологией

Такая схема может быть описана следующими дифференциальными уравнениями:

$$(L_1 + L_c) \frac{dI_1(t)}{dt} + M \frac{dI_2(t)}{dt} + (R_1 + R_c) I_1(t) + \frac{1}{C} \int I_1(t) dt = 0 , \quad (6)$$

$$\frac{d(L_2 I_2)}{dt} + \frac{d(M I_1)}{dt} + R_2 I_2 = 0 , \quad (7)$$

где C – значение емкости конденсаторной батареи (приведенные данные), $I_1(t)$ и $I_2(t)$ – ток катушки и наведенный вихревой ток в изделии соответственно, L_1 и R_1 – индуктивность и сопротивление катушки, L_2 и R_2 – индуктивность и сопротивление детали, L_c и R_c – индуктивность и сопротивление соединительного провода, M – общая взаимная индуктивность между катушкой и деталью. Эти уравнения важны для получения тока разрядной катушки ($I_1(t)$) и наведенный вихревой ток ($I_2(t)$), который протекает через заготовку [11]. Уравнения (6) и (7) можно решить, используя начальные условия, заданные формулами

$$I_1 = 0, (L_1 + L_c) \frac{dI_1(t)}{dt} = V_0 , \quad (7)$$

$$I_2 = 0 , \quad (8)$$

где V_0 – напряжение разряда. Параметры, такие как индуктивность и сопротивление катушки, можно рассчитать математически, зная ее геометрию и исходный материал. Разрядный ток $I_1(t)$, протекающий в катушке, можно приближенно описать следующим уравнением:

$$I_1(t) = I_0 e^{-\frac{t}{\tau} \sin \omega t} \quad (9)$$

с I_0 максимальной силой тока, ω текущей частотой и τ коэффициентом демпфирования, характеризующим экспоненциальный спад разрядного тока.

Такие параметры могут быть рассчитаны:

$$I_0 = V_0 \sqrt{\frac{C}{L_t}}; \quad (10)$$

$$\tau = \frac{2L_t}{R_t}; \quad (11)$$

$$\omega = \sqrt{\left(\frac{1}{\sqrt{L_t C}}\right)^2 + \left(\frac{1}{\tau}\right)^2}. \quad (12)$$

Катушка является инструментом в электромагнитных соединительных процессах. Инструментальная катушка отвечает за проведение тока и, следовательно, за установление временного локального распределения магнитного поля и давления.

Существуют одноразовые и постоянные катушки [12]. Одноразовые катушки представляют собой обмотки, изготовленные из медных проводов, для экспериментальных работ или технико-экономических испытаний. Постоянные катушки необходимы для многократного производства в промышленных целях. Конструкция и выбор материала для постоянных катушек намного сложнее, чем для одноразовых катушек.

В соответствии с работой [12], катушка должна обеспечивать высокий коэффициент преобразования, отношение энергии батареи конденсаторов к работе деформации заготовки, высокую механическую стойкость, оптимальную частоту разрядного тока, устойчивость к электрическим перенапряжениям, надежное подключение к машине и простоту конструкции.

Во время экспериментов с электромагнитным импульсом катушка инструмента подвергается экстремальным нагрузкам. Действуют силы Лоренца, развиваемые при деформации заготовки, как силы реакции на катушку. Электромагнитный привод должен поглощать эти противоположные силы реакции, а также силы между витками обмотки без какой-либо деформации. Кроме того, из-за импульсов высокого тока катушка должна выдерживать электрические и тепловые нагрузки.

При этом эффективность многovitковой катушки обычно выше, чем у одновитковой. Тем не менее благодаря высокой прочности однослойные одновитковые катушки широко используются для операций по ТЕМИ, когда целью является обжатие заготовок.

С точки зрения материала, хорошая электропроводность и высокая механическая стойкость к импульсным нагрузкам и тепловым ударам требуются независимо от геометрии катушки. Медно-бериллиевые сплавы, циркониевая и кадмиевая медь, вольфрам-молибден и даже сталь используются для изготовления электромагнитных инструментов для операций по ТЕМИ [13]. Используя модель невязкой жидкости для оценки импульса в зависимости от скорости столкновения и угла, оценим область для успешного сварного шва. Вместо использования интерфейса волна/отсутствие волны в качестве критерия предложим возникновение шов/отсутствие шва и есть реакция/нет реакции (рис. 4).

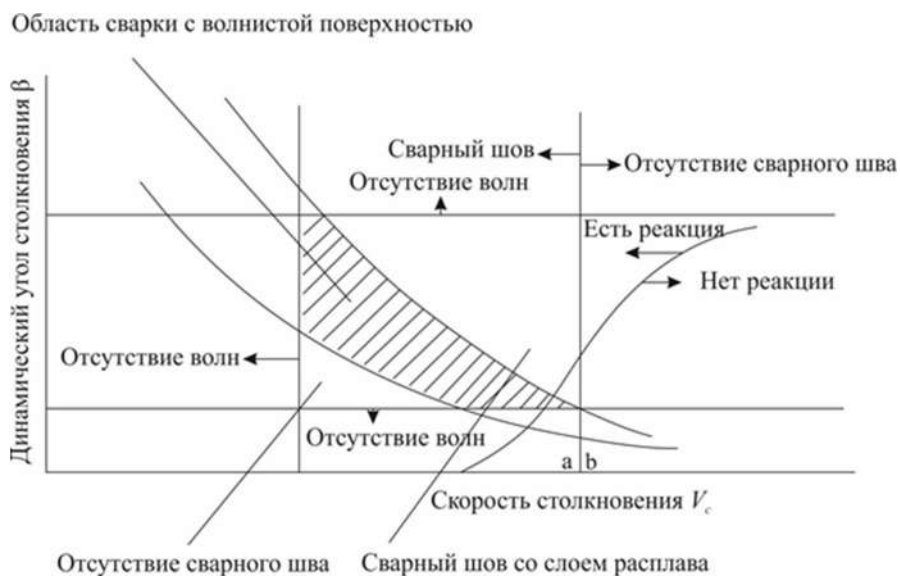


Рис. 4. Общее окно свариваемости для заготовки по ТЕМИ

Правая граница соответствует образованию волны в точке столкновения, что необходимо для склеивания материалов. Поверхностная обработка и, следовательно, сварка происходят слева от этой границы. Эта правая граница ограничена максимальной скоростью, допустимой в точке столкновения. Делаем вывод, что скорость V_c в точке столкновения должна быть меньше скорости звука соединяемых материалов и, с другой стороны, максимальная скорость зависит от динамического угла столкновения β :

$$v_c = \frac{\beta}{10} + 5,5. \quad (13)$$

Левая граница связана со скоростью, при которой волны еще формируются на границе раздела материалов. Предположим, что эти границы могут быть заданы следующим образом:

$$v_c = \left[\left(\frac{2 \operatorname{Re}(H_{v,p} + H_{v,f})}{\rho_p + \rho_f} \right) \right]^{1/2}, \quad (14)$$

где ρ_p и ρ_f – это плотность основной и летучей пластин; $H_{v,p}$ и $H_{v,f}$ – твердость по Виккерсу; Re – критическое число Рейнольдса.

Исходя из расчетов предположим, что, как и правая граница, минимальная скорость образования волны также зависит от угла падения, а это означает, что она не должна быть прямой вертикальной линией [14].

Согласно уравнениям (12) и (13) нижняя граница должна быть переопределена таким образом, чтобы достигаемое ударное давление в точке столкновения превышало предел текучести материалов, чтобы способствовать пластической деформации и волнообразованию. Этот предел можно определить по приведенному ниже соотношению, где константа k принимает значения между 0,6 для пластин с чистой поверхностью и 1,2 для плохо очищенных поверхностей:

$$\sin \beta = k \sqrt{\frac{H_v}{\rho V_c^2}}. \quad (15)$$

Уравнение (15) можно записать в другом виде для такой же границы с учетом уравнений (13) и (14):

$$v_c = \frac{v_p}{2 \sin\left(\frac{\beta}{2}\right)}, v_p = 1,14 \sqrt{\frac{H_v}{\rho}}. \quad (16)$$

Что касается верхнего предела окна сварки, то он соответствует максимальной скорости удара, которая позволяет избежать образования межфазного расплавленного слоя, и может быть определен как

$$\sin\left(\frac{\beta}{2}\right) = \frac{1}{2N} \frac{(T_m C_0)^{1/2}}{V_c^2} \left(\frac{K C_p C_b}{\rho h} \right). \quad (17)$$

Поскольку механизмы образования струй и волн до конца не ясны, реальные пределы сварки, достигнутые экспериментальной проверкой, могут не совпадать с теоретическими границами, рассчитанными по предлагаемым подходам.

Заключение

На основании доступной литературы дальнейшее использование технологии электромагнитных импульсов в качестве инструмента для соединения нескольких материалов было ограничено различными открытыми вопросами, которые демонстрируют необходимость дальнейших исследований. Тематические исследования и подробности о фиксированных параметрах процесса соединения, конструкции деталей, геометрии соединения, затрат и общих преимуществ в производительности почти всегда неизвестны [15]. Продемонстрировать возможности усовершенствованного процесса соединения

для преодоления трудностей, присущих комбинированию материалов разнородного типа (металл/композит, черный/цветной металл, медь/алюминий), по-прежнему необходимо для проведения углубленного анализа всех критических этапов процесса для реальных тематических исследований.

Тем не менее практически доказана эффективность ТЕМИ, которая заключается в отсутствии необходимости в дополнительной подготовке или очистке поверхности.

Список литературы

1. Иванов В. И., Поддубняк В. Я. Об определении энергетических параметров процесса электроискровой обработки металлических поверхностей // Технологии упрочнения, нанесения покрытий и ремонта: теория и практика : материалы 16-й Междунар. науч.-практ. конф. (Санкт-Петербург, 15–18 апреля 2014). СПб. : Изд-во Политехн. ин-та, 2014. Ч. 2. С. 64–67.
2. Гитлевич А. Е., Михайлов В. В., Парканский Н. Я., Ревуцкий В. М. Электроискровое легирование металлических поверхностей. Кишинев : Штиинца, 1985. 196 с.
3. Бурумкулов Ф. Х., Лезин П. П., Сенин П. В. [и др.]. Электроискровые технологии восстановления и упрочнения деталей машин и инструментов (теория и практика). Саранск : Красный Октябрь, 2003. 504 с.
4. Иванов В. И., Бурумкулов Ф. Х. Состояние и развитие электроискровых технологий и оборудования в России и за рубежом // Труды ГОСНИТИ. 2012. № 109. С. 127–139.
5. Рыбалко А. В., Симинел А. В., Сахин О. Электроискровое легирование изоэнергетическими импульсами тока различной формы // Металлообработка. 2003. № 1. С. 18–23.
6. Иванов В. П., Ивашко В. С., Константинов В. М. [и др.]. Восстановление и упрочнение деталей : справочник. М. : Наука и технологии, 2013. 367 с.
7. А. с. 89933 (СССР). Способ нанесения металлических покрытий / Лазаренко Б. Р. Опубл. в БИ. 1951. № 12.
8. Лазаренко Н. И. Технологический процесс изменения исходных свойств металлических поверхностей электрическими импульсами. Электроискровая обработка металлов. М. : Изд-во АН СССР, 1960. Вып. 2. С. 26–66.
9. Жумабаева А. С., Айжариков К. А., Бикеев Р. Р. Математическая обработка информации параметров излучения подвижного объекта // Надежность и качество сложных систем. 2015. № 3. С. 99–104.
10. Затылкин А. В., Калашников В. С., Телегин А. М. Методика оценки эффективности виброзащиты РЭС с применением интегрального критерия неэффективности виброизолятора // Надежность и качество сложных систем. 2015. № 4. С. 65–72.
11. Дедков В. К., Северцев Н. А. Косвенные методы прогнозирования надежности. М. : ВЦ им. Дородницына РАН, 2006. 272 с.
12. Литвинов А. Н., Юрков Н. К. Моделирование напряженно-деформированного состояния в слоистых структурах РЭС при технологических и эксплуатационных воздействиях // Надежность и качество сложных систем. 2013. № 3. С. 16–22.
13. Паршуков М. Ю., Светлов А. В., Комаров В. В., Сапунов Е. В. Методики входного контроля параметров операционных усилителей // Надежность и качество сложных систем. 2014. № 2. С. 56–61.
14. Увайсов С. У., Сулейманов С. П., Юрков Н. К. Метод теплового диагностирования латентных технологических дефектов радиоэлектронной аппаратуры и ее тепловая диагностическая модель // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2013. № 4. С. 109–118.
15. Tsyplin B. V., Yurkov N. K. Diagnostics of Integrated Operational Amplifiers Mounted on Circuit Boards Measurement Techniques. N.Y. : Springer, 2002. Vol. 45, № 2. P. 210–213.

References

1. Ivanov V.I., Poddubnyak V.Ya. On determining the energy parameters of the process of electric spark treatment of metal surfaces. *Tekhnologii uprochneniya, naneseniya pokrytiy i remonta: teoriya i praktika: materialy 16-y Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. (Sankt-Peterburg, 15–18 aprelya 2014) = Technologies of hardening, coating and repair: theory and practice : materials of the 16th International scientific and practical conference. (St. Petersburg, April 15-18, 2014)*. Saint Petersburg: Izd-vo Politekhn. in-ta, 2014;2:64–67. (In Russ.)
2. Gitlevich A.E., Mikhaylov V.V., Parkanskiy N.Ya., Revutskiy V.M. *Elektroiskrovoe legirovanie me-tallicheskih poverkhnostey = Electric spark alloying of metal surfaces*. Kishinev: Shtiintsa, 1985:196. (In Russ.)
3. Burumkulov F.Kh., Lezin P.P., Senin P.V. et al. *Elektroiskrovoye tekhnologii vosstanovleniya i uprochneniya detaley mashin i instrumentov (teoriya i praktika) = Electric spark recovery and hardening technologies of machine parts and tools (theory and practice)*. Saransk: Krasnyy Oktyabr', 2003:504. (In Russ.)
4. Ivanov V.I., Burumkulov F.Kh. The state and development of electric spark technologies and equipment in Russia and abroad. *Trudy GOSNITI = Proceedings of GOSNITI*. 2012;(109):127–139. (In Russ.)
5. Rybalko A.V., Siminel A.V., Sakhin O. Electric spark alloying by isoenergetic current pulses of various forms. *Metallrobrabotka = Metalworking*. 2003;(1):18–23. (In Russ.)

6. Ivanov V.P., Ivashko V.S., Konstantinov V.M. et al. *Vosstanovlenie i uprochnenie detaley: spravochnik = Restoration and hardening of parts : handbook*. Moscow: Nauka i tekhnologii, 2013:367. (In Russ.)
7. A. s. 89933 (SSSR). *Sposob naneseniya metallicheskih pokrytiy = A. S. 89933 (USSR). Method of applying metal coatings*. Lazarenko B.R. publ. in BI. 1951;(12). (In Russ.)
8. Lazarenko N.I. *Tekhnologicheskiy protsess izmeneniya iskhodnykh svoystv metallicheskih poverkhnostey elektricheskimi impul'sami. Elektroiskrovaya obrabotka metallov = Technological process of changing the initial properties of metal surfaces by electric pulses. Electric spark processing of metals*. Moscow: Izd-vo AN SSSR, 1960;(2):26–66. (In Russ.)
9. Zhumabaeva A.S., Ayzharikov K.A., Bikeev R.R. Mathematical processing of information about radiation parameters of a mobile object. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2015;(3):99–104. (In Russ.)
10. Zatytkin A.V., Kalashnikov V.S., Telegin A.M. Methodology for evaluating the effectiveness of RES vibration protection using the integral criterion of vibration isolator inefficiency. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2015;(4):65–72. (In Russ.)
11. Dedkov V.K. Severtsev N.A. *Kosvennye metody prognozirovaniya nadezhnosti = Indirect methods of reliability forecasting*. Moscow: VTs im. Dorodnitsyna RAN, 2006:272. (In Russ.)
12. Litvinov A.N., Yurkov N.K. Modeling of the stress-strain state in layered structures of RES under technological and operational impacts. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2013;(3):16–22. (In Russ.)
13. Parshukov M.Yu., Svetlov A.V., Komarov V.V., Sapunov E.V. Methods of input control of parameters of operational amplifiers. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2014;(2):56–61. (In Russ.)
14. Uvaysov S.U., Suleymanov S.P., Yurkov N.K. Method of thermal diagnostics of latent technological defects of radioelectronic equipment and its thermal diagnostic model. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = News of higher educational institutions. Volga region. Technical sciences*. 2013;(4):109–118. (In Russ.)
15. Tsyplin B.V., Yurkov N.K. *Diagnostics of Integrated Operational Amplifiers Mounted on Circuit Boards Measurement Techniques*. New York: Springer, 2002;45(2):210–213.

Информация об авторах / Information about the authors

Денис Викторович Дерябин

заместитель генерального директора по производству,
 Научно-исследовательский институт электронно-механических приборов (Россия, г. Пенза, ул. Каракозова 44)
 E-mail: niiemp@niiemp.ru

Николай Владимирович Горячев

кандидат технических наук,
 доцент кафедры конструирования и производства радиоаппаратуры,
 Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
 E-mail: ra4foc@yandex.ru

Николай Кондратьевич Юрков

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

Denis V. Deryabin

Deputy production general manager,
 Research Institute of Electronic and Mechanical Devices
 (44 Karakozova street, Penza, Russia)

Nikolay V. Goryachev

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 27.03.2023

Поступила после рецензирования/Revised 31.03.2023

Принята к публикации/Accepted 03.05.2023

МЕТОДЫ ОПЕРАТИВНОЙ ОЦЕНКИ И ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИЦЕЛЬНО-НАВИГАЦИОННЫХ КОМПЛЕКСОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ СРЕДСТВ ОБЪЕКТИВНОГО КОНТРОЛЯ (часть 1)

Ю. Т. Зырянов

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия
zut-tmb@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Опыт учебно-боевой подготовки и боевого применения оптико-электронных прицельно-навигационных комплексов (ОЭПрНК) самолетов тактической авиации (ТА) в локальных войнах и конфликтах показывает, что их готовность и эффективность существенно зависят от точностных характеристик (ТХ), в частности, от точности юстировки входящих в их состав подсистем. В наибольшей мере это относится к визирным устройствам (ВУ) и датчикам. Цель работы – разработка методов оперативной оценки и обеспечения ТХ ОЭПрНК с использованием данных средств объективного контроля (СОК) на основе адаптивного управления профилактикой в межрегламентный период эксплуатации с учетом функциональных и конструктивных особенностей, внедрения концепции технического обслуживания (ТО) по состоянию с контролем параметров, адекватной эксплуатационным свойствам ОЭПрНК. *Материалы и методы.* Для достижения поставленной цели использованы методы математического моделирования, теории вероятностей и математической статистики, методы интегрального и дифференциального исчисления, методы анализа иерархий, методы группового учёта аргументов. *Результаты и выводы.* Разработанные новые методы контроля точности юстировки ВУ ОЭПрНК в полете, новизна которых подтверждена соответствующими патентами на способы их реализации, позволяют повысить готовность ОЭПрНК к применению, снизить трудозатраты на обеспечение ТХ в межрегламентный период эксплуатации в целом на порядок, а также повысить интегральную точность юстировки примерно в 3 раза.

Ключевые слова: точностные характеристики, организационно-техническая система, средства объективного контроля, техническое состояние, летные эксперименты, визирные устройства, «визуальная коррекция», погрешности юстировки лазерного и визирного каналов

Для цитирования: Зырянов Ю. Т. Методы оперативной оценки и обеспечения точностных характеристик оптико-электронных прицельно-навигационных комплексов с использованием данных средств объективного контроля (часть 1) // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 2. С. 62–71. doi:10.21685/2307-4205-2023-2-7

METHODS OF OPERATIONAL EVALUATION AND ENSURING THE ACCURACY CHARACTERISTICS OF OPTO-ELECTRONIC SIGHTING AND NAVIGATION COMPLEXES USING THESE OBJECTIVE CONTROL TOOLS (Part 1)

Yu.T. Zyryanov

Tambov State Technical University, Tambov, Russia
zut-tmb@mail.ru

Abstract. *Background.* The experience of combat training and combat use of optical-electronic sighting and navigation systems (OEPrNK) of tactical aircraft (TA) in local wars and conflicts shows that their readiness and effectiveness significantly depend on accuracy characteristics (TC), in particular, on accuracy adjustment of their constituent subsystems. To the greatest extent, this applies to sighting devices (VU) and sensors. Goal of the work – development of methods for operational assessment and provision of technical characteristics of the OEPrNK using these means of objective control (SOC) based on adaptive management of prevention in the interregional period of operation, taking into account the functional and design features, the introduction of the concept of maintenance (TO) according to the state with the control of parameters that is adequate to the operational properties of the OEPrNK. *Materials and methods.*

To achieve this goal, methods of mathematical modeling, probability theory and mathematical statistics, methods of integral and differential calculus, the method of analysis of hierarchies, the method of group accounting of arguments were used. *Results and conclusions.* The developed new methods for controlling the accuracy of the adjustment of the OEPPrNK VU in flight, the novelty of which is confirmed by the corresponding patents for the methods of their implementation, make it possible to increase the readiness of the OEPPrNK for use, reduce labor costs for providing technical characteristics in the interregional period of operation as a whole by an order of magnitude, and also increase the integral accuracy of adjustment by about 3 times.

Keywords: accuracy characteristics, organizational and technical system, means of objective control, technical condition, flight experiments, sighting devices, "visual correction", adjustment errors of the laser and sighting channels

For citation: Zyryanov Yu.T. Methods of operational evaluation and ensuring the accuracy characteristics of opto-electronic sighting and navigation complexes using these objective control tools (part 1). *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2023;(2):62–71. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2023-2-7

Введение

Существующая система технической эксплуатации (ТЭ) предъявляет высокие требования к организации и проведению профилактических мероприятий, направленных на поддержание вооружения и военной техники (ВВТ) в постоянной готовности к эффективному боевому применению. Профилактические мероприятия охватывают широкий круг задач технического и организационно-технического характера. Это приводит к необходимости рассматривать человека в качестве одного из элементов сложных технических систем и, как следствие, к необходимости выделения особого подкласса искусственных систем – организационно-технических систем (ОТС), являющихся объединением организационных и технических систем. Наличие в ОТС технической составляющей и обслуживающего персонала в значительной степени определяет их неоднородность и усложняет моделирование систем такого класса. Изучение путей решения этой проблемы привело к выделению важного и отчасти самостоятельного направления теории эксплуатации – управления профилактикой в ОТС [1].

Опыт учебно-боевой подготовки и боевого применения оптико-электронных прицельно-навигационных комплексов (ОЭПрНК) самолетов тактической авиации (ТА) в локальных войнах и конфликтах показывает, что их готовность и эффективность существенно зависят от точностных характеристик (ТХ), в частности, от точности юстировки входящих в их состав подсистем. В наибольшей мере это относится к визирным устройствам (ВУ) и датчикам. Известные методы оценки ТХ, способы юстировки и компенсации погрешностей подсистем ОЭПрНК трудоемки и продолжительны по времени. Кроме того, многообразие и стохастический характер воздействия эксплуатационных факторов на подсистемы ОЭПрНК приводят к тому, что при одной и той же наработке или продолжительности эксплуатации они имеют различные ТХ. В связи с этим наработка или календарный срок службы не характеризуют однозначно ТХ ОЭПрНК, что определяет актуальность разработки методов оперативной оценки ТХ и компенсации выявленных погрешностей в межрегламентный период эксплуатации. Основными требованиями к организации профилактики ОЭПрНК являются плановость, адаптивность к различным условиям эксплуатации, учет состояния и возможность распределения ограниченных ресурсов ОТС. Однако существующая организация планирования и управления профилактикой в ОТС имеет ряд недостатков как организационного, так и технического характера [2, 3]. Это затрудняет обеспечение эффективного выполнения профилактических работ (ПР) в условиях функционирования ОТС при эксплуатации АТ по ресурсу и при методах эксплуатации, учитывающих уровень надежности ОЭПрНК. При этом необходимо отметить, что ни один метод эксплуатации не реализуется без проведения профилактики, и каждый из них имеет свою специфику при определении сроков и объемов ПР [4]. Это определяет актуальность задачи планирования и управления профилактикой в ОТС. Цель управления профилактикой в ОТС можно сформулировать следующим образом: обеспечение заданного уровня надежности и эффективности применения ОЭПрНК при минимальных затратах на эксплуатацию. Полученные до настоящего времени результаты дают возможность решать отдельные вопросы управления как организационными, так и техническими составляющими ОТС. Однако они не обеспечивают в требуемом объеме комплексного подхода к управлению профилактикой с учетом функциональных и конструктивных особенностей ОЭПрНК, состояния и возможностей распределения ограниченных ресурсов ОТС, внедрения концепции технического обслуживания (ТО) по состоянию с контролем параметров, адекватной их эксплуатационным свойствам. Поэтому важной

как в военно-научном, так и эксплуатационно-техническом аспекте является проблема повышения готовности и эффективности применения ОЭПрНК самолетов ТА при минимизации затрат на техническое обслуживание в межрегламентный период эксплуатации.

Цель работы. Разработка методов оперативной оценки и обеспечения ТХ ОЭПрНК с использованием данных СОК на основе адаптивного управления профилактикой в межрегламентный период эксплуатации с учетом функциональных и конструктивных особенностей, внедрения концепции технического обслуживания по состоянию с контролем параметров, адекватной эксплуатационным свойствам ОЭПрНК.

В результате проведенного анализа состояния проблемы исследования предложена концептуальная модель решения проблемы, в которой известная структура ОТС (рис. 1) имеет новый вид (рис. 2).

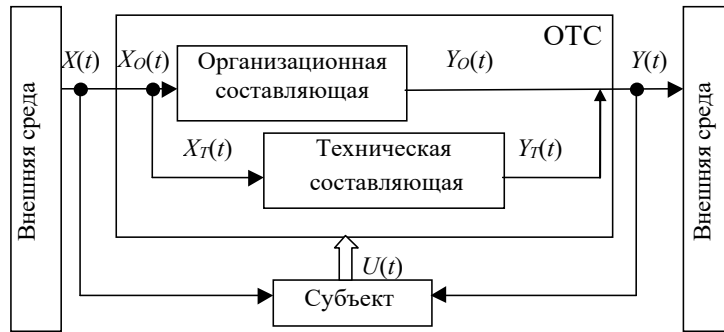


Рис. 1. Известная структура ОТС

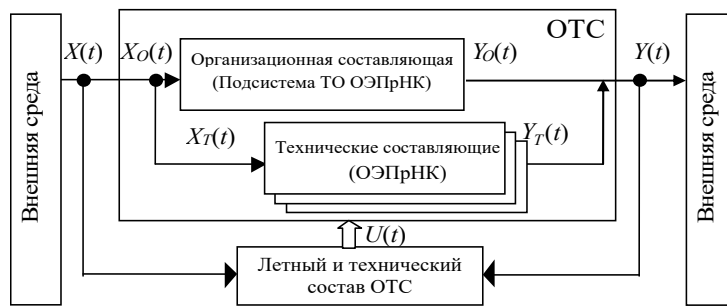


Рис. 2. Модифицированная структура ОТС

Формализованная постановка задачи

Рассматриваемая техническая составляющая как объект контроля представляет собой совокупность функциональных устройств различных по назначению, составу и принципам функционирования. Процесс контроля связан с подачей на объект стимулирующих сигналов, изменением реакций, обработкой информации по алгоритмам для получения значений контролируемых параметров. Параметры технической составляющей являются случайными величинами вследствие технологического разброса элементов и воздействия внешних факторов. Особенностью наблюдаемых при контроле сигналов является наличие в их составе помех, источником которых служит сам объект контроля, внешняя среда и др. Как правило, помехи представляют собой случайный процесс, нелинейно зависящий от измеряемых параметров. Таким образом, в общем случае имеется нелинейная динамическая система $A(V, t)$, состояние которой характеризуется p -мерным случайным вектором V . На вход системы A поступает случайный сигнал X . Наблюдается только выходной сигнал системы Y , который совместно с вектором X является зависимым случайным вектором:

$$Y(t) = A(V, t)X(t). \tag{1}$$

Входные и выходные сигналы – векторы, имеющие соответствующие размерности:

$$X(t) = (x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t))^T; Y(t) = (y_1(t), y_2(t), \dots, y_m(t))^T.$$

Входные сигналы $X(t)$ включают в себя полезную составляющую $g(t)$ и помеху $\zeta(t)$. Оператор $A(V, t)$ зависит от времени t и вектора ТХ $V = (v_1, v_2, \dots, v_p)^T$, отражающего техническое состояние (ТС) контролируемой системы. Закон изменения случайного вектора V , характеризующего ТХ системы, в общем случае может быть описан выражением вида

$$V(t) = f_v(V, U_v, N, t) \quad (2)$$

с начальными условиями $V(t_0)$, шумами N и ограничением на управление $U_v \in \vartheta$. При этом существует однозначное отображение

$$\Phi_v : \{Y\} \times [t_0, t_k] \rightarrow \{\hat{V}\} \times [t], \quad (3)$$

где $\{Y\}$ – множество значений вектора наблюдений; $\{\hat{V}\}$ – множество значений вектора результатов оценок ТХ системы; Φ_v – однозначное отображение элементов Y в элементы V ; $[t_0, t_k]$ – интервал наблюдения.

Имея априорные сведения о векторе $V(t)$ (2) и располагая наблюдениями $Y(t)$, требуется определить оценку $\hat{V}(t)$ в виде $\hat{V}(t) = f_v(Y, U_v, t)$ с заданными начальными условиями. Начальными условиями для решения задачи являются: известный вектор наблюдений $Z(t)$ на интервале $[t_0, t_k]$; принятые ограничения на управление U_v ; априорные сведения о виде оператора A .

При данной постановке задачи искомая оценка $\hat{V}(t)$ будет представлять собой вектор-функцию изменения физических параметров функционирования системы, измеряемых непосредственно или косвенно, либо функцию некоего обобщенного критерия качества, являющегося абстрактной n -размерной проекцией m -размерного вектора ТС. Применительно к задаче оценки вектора ТХ ОЭПрНК по данным СОК, научная задача исследования заключается в разработке такого метода и алгоритма обработки вектора выходных сигналов, использование которых позволило бы оценить ТХ ОЭПрНК при его функционировании в реальных условиях применения по назначению.

Результаты исследований

При разработке информационно-моделирующей системы (ИМС) экспресс-анализа данных СОК для оценки ТХ ОЭПрНК проведено обоснование проблемной области применительно к поставленной задаче. В состав проблемной области входят ТХ ОЭПрНК, условия выполнения рассматриваемых режимов функционирования и условия воздействия внешней среды.

Исходя из проведенной классификации боевых и навигационных режимов, рассмотрены два режима, в которых в качестве основных информативных устройств ОЭПрНК используются ВУ. Это режим «ВК» счисленных координат и один из режимов слежения за наземной неподвижной целью (мишенью) с фиксированным углом прицеливания.

Проведенный анализ алгоритмического обеспечения показал, что информация о параметрах полета в исследуемых режимах, фиксируемая СОК, является достаточной для построения уравнений связей между величинами, характеризующими погрешности функционирования ОЭПрНК, и может применяться как дополнительный информационный критерий в системе оперативного поддержания ТХ в межрегламентный период эксплуатации. Однако такая информация представляется только в момент привязки и слежения за целью (мишенью) или при выполнении режима «ВК» (нажатия кнопки), поэтому для восстановления зависимости погрешностей функционирования ОЭПрНК от времени необходимо дополнить данные СОК данными моделирования этих режимов.

Решается задача представления указанных данных в соответствии с некоторой моделью проблемной области. Построение модели проблемной области выполняется при помощи особого класса компьютерных систем – информационно-моделирующих. При этом конечное представление проблемной области состоит из двух взаимосвязанных отображений: инфологической модели проблемной области, удобной для восприятия и анализа человеком, и даталогической модели, которая относится к математическому обеспечению реализуемых режимов. Построение даталогической модели выполняется с применением объектно-ориентированного анализа процесса функционирования

ОЭПрНК. В работе [5] произведено обоснование структуры ИМС, отличительной особенностью которой является совместное использование информации СОК, данных эксплуатации и математических моделей функционирования ОЭПрНК в выбранной проблемной области. Новизна технического решения подтверждена патентами на изобретение [6, 7].

Проведен анализ и оценка влияния погрешностей юстировки ВУ на ТХ ОЭПрНК [8–10], включающие в себя методику анализа влияния погрешностей юстировки лазерного и визирного каналов (ЛиВК) на вероятность определения первичных параметров цели и алгоритм оценки влияния медленно меняющейся погрешности юстировки ВУ на ТХ. Результаты расчетов вероятности P определения первичных параметров цели по предложенной методике в зависимости от погрешности юстировки Δ_B , угловых размеров цели $\Delta\Theta_c$, погрешностей наводки летчика σ_n и угла расходимости лазерного луча (ЛЛ) $\Delta\Theta_{ЛЛЗ}$ представлены на рис. 3.

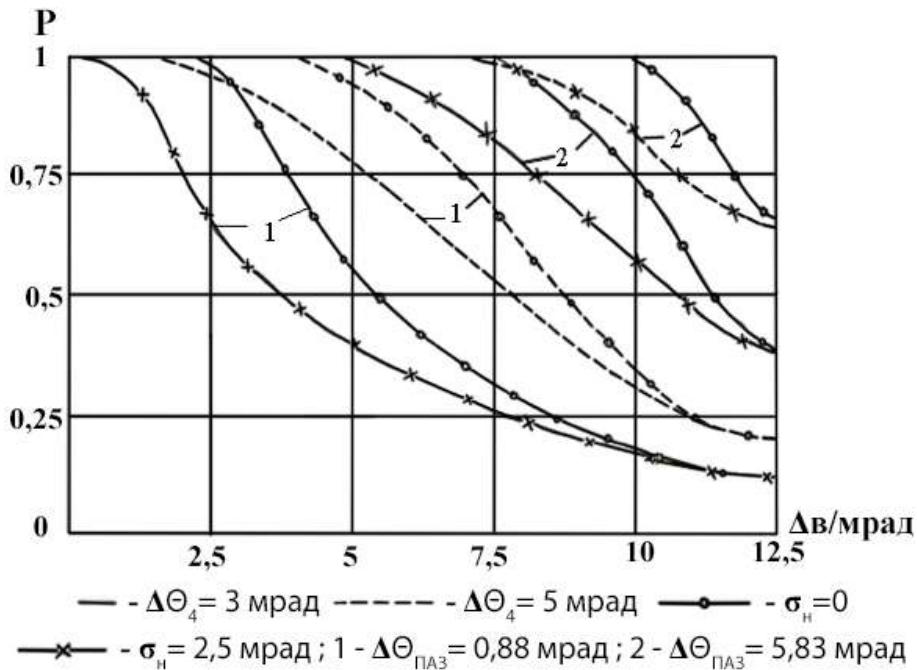


Рис. 3. Результаты расчетов вероятности P

Анализ полученных данных позволяет сделать следующие выводы: при малых погрешностях юстировки (менее 5 мрад) и малом угле расходимости ЛЛ (порядка $3' \approx 0,88$ мрад) вероятность существенно зависит от уровня подготовки летчика (так, при увеличении σ_n от 0 до 2,3 мрад – уровень подготовки 1-го класса, вероятность снижается на 15...20 %); при погрешностях юстировки порядка 5...8 мрад вероятность зависит от угла расходимости ЛЛ и углового размера (дальности) цели и принимает удовлетворительные значения для летчиков с уровнем подготовки 1-го и 2-го классов; при наличии систематических погрешностей юстировки Л и ВК более 10 мрад вероятность существенно зависит от угла расходимости ЛЛ и практически не зависит от точности наводки летчиком.

Кроме того, разработан алгоритм оценки влияния медленно меняющейся погрешности юстировки ВУ на ТХ ОЭПрНК [11]. Получена зависимость, характеризующая математическое ожидание функции невязки вектора наблюдений с ожидаемой реакцией системы, вызванной отличным от нуля вектором ТХ $V(t)$ на детерминированную функцию $b(t)$ (систематическую погрешность юстировки ВУ):

$$m_b(t) = \frac{\dot{m}_{\hat{Y}} - M[a(\hat{Y}, t)]}{K} \tag{4}$$

Особенностью (4) является наличие в выражении производной оценки вектора состояний, что говорит о влиянии на ошибку скорости его изменения. Таким образом, имея математическую модель (ММ) исследуемого ОЭПрНК в виде

$$\frac{d}{dt}Y(t) = A[Y(t), U_v(t), \xi(t), t], \quad Y(t_0) = Y_0, \quad (5)$$

известный вектор управлений U_v и наблюдения вектора состояния \hat{Y} функционирования ОЭПрНК (данные СОК), можем одним из известных математических методов восстановления ММ получить зависимость

$$b(t) = f[\hat{Y}(t), U_v(t), V, t], \quad (6)$$

представляющую собой в простейшем случае систему алгебраических уравнений. Решая уравнение (6) относительно постоянной величины V , получим вектор результатов оценки ТХ ОЭПрНК.

Известен метод юстировки прицельных систем при помощи специальной мишени. Сущность метода состоит в привязке связанной системы координат (ССК) ЛА к мишени, установленной впереди ЛА, определении визуально по отчетному визиру (ОВ) рассогласования между перекрестием на мишени, индицирующим требуемое положение «нуля» неподвижной оси ВУ – прицела коллиматорного типа и истинным положением неподвижной оси ВУ. Далее механическим способом устраняется (компенсируется) погрешность. К недостаткам можно отнести большое количество применяемых средств, а также высокие трудозатраты при проведении юстировки.

При разработке метода и алгоритма оперативной оценки точности юстировки ВУ относительно связанной системы координат (ССК) ЛА в **горизонтальной плоскости** учитывались следующие обстоятельства [12–16]. При решении задачи навигации с «ВК» геодезические координаты (B, L, h) ЛА определяются через матрицы перехода после расчета прямоугольных координат (x, y, z) . В свою очередь, указанные координаты вычисляются по значениям наклонной дальности D , угла места μ и азимута A ориентира (мишени). Если в качестве визуального ориентира использовать один из промежуточных пунктов маршрута (ППМ), координаты которого заранее введены в бортовую цифровую вычислительную систему (БЦВС), то используя особенности алгоритмического обеспечения режима, выявляется возможность определения значения статической составляющей систематической погрешности работы прицельно-навигационного тракта, выраженной через точность юстировки ВУ относительно ССК ЛА в горизонтальной плоскости $\Delta\phi_r$.

Предположим, что значение азимута $A(t_i)$ в момент времени t_i известно точно. Тогда коррекция координат в горизонтальном канале сводится к следующему: в момент времени t_i значение угла визирования ориентира в горизонтальной плоскости определится выражением

$$\phi_r = \psi + A + \Delta\phi_r, \quad (7)$$

и значение бокового отклонения от линии заданного пути (ЛЗП) скачкообразно изменится на величину $\Delta z = z(t_i) - f(\phi_r)$, где $f(\phi_r)$ – известная функция. По значению погрешности в определении боковой координаты и точному значению $A(t_i)$ можно определить величину погрешности юстировки $\Delta\phi_r$ ВУ. Однако из-за ошибок в оценке (x, y, z) положения ЛА величина Δz будет известна с погрешностями, не связанными с точностью юстировки ВУ. Тогда, проведя **повторную коррекцию** координат для $\Delta\phi \neq 0$, можно получить ошибку в определении боковой координаты Δz без влияния погрешностей счисления пути. Таким образом, выполнение режима «ВК» для определения погрешности юстировки ВУ относительно ССК ЛА имеет следующие отличительные особенности: решение задачи «ВК» производится в режиме полета по запрограммированному маршруту; процесс коррекции счисленных координат производится относительно ориентира, хорошо различимого летчиком на подстилающей поверхности, координаты которого заранее введены в БЦВС; коррекция курса производится путевым методом. Для реализации предложенного подхода предлагается **повторно выполнить** режим «ВК» после стабилизации курса системой автоматического управления (САУ).

Рассмотрим алгоритм выполнения режима для определения точности юстировки ВУ относительно ССК ЛА на основе расчетов, производимых в БЦВС. На рис. 4 представлены этапы выполнения режима «ВК».

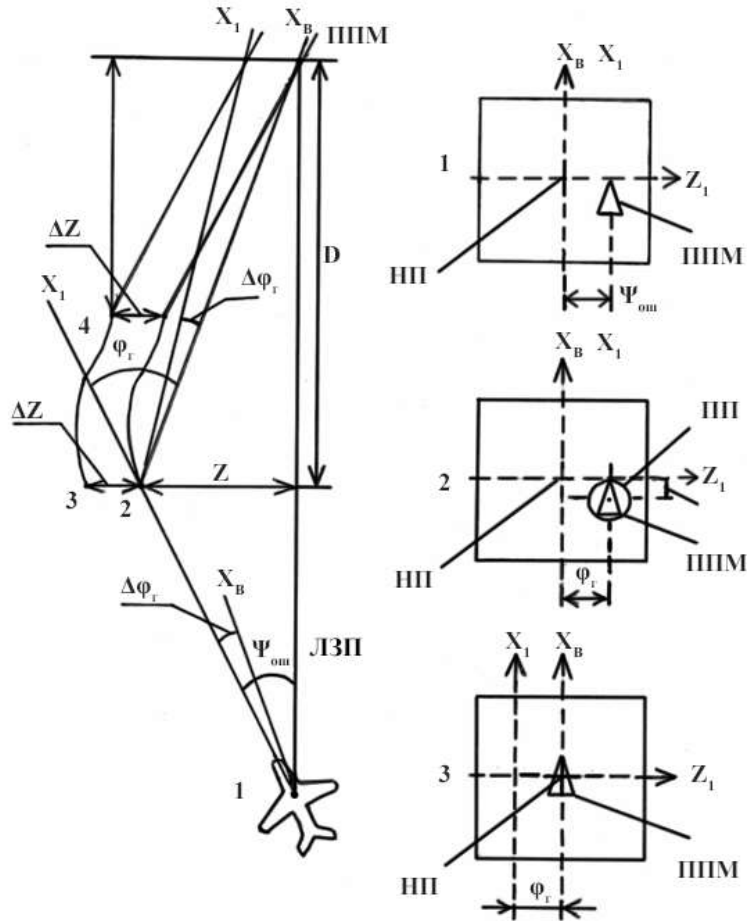


Рис. 4. Этапы выполнения режима «ВК»

При ошибочном выдерживании курса в процессе полета по маршруту ЛА отклоняется от ЛЗП со скоростью, пропорциональной ошибке $\psi_{\text{ош}}$, и двигается от точки 1 к точке 2. Летчик, обнаружив визуальный ориентир (в данном случае ППМ), включает режим «ВК» и при помощи механизма управления (МУ) подвижным перекрестием (ПП) ВУ совмещает его с изображением ориентира. По завершении этой операции координаты ПП из индикаторной системы координат пересчитываются в связанную систему. Затем эти данные переводятся в стабилизированную систему координат для определения отклонения линии визирования ориентира в горизонтальной ϕ_{Γ} и вертикальной $\phi_{\text{В}}$ плоскостях относительно оси симметрии ЛА. С использованием значений углов ϕ_{Γ} и $\phi_{\text{В}}$ автоматически рассчитываются расстояние D ЛА до ориентира и боковое отклонение Z от ЛЗП в ортодромической системе координат:

$$D = H \text{ctg}(\phi_{\text{В}} - \vartheta), \quad (8)$$

$$Z = H \text{tg}\phi_{\Gamma} \text{ctg}(\phi_{\text{В}} - \vartheta), \quad (9)$$

где D – дальность до ориентира; Z – боковое отклонение ЛА от ЛЗП; H – высота полета ЛА, измеряемая радиовысотомером; ϑ – угол тангажа ЛА. По заданным координатам ориентира и полученным значениям D и Z корректируются счисляемые на борту ЛА координаты его местоположения. Найденные значения D и Z используются в САУ для счисления заданного курса при путевом методе управления

$$\psi_{\text{зад}}^* = \psi_{\text{ЛЗП}} - \text{arctg} \frac{Z}{D}, \quad (10)$$

где $\psi_{\text{зад}}^*$ – скорректированный заданный курс ЛА; $\psi_{\text{ЛЗП}}$ – курс ЛЗП.

В зависимости от полученного значения $\psi_{\text{зад}}^*$ САУ формирует закон управления, под влиянием которого ЛА выводится на новую ЛЗП, соответствующую уравнению (10). Осуществляется также стабилизация ЛА по тангажу и крену. При путевом методе управления САУ формирует сигналы управления, вызывающие поворот продольной оси X_1 ЛА в направлении ориентира. При этом ось X_B неподвижного перекрестия (НП) ВУ, совмещенная с осью X_1 , по завершении процессов управления должна быть направлена в сторону изображения ориентира. Однако при наличии погрешности юстировки ВУ относительно ССК ЛА в горизонтальной плоскости неподвижное перекрестие (НП) после коррекции курса не будет совпадать с изображением ориентира. Расчет бокового отклонения Z по выражению (9) в этом случае будет неверным (результат соответствует точке 3 на рис. 4) и отличаться от истинного значения на величину

$$\Delta Z = D \operatorname{tg}(\Delta \phi_{\Gamma}), \quad (11)$$

где ΔZ – ошибка вычисления бокового отклонения, вызванная погрешностью юстировки ВУ; D – дальность до ориентира в момент выполнения «ВК» координат ЛА; $\Delta \phi_{\Gamma}$ – погрешность юстировки ВУ относительно ССК ЛА в горизонтальной плоскости. Соответственно неверно будет рассчитано и значение скорректированного заданного курса $\psi_{\text{зад}}^*$. Поэтому ЛА будет двигаться с постоянным боковым отклонением ΔZ от ЛЗП, а изображение ориентира будет смещаться относительно НП ВУ. Для реализации метода контроля точности юстировки ВУ предлагается повторно выполнить привязку к ориентиру с помощью механизма управления подвижным перекрестием (МУ ПП). При этом угол визирования ϕ_{Γ} фиксируется СОК, а величина бокового отклонения ΔZ (точка 4 на рис. 4) может быть определена выражением

$$\Delta Z = D_1 \operatorname{tg}(\Delta \phi_{\Gamma} - \phi_{\Gamma}), \quad (12)$$

где ΔZ – ошибка вычисления бокового отклонения, вызванная углом $\Delta \phi_{\Gamma}$; D_1 – дальность до ориентира в момент повторной привязки; ϕ_{Γ} – угол визирования ориентира в момент повторной привязки. С учетом равенства (11) и (12) погрешность юстировки ВУ будет определяться соотношением

$$\Delta \phi_{\Gamma} = \operatorname{arctg} \left[\frac{-1 + \frac{D}{D_1} - \sqrt{1 - 2 \frac{D}{D_1} (1 + 2 \operatorname{tg}^2 \phi_{\Gamma}) + \left(\frac{D}{D_1}\right)^2}}{2 \frac{D}{D_1} \operatorname{tg} \phi_{\Gamma}} \right]. \quad (13)$$

Для определения погрешности юстировки ВУ как рассогласования $\Delta \phi_{\Gamma}$ между нулем оси НП и ССК ЛА используется аналитическая зависимость (13) и данные СОК [12–16].

Заключение

Полученные в работе результаты научных исследований могут быть использованы при обосновании тактико-технических требований к аппаратуре оперативного контроля ТХ ОЭПрНК, при разработке и обосновании методов управления ТХ в ОТС, методов ТЭ АТ по состоянию с контролем параметров, а также в учебном процессе вузов при подготовке специалистов по эксплуатации технических систем различного назначения.

Список литературы

1. Зырянов Ю. Т., Малыков К. А. Управление профилактикой в организационно-технических системах : монография / под общ. ред. Ю. Т. Зырянова. М. : АСТ-ПРЕСС КНИГА, 2005. 160 с.
2. Зырянов Ю. Т., Малыков К. А. Планирование профилактики в организационно-технических системах // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2004. Т. 10, № 2. С. 410–420.
3. Зырянов Ю. Т., Малыков К. А. Управление профилактикой в организационно-технических системах // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2004. № 12. С. 54–59.

4. Зырянов Ю. Т., Лебедев В. В., Ледовских Д. Н., Рязанов И. Г. Об одном подходе к формированию смешанной системы управления техническим состоянием радиотехнических средств // Надежность и качество сложных систем. 2017. № 3. С. 49–59. doi:10.21685/2307-4205-2017-3-8
5. Зырянов Ю. Т., Морозов В. В. Формирование облика интегрированной информационно-моделирующей системы оперативной оценки технического состояния бортовых радиоэлектронных комплексов // Журнал ТОАИИ. 2002. № 15. С. 30–34.
6. Пат. 2179303 РФ, МКИ⁷ G 01 D 3/06. Устройство контроля параметров бортового комплекса летательного аппарата / Зырянов Ю. Т., Малыков К. А. № 96123966/28 ; заявл. 19.12.96 ; опубл. 10.02.02, Бюл. № 4. 5 с.
7. Пат. RU 2463562 C2. Устройство контроля параметров бортового комплекса летательного аппарата / Зырянов Ю. Т., Малыков К. А., Сухов А. Л. № 2009107655/28 ; заявл. 03.03.2009 ; опубл. 10.10.2012.
8. Зырянов Ю. Т. Оценка влияния погрешностей юстировки лазерного и визирного каналов прицельного комплекса на вероятность определения первичных параметров цели // Радиосистемы. 2004. № 7. С. 57–59.
9. Зырянов Ю. Т., Кириченко А. А. Вероятностный анализ влияния ошибок юстировки на определение первичных параметров цели // Исследование операций и боевая эффективность авиационных комплексов: науч.-метод. материалы / под ред. И. С. Попова. М. : ВВИА им. проф. Н. Е. Жуковского, 1991. С. 100–103.
10. Зырянов Ю. Т., Кириченко А. А. Оценка закона распределения ошибок юстировки лазерного и визирного каналов прицельной системы // Исследование операций и боевая эффективность авиационных комплексов: науч.-метод. материалы / под ред. И. С. Попова. М. : ВВИА им. проф. Н. Е. Жуковского, 1991. С. 97–99.
11. Зырянов Ю. Т. Оценивание изменения параметров измерительного устройства динамической системы методом фильтрации // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2004. Т. 2, № 6. С. 31–34.
12. Зырянов Ю. Т., Морозов В. В. Оценка влияния ошибок юстировки оптического визира летательного аппарата на точность решения задачи навигации // Повышение эффективности методов и средств обработки информации : материалы VI Всерос. науч.-техн. конф. (16–19 мая 2000 г.). Тамбов : ТВАИИ, 2000. С. 218–219.
13. Зырянов Ю. Т., Морозов В. В. Оценка влияния точности юстировки оптического визира летательного аппарата на решение задачи навигации с визуальной коррекцией // 20 лет кафедре математического моделирования : сб. тр. Воронеж, 2001. С. 121–124.
14. Зырянов Ю. Т., Морозов В. В. Разработка алгоритмического обеспечения для оценки точностных характеристик бортового радиоэлектронного комплекса при решении задачи навигации с визуальной коррекцией // Материалы научных чтений по авиации, посвященных памяти проф. Н. Е. Жуковского (19–20 марта 2002 г.). М. : ВАТУ, 2002. С. 59–65.
15. Пат. 2183312 РФ, МКИ⁷ F 41 G 3/32. Способ контроля точности юстировки прицела летательного аппарата в горизонтальной плоскости / Зырянов Ю. Т., Морозов В. В. № 2000105776/02 ; заявл. 14.03.00 ; опубл. 10.06.02, Бюл. № 16. 5 с.
16. Зырянов Ю. Т. Метод контроля точности юстировки визирного устройства прицельно-навигационного комплекса летательного аппарата в горизонтальной плоскости // Оборонная техника. 2004. № 6. С. 24–26.

References

1. Zyryanov Yu.T., Malykov K.A. *Upravlenie profilaktikoy v organizatsionno-tekhnicheskikh sistemakh: monografiya = Prevention management in organizational and technical systems : monograph*. Moscow: AST-PRESS KNIGA, 2005:160. (In Russ.)
2. Zyryanov Yu.T., Malykov K.A. Planning of prevention in organizational and technical systems. *Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Tambov State Technical University*. 2004;10(2):410–420. (In Russ.)
3. Zyryanov Yu.T., Malykov K.A. Prevention management in organizational and technical systems. *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika = Devices and systems. Management, control, diagnostics*. 2004;(12):54–59. (In Russ.)
4. Zyryanov Yu.T., Lebedev V.V., Ledovskikh D.N., Ryazanov I.G. On one approach to the formation of a mixed control system for the technical condition of radio equipment. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2017;(3):49–59. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2017-3-8
5. Zyryanov Yu.T., Morozov V.V. Formation of the appearance of an integrated information modeling system for operational assessment of the technical condition of on-board radio-electronic complexes. *Zhurnal TOAII = Journal of TOAI*. 2002;(15):30–34. (In Russ.)
6. Patent 2179303 Russian Federation, MKI 7 G 01 D 3/06. *Ustroystvo kontrolya parametrov bortovogo kompleksa letatel'nogo apparata = The device for monitoring the parameters of the on-board complex of the aircraft*. Zyryanov Yu.T., Malykov K.A. № 96123966/28; appl. 19.12.96; publ. 10.02.02, Bull. № 4. 5 p. (In Russ.)
7. Patent Russian Federation 2463562 C2. *Ustroystvo kontrolya parametrov bortovogo kompleksa letatel'nogo apparata = The device for monitoring the parameters of the on-board complex of the aircraft*. Zyryanov Yu.T., Malykov K.A., Sukhov A.L. № 2009107655/28; appl. 03.03.2009; publ. 10.10.2012. (In Russ.)
8. Zyryanov Yu.T. Assessment of the influence of errors in the alignment of the laser and sighting channels of the sighting complex on the probability of determining the primary parameters of the target. *Radiosistemy = Radio systems*. 2004;(7):57–59. (In Russ.)

9. Zyryanov Yu.T., Kirichenko A.A. Probabilistic analysis of the influence of alignment errors on the determination of primary target parameters. *Issledovanie operatsiy i boevaya effektivnost' aviatsionnykh kompleksov: nauch.-metod. materialy* = *Operations research and combat effectiveness of aviation complexes: scientific method. materials*. Moscow: VVIA im. prof. N.E. Zhukovskogo, 1991:100–103. (In Russ.)
10. Zyryanov Yu.T., Kirichenko A.A. Evaluation of the distribution law of errors in the alignment of the laser and sighting channels of the sighting system. *Issledovanie operatsiy i boevaya effektivnost' aviatsionnykh kompleksov: nauch.-metod. materialy* = *Research of operations and combat effectiveness of aviation complexes: scientific method. materials*. Moscow: VVIA im. prof. N.E. Zhukovskogo, 1991:97–99. (In Russ.)
11. Zyryanov Yu.T. Estimation of changes in the parameters of the measuring device of a dynamic system by filtration method. *Informatsionno-izmeritel'nye i upravlyayushchie sistemy* = *Information-measuring and control systems*. 2004;2(6):31–34. (In Russ.)
12. Zyryanov Yu.T., Morozov V.V. Assessment of the influence of errors in the alignment of the optical sight of an aircraft on the accuracy of solving the navigation problem. *Povyshenie effektivnosti metodov i sredstv obrabotki informatsii: materialy VI Vseros. nauch.-tekhn. konf. (16–19 maya 2000 g.)* = *Improving the efficiency of methods and means of information processing : materials of the VI All-Russian scientific and technical. conf. (May 16–19, 2000)*. Tambov: TVAI, 2000:218–219. (In Russ.)
13. Zyryanov Yu.T., Morozov V.V. Assessment of the influence of the accuracy of the alignment of the optical sight of the aircraft on the solution of the problem of navigation with visual correction. *20 let kafedre matematicheskogo modelirovaniya: sb. tr. = 20 years of the Department of Mathematical modeling : proceedings*. Voronezh, 2001:121–124. (In Russ.)
14. Zyryanov Yu.T., Morozov V.V. Development of algorithmic support for assessing the accuracy characteristics of an on-board radio-electronic complex when solving the problem of navigation with visual correction. *Materialy nauchnykh chteniy po aviatsii, posvyashchennykh pamyati prof. N.E. Zhukovskogo (19–20 marta 2002 g.)* = *Materials of scientific readings on aviation dedicated to the memory of Prof. N. E. Zhukovsky (March 19-20, 2002)*. Moscow: VATU, 2002:59–65. (In Russ.)
15. Patent 2183312 Russian Federation, MKI 7 F 41 G 3/32. *Sposob kontrolya tochnosti yustirovki pritsela letatel'nogo apparata v gorizont'noy ploskosti* = *A method for controlling the accuracy of adjusting the sight of an aircraft in a horizontal plane*. Zyryanov Yu.T., Morozov V.V. № 2000105776/02; appl. 14.03.00; publ. 10.06.02, Bull. № 16. 5 p. (In Russ.)
16. Zyryanov Yu.T. Method for controlling the accuracy of alignment of the sighting device of the sighting and navigation complex of the aircraft in the horizontal plane. *Oboronnaya tekhnika* = *Defense technology*. 2004;(6):24–26. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Юрий Трифионович Зырянов

доктор технических наук, профессор,
 профессор кафедры конструирования
 радиоэлектронных и микропроцессорных систем,
 Тамбовский государственный технический университет
 (Россия, г. Тамбов, ул. Советская, 106)
 E-mail: zut-tmb@mail.ru

Yury T. Zyryanov

Doctor of technical sciences, professor,
 professor of the sub-department of design
 of radioelectronic and microprocessor systems,
 Tambov State Technical University
 (106 Sovetskaya street, Tambov, Russia)

**Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов /
 The author declares no conflicts of interests.**

Поступила в редакцию / Received 14.03.2023

Поступила после рецензирования / Revised 02.04.2023

Принята к публикации / Accepted 09.05.2023

МЕТОДЫ ОПЕРАТИВНОЙ ОЦЕНКИ И ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИЦЕЛЬНО-НАВИГАЦИОННЫХ КОМПЛЕКСОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ СРЕДСТВ ОБЪЕКТИВНОГО КОНТРОЛЯ (часть 2)

Ю. Т. Зырянов

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия
zut-tmb@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Известные методы оценки точностных характеристик, способы юстировки и компенсации погрешностей подсистем ОЭПрНК трудоемки и продолжительны по времени. Кроме того, многообразие и стохастический характер воздействия эксплуатационных факторов на подсистемы ОЭПрНК приводят к тому, что при одной и той же наработке или продолжительности эксплуатации они имеют различные ТХ. В связи с этим наработка или календарный срок службы не характеризуют однозначно ТХ ОЭПрНК, что определяет актуальность разработки методов оперативной оценки ТХ и компенсации выявленных погрешностей в межрегламентный период эксплуатации. Цель работы – разработка методов оперативной оценки и обеспечения ТХ ОЭПрНК с использованием данных средств объективного контроля на основе адаптивного управления профилактикой в межрегламентный период эксплуатации с учетом функциональных и конструктивных особенностей, внедрения концепции технического обслуживания по состоянию с контролем параметров, адекватной эксплуатационным свойствам ОЭПрНК. *Материалы и методы.* Для достижения поставленной цели использованы методы математического моделирования, теории вероятностей и математической статистики, методы интегрального и дифференциального исчисления, метода анализа иерархий, метода группового учета аргументов. *Результаты и выводы.* Разработанные новые методы контроля точности юстировки ВУ ОЭПрНК в полете, новизна которых подтверждена соответствующими патентами на способы их реализации, позволяют повысить готовность ОЭПрНК к применению, снизить трудозатраты на обеспечение ТХ в межрегламентный период эксплуатации в целом на порядок, а также повысить интегральную точность юстировки примерно в 3 раза. Полученные в работе результаты научных исследований могут быть использованы при обосновании тактико-технических требований к аппаратуре оперативного контроля ТХ ОЭПрНК, при разработке и обосновании методов управления ТХ при эксплуатации по состоянию с контролем параметров, а также в учебном процессе вузов при подготовке специалистов по эксплуатации технических систем различного назначения.

Ключевые слова: точностные характеристики, организационно-техническая система, средства объективного контроля, техническое состояние, летные эксперименты, визирные устройства, «визуальная коррекция», погрешности юстировки лазерного и визирного каналов

Для цитирования: Зырянов Ю. Т. Методы оперативной оценки и обеспечения точностных характеристик оптико-электронных прицельно-навигационных комплексов с использованием данных средств объективного контроля (часть 2) // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 2. С. 72–82. doi:10.21685/2307-4205-2023-2-8

METHODS OF OPERATIONAL EVALUATION AND ENSURING THE ACCURACY CHARACTERISTICS OF OPTO-ELECTRONIC SIGHTING AND NAVIGATION COMPLEXES USING THESE OBJECTIVE CONTROL TOOLS (Part 2)

Yu. T. Zyryanov

Tambov State Technical University, Tambov, Russia
zut-tmb@mail.ru

Abstract. *Background.* Known methods for estimating TH, methods for adjusting and compensating for errors in the OEPrNK subsystems are laborious and time consuming. In addition, the diversity and stochastic nature of the impact of operational factors on the subsystems of the OEPrNK lead to the fact that, with the same operating time or duration of operation, they have different performance characteristics. In this regard, the operating time or calendar

service life do not unambiguously characterize the performance characteristics of the OEPrNK, which determines the relevance of developing methods for the operational assessment of performance characteristics and compensation for the identified errors in the interregional period of operation. Goal of the work – development of methods for operational assessment and provision of technical characteristics of the OEPrNK using these means of objective control (SOC) based on adaptive management of prevention in the interregional period of operation, taking into account the functional and design features, the introduction of the concept of maintenance (TO) according to the state with the control of parameters that is adequate to the operational properties of the OEPrNK. *Materials and methods.* To achieve this goal, methods of mathematical modeling, probability theory and mathematical statistics, methods of integral and differential calculus, the method of analysis of hierarchies, the method of group accounting of arguments were used. *Results and conclusions.* The developed new methods for controlling the accuracy of the adjustment of the OEPrNK VU in flight, the novelty of which is confirmed by the corresponding patents for the methods of their implementation, make it possible to increase the readiness of the OEPrNK for use, reduce labor costs for providing technical characteristics in the interregional period of operation as a whole by an order of magnitude, and also increase the integral accuracy of adjustment by about 3 times. The results of scientific research obtained in the work can be used in substantiating the tactical and technical requirements for the operational control equipment of the TC OEPrNK, in the development and justification of methods for controlling the TC during operation as with the control of parameters, as well as in the educational process of universities in the training of specialists in the operation of technical systems for various purposes.

Keywords: accuracy characteristics, organizational and technical system, means of objective control, technical condition, flight experiments, sighting devices, "visual correction", adjustment errors of the laser and sighting channels

For citation: Zyryanov Yu.T. Methods of operational evaluation and ensuring the accuracy characteristics of opto-electronic sighting and navigation complexes using these objective control tools (part 2). *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2023;(2):72–82. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2023-2-8

Введение

В настоящее время для юстировки оптико-электронных прицельно-навигационных комплексов (ОЭПрНК) самолетов тактической авиации (ТА) применяется наземный метод юстировки с использованием специальной мишени. Сущность метода состоит в привязке связанной системы координат (ССК) ЛА к мишени, установленной впереди ЛА на фиксированном расстоянии, определении визуально по отчетному визирю (ОВ) рассогласования между перекрестием на мишени, индицирующим требуемое положение «нуля» неподвижной оси визирного устройства (ВУ) – прицела коллиматорного типа и истинным положением неподвижной оси ВУ. Далее механическим способом устраняется (компенсируется) погрешность. К недостаткам можно отнести большое количество применяемых средств, а также высокие трудозатраты при проведении юстировки. В части 1 статьи проведен анализ состояния проблемы исследования. В состав проблемной области входят ТХ ОЭПрНК, условия выполнения рассматриваемых режимов функционирования и условия воздействия внешней среды. Произведена формализованная постановка задачи исследования. Проведен анализ и оценка влияния погрешностей юстировки ВУ на ТХ ОЭПрНК, включающие в себя методику анализа влияния погрешностей юстировки лазерного и визирного каналов (Л и ВК) на вероятность определения первичных параметров цели. Предложены метод и алгоритм оперативной оценки точности юстировки ВУ относительно связанной системы координат (ССК) ЛА в горизонтальной плоскости в полете с применением режима визуальной коррекции «ВК».

В данной статье (часть 2) разработан метод и алгоритм оперативной оценки точности юстировки ВУ относительно ССК ЛА в вертикальной плоскости в полете с использованием режима привязки и слежения за наземной точечной неподвижной мишенью с фиксированным углом прицеливания. Проведен анализ результатов летных экспериментов. Произведена оценка эффективности разработанных методов.

Результаты исследований

При разработке метода и алгоритма оперативной оценки точности юстировки ВУ относительно ССК ЛА в **вертикальной плоскости** учтены особенности выполнения режима слежения за точечной наземной неподвижной целью (мишенью) с фиксированным углом прицеливания. Известно, что в момент привязки и слежения с фиксированным углом прицеливания траектория движения ЛА в вертикальной плоскости представляется логарифмической кривой. Разработанный метод контроля точности юстировки неподвижной оси прицела в вертикальной плоскости заключается в привязке во время полета связанной системы координат летательного аппарата к мишени, находящейся на земле, осуществлении слежения за точечной наземной неподвижной целью (мишенью) маневром

летательного аппарата с фиксированным углом прицеливания и определении погрешности юстировки как разности между фиксированным углом прицеливания – нулем неподвижной оси ВУ и расчетным углом прицеливания, определяемым после полета по данным средств объективного контроля (СОК) с использованием аналитической зависимости. В этом случае угол места и дальность до мишени для любой точки траектории связаны зависимостью

$$\varepsilon = \varepsilon_0 - (\phi_B^\phi - \alpha_{ат}) \ln \frac{D}{D_0}, \quad (1)$$

где ε – угол места мишени; ε_0 – угол места мишени в начальный момент прицеливания; $\alpha_{ат}$ – угол атаки ЛА; D_0 – начальная дальность до мишени; D – текущее значение дальности; ϕ_B^ϕ – фиксированный угол прицеливания.

Поскольку угол между строительной осью ЛА X_1 и горизонтальной плоскостью определяется углом тангажа ϑ_0 , то выражение (1) с учетом равенства $\varepsilon = \vartheta_0 + \phi_B^\phi + \phi_B^0$ приводится к виду

$$\vartheta = \vartheta_0 (\phi_B^\phi - \alpha_{ат}) \ln \frac{D}{D_0}, \quad (2)$$

где ϕ_B^0 – угол, определяющий положение оси X_B^0 «ноль» неподвижного перекрестия (НП) визирного устройства (ВУ), – постоянная величина, соответствующая конкретному типу ЛА; ϑ – текущее значение угла тангажа. Применение данного режима для оценки точности юстировки (выставки) ВУ относительно ССК ЛА в вертикальной плоскости предполагает выполнение двух последовательных действий: определение требуемых (опорных) траекторий движения ЛА при фиксированном угле прицеливания (например, для «нуля» НП ВУ); определение выражения взаимосвязи параметров движения в момент привязки и последующего слежения за мишенью [1–5]. Погрешность юстировки $\Delta\phi_B$, как разность между фиксированным углом прицеливания – «нуля» НП ВУ ϕ_B^ϕ и расчетным углом прицеливания $\phi_B^{СОК}$, определяемым на Земле по материалам СОК

$$\Delta\phi_B = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\phi_{B_i}^\phi - \phi_{B_i}^{СОК}), \quad (3)$$

где n – количество точек считывания полетной информации, регистрируемой СОК; $\phi_B^{СОК}$ – расчетное значение угла, которое определяется по данным СОК с учетом уравнения (3) по выражению

$$\phi_B^{СОК} = \frac{\vartheta_0 - \vartheta}{\ln \frac{D}{D_0}} + \alpha_{ат}. \quad (4)$$

Известно, что порядок случайных ошибок измерения угла атаки бортовыми датчиками типа датчик угла атаки (ДУА) соизмерим с порядком систематических погрешностей юстировки ВУ. Поэтому значение угла атаки $\alpha_{ат}$ определяется по формуле

$$\alpha_{ат} = \frac{G}{C_y^\alpha} n_y, \quad (5)$$

где G – вес ЛА; S – площадь поверхности крыла; C_y^α – производная коэффициента подъемной силы по углу атаки в связанной системе координат; q – скоростной напор воздушного потока; n_y – значение вертикальной перегрузки. Сущность способа поясняется следующими рассуждениями. Для определения угла атаки $\alpha_{ат}$ по выражению (5) достаточно данных, фиксируемых СОК, а также приводимых в техническом описании ЛА. В частности, вес ЛА определяют как сумму

$$G = G_0 + G_m + G_n, \quad (6)$$

где G_0 – вес ЛА без топлива и подвесок, указанный в его техническом описании (ТО); G_n – вес подвесок, определяемый в соответствии с полетным заданием; $G_m = G_{mo} - G_{mp}$ – текущий вес топлива; G_{mo} – вес заправленного топлива, определяют в соответствии с полетным заданием, G_{mp} – вес топлива, израсходованного за время полета, определяют по формуле

$$G_{mp} = \sum_{i=1}^N G_{mnp_i} \frac{P_1^*}{P_0} \sqrt{\frac{T_1^*}{T_0}} \Delta t_i \quad (7)$$

как сумму N расходов топлива на различных режимах работы двигателя ЛА в течение полета до момента привязки к мишени; $G_{mnp_i} = G_{mnp_i}(n_{np})$ – приведенный расход топлива, определяемый в зависимости от величины n_{np} по графику в техническом описании (ТО) ЛА, n_{np} – приведенная частота вращения ротора двигателя ЛА, определяют по формуле

$$n_{np} = n \sqrt{\frac{T_0}{T_1^*}}, \quad (8)$$

где n – частота вращения ротора двигателя, регистрируемая СОК; $T_0 = 288K$ – абсолютная температура воздуха на уровне моря в стандартных атмосферных условиях; $T_1^* = T_H(1 + 0,2M^2)$ – температура заторможенного потока воздуха на входе в двигатель; $T_H = 288,9 - 0,006328H_{ист}$ – температура окружающего воздуха на данной высоте; $P_1^* = P_{H\sigma_{вх}}(M_{ист})(1 + 0,2M_{ист}^2)^{3,5}$ – давление заторможенного потока воздуха на входе в двигатель; $P_H = P(1H_{ист}/44308)^{5,2553}$ – давление окружающего воздуха на данной высоте; $P_0 = 760$ мм рт. ст. – давление воздуха на уровне моря в стандартных атмосферных условиях; $\sigma_{вх}(M_{ист})$ – стандартный коэффициент восстановления полного давления, график зависимости которого от числа Маха приводится в работе $M_{ист} = M + \delta M_a$ – истинное значение числа Маха; M – значение числа Маха, регистрируемое СОК; $\delta M_a(M_{I, II, III})$ – аэродинамическая поправка показаний датчика приемника воздушного давления (ПВД) для ПВД с одной, двумя или тремя камерами статического давления, номограммы определения которого приводятся в работе [5]; $H_{ист} = H + \delta H_{зап} + \delta H_a$ – барометрическая высота; H – высота полета, регистрируемая СОК, $\delta H_{зап}$ – поправка на запаздывание, определяемая по формуле

$$\delta H_{зап} = -29,27T_H \frac{\delta P_{зап}}{P_H}, \quad (9)$$

где $\delta P_{зап}(H, V_y)$ – поправка на запаздывание давления; V_y – вертикальная составляющая скорости ЛА, регистрируется СОК, $\delta H_a(\delta M_a, M, H)$ – аэродинамическая поправка, определяемая по номограмме в литературе. Площадь крыла ЛА S приводится в ТО ЛА. Производная коэффициента подъемной силы по углу атаки в связанной системе координат $C_y^\alpha(M_{ист})$ – приводится в ТО ЛА. Скоростной напор воздушного потока q определяют по формуле

$$q = \frac{\rho_H v^2}{2}, \quad (10)$$

где $\rho_H = 1,225(0,9985 - 0,092H_r + 0,00278H_r^2 - 0,00002H_r^3 - 0,0000002H_r^4)$ – плотность воздуха на данной высоте; $H_r = 1 - 0,0001H_{ист}$ – геопотенциальная высота; $v = 72,166M_{ист}\sqrt{T_H}$ – истинное значение скорости полета ЛА.

Значение вертикальной перегрузки n_y регистрируется СОК.

С учетом приведенных выше формул выражение для определения угла атаки примет вид

$$\alpha_{ат} = \frac{\frac{1}{S} \sum_{i=1}^N \frac{G_{т.пр.}(n_{пр.i}) 760 \left(1 - \frac{H_{нстi}}{44308}\right)^{5.2553} \sigma_{вх}(M_{нстi}) (1 + 0,2M_{нстi}^2)^2}{760}}{\frac{1}{2} C_y^\alpha(M_{нстi}) 1,225 (0,9985 - 0,092H_r + 0,00278H_r^2 - 0,00002H_r^3)} \times \frac{\sqrt{\frac{(288,9 - 0,006328H_{нстi})(1 + 0,2M_{нстi}^2)}{288} \Delta t_i}}{760} \times \frac{1}{(72,166M_{нст} \sqrt{288,9 - 0,006328H_{нст}})^2} n_y, \quad (11)$$

где вес ЛА

$$G = \sum_{i=1}^N \frac{G_{м.пр.}(n_{пр.i}) 760 \left(1 - \frac{H_{нсти}}{44308}\right)^{5.2553} \sigma_{вх}(M_{нсти}) (1 + 0,2M_{нсти}^2)^2}{760} \times \frac{\sqrt{\frac{(288,9 - 0,006328H_{нсти})(1 + 0,2M_{нсти}^2)}{288} \Delta t_i}}{760} \quad (12)$$

скоростной напор:

$$q = \frac{1,225 (0,9985 - 0,092H_r + 0,00278H_r^2 - 0,00002H_r^3) (72,166M_{нст} \sqrt{288,9 - 0,006328H_{нст}})^2}{2}, \quad (13)$$

S – площадь крыла ЛА; C_y^α – производная коэффициента подъемной силы по углу атаки в связанной системе координат; n_y – значение вертикальной перегрузки.

Данные летных экспериментов (ЛЭ), проведенных на самолетах ТА типа МиГ-29, Су-27, подтверждают обоснованность предложенных методов. Для имитации погрешностей юстировки на неподвижной сетке ВУ выбраны опорные точки прицеливания $\Phi_B^\Phi = 30, 35, 40$ мрад. На рис. 1 представлены графики изменения целевой функции ϑ на участках слежения за целью с фиксированными углами прицеливания $\Phi_B^\Phi = 30, 35, 40$ мрад соответственно в зависимости от времени слежения за мишенью t .

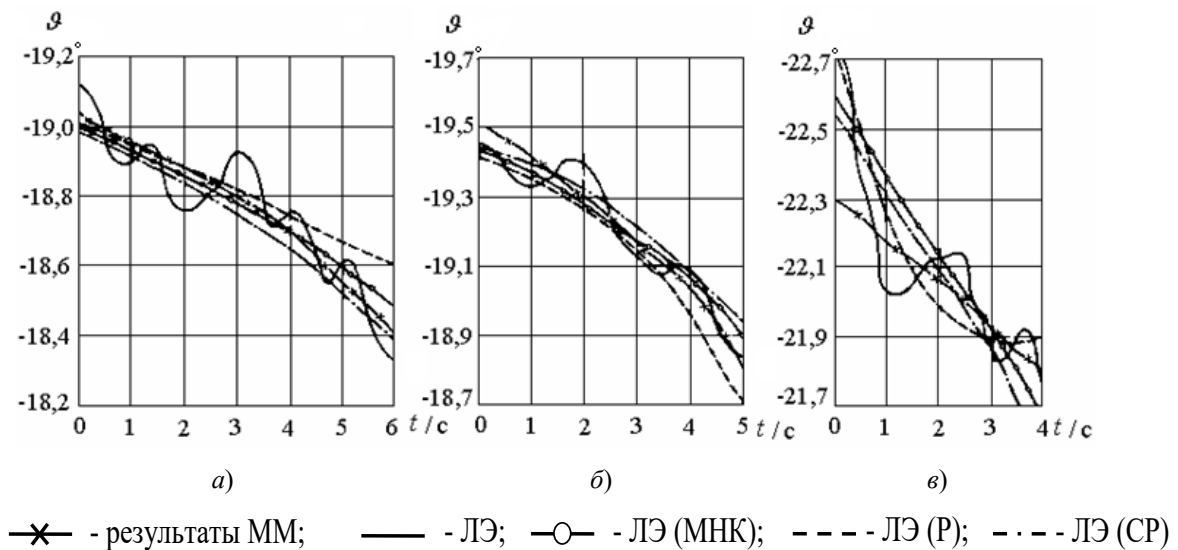


Рис. 1. Графики изменения целевой функции ϑ

Обработка данных ЛЭ проводилась с использованием одного из алгоритмов самоорганизации математических моделей на ЭВМ. В качестве внешних критериев селекции ММ использовались: метод наименьших квадратов (МНК); регулярность (Р) и симметричная регулярность (СР). Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы: оценки массивов данных, вычисленные с помощью аналитической зависимости по данным СОК (МЛП-14-3), согласуются с результатами моделирования с помощью ИМС; наиболее чувствительным и приемлемым критерием селекции моделей по данным ЛЭ является МНК.

Кроме того, при проведении экспериментальных исследований получены результаты, представляющие новизну в военно-прикладном аспекте, связанные с практической реализацией метода контроля точности юстировки ВУ в горизонтальной плоскости самолетов типа Су-27. Исследованы характеристики точности разработанного алгоритмического обеспечения на основе математического моделирования процесса реализации режимов с различными начальными условиями. Результаты исследования влияния дальности D до ориентира в зависимости от значений $\Delta\varphi_{Гизм}$ и $(\Delta\varphi_{Гизм} - \Delta\varphi_{Г})$ для фиксированных $\Delta\varphi_{Г}$ на точность выполнения режима «ВК» показаны на рис. 2 и 3. Из графиков видно, что реальное значение определяемой погрешности также влияет на точность оценки. При увеличении значения погрешности увеличивается и дальность до ориентира, при которой происходит срыв расчетных значений погрешностей в область неудовлетворительных значений (рис. 2).

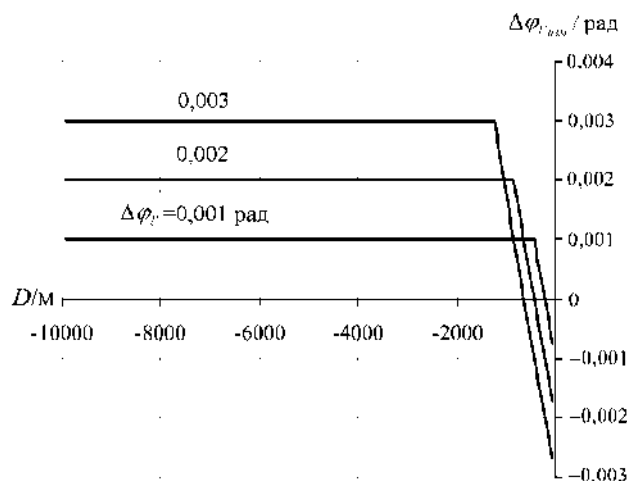


Рис. 2. График срыва расчетных значений погрешностей

При этом также возрастают значения ошибок определения погрешности юстировки (рис. 3).

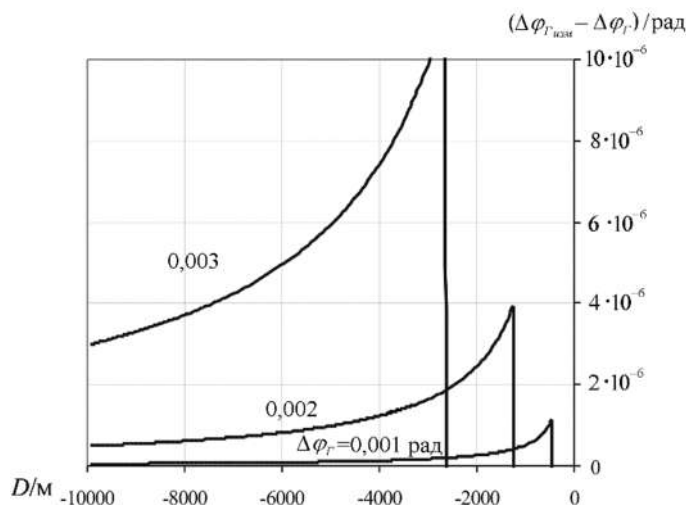


Рис. 3. График определения погрешности юстировки

Проведена оценка влияния ошибок, вызванных косвенным измерением дальности до ориентира на точность определения погрешности юстировки ВУ. Данная оценка проводилась для различных

свойств рельефа местности. Так, для равнинного плато и гористой местности получены кривые изменения расчетных значений погрешности, показанные на рис. 4 и 5 соответственно.

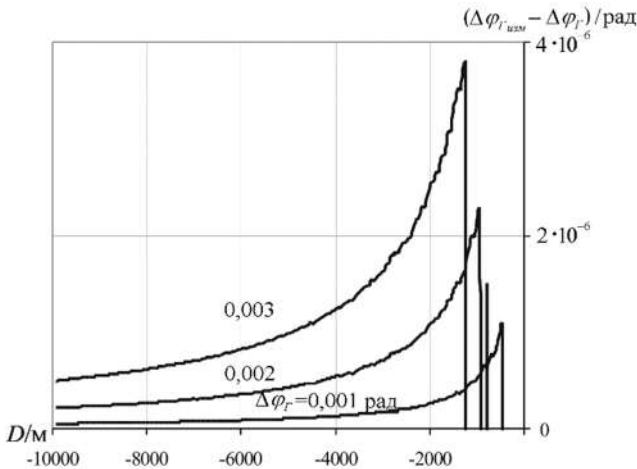


Рис. 4. Кривая изменения расчетных значений погрешности первой оценки

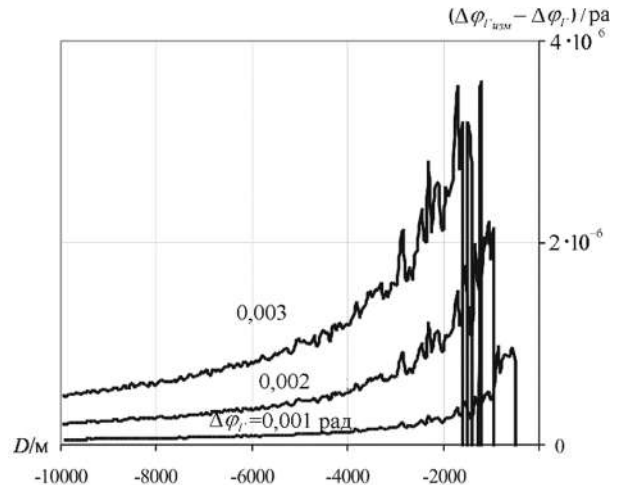


Рис. 5. Кривая изменения расчетных значений погрешности второй оценки

Из графиков видно, что для равнинной местности ошибки измерения высоты полета влияют на точность работы алгоритма незначительно. При этом ошибки определения погрешности юстировки не превышают значений 0,4 %. Для гористой местности максимальные значения ошибки определения погрешности находятся в тех же пределах, однако на малых дальностях до ориентира наблюдается увеличение влияния ошибок измерения высоты.

Работоспособность алгоритмического обеспечения при $\Delta\phi_{Гизм} = 0$ (рис. 6) характеризуется устойчивостью расчетов на больших дальностях до ориентира. Выбросы расчетного значения $\Delta\phi_{Гизм}$ достигают до 1 рад. При уменьшении дальности частота выбросов снижается, а амплитуда выбросов уменьшается до 0,5 рад. Также проведена оценка влияния ошибок инерциальной системы (ИКВ) на точность определения погрешности юстировки ВУ. Ошибки ИКВ, вызванные угловым дрейфом гироскопов, главным образом оказывают влияние на точность определения координат ориентира (углового положения линии визирования). Полученные значения ошибок определения погрешности юстировки ВУ для времени полета до 60 мин (рис. 7) демонстрируют значительное влияние точности инерциальной системы на точность работы алгоритмического обеспечения.

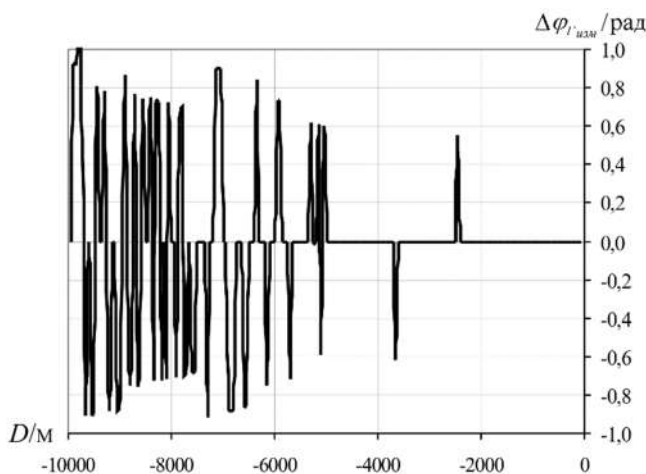


Рис. 6. График работоспособности алгоритмического обеспечения при $\Delta\phi_{Гизм} = 0$

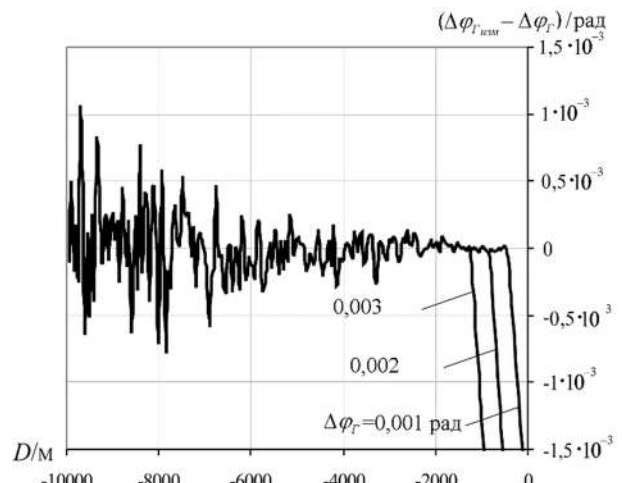


Рис. 7. График определения погрешности юстировки ВУ при полете до 60 мин

Данное влияние уменьшается на малых дальностях до ориентира, однако минимальные значения ошибок определения погрешности юстировки сохраняются на уровне 10 % при нулевом математическом ожидании, что позволяет говорить о возможности их компенсации в процессе полета.

Разработаны алгоритмы компенсации выявленных погрешностей юстировки ВУ в межрегламентный период эксплуатации. Выработаны рекомендации по алгоритмической компенсации погрешностей юстировки ВУ в БЦВС ЛА во время полета и на земле после обработки данных СОК.

Оценка эффективности разработанных методов

Зависимость средней стоимости эксплуатации C_{cp} от времени t для различных периодов контроля k при известных затратах показана на рис. 8. Соотношения эффективности W выполнения ОЭПрНК задач при изменении средней стоимости эксплуатации C_{cp} для различных периодов контроля k ТХ представлены на рис. 9.

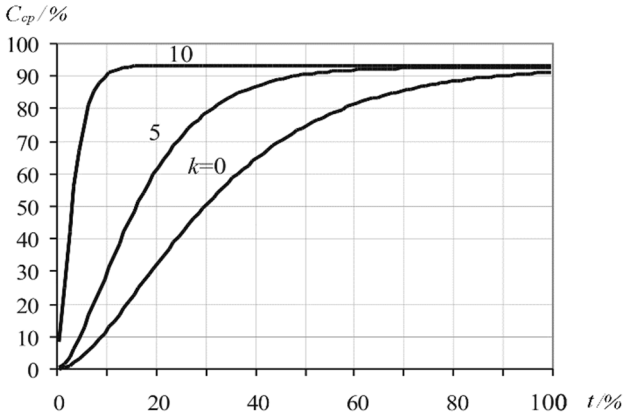


Рис. 8. График зависимости эксплуатации от времени в расчетном периоде

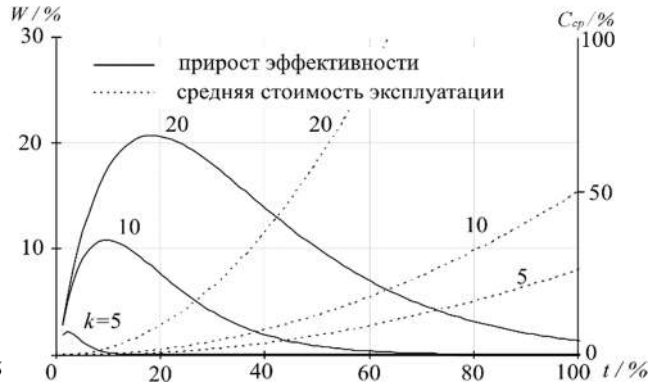


Рис. 9. Соотношения эффективности выполнения ОЭПрНК задач

Для оценки эффективности разработанных методов предложены следующие показатели [5]:

1) относительные трудозатраты

$$Z_{отн} = \frac{\sum_{i=1}^n T_{p_i}^M}{T_p^0}, \tag{14}$$

где $\sum_{i=1}^n T_{p_i}^M$ – суммарные трудозатраты на юстировку по разработанным методам; T_p^0 – трудозатраты на юстировку по существующей методике;

2) коэффициент улучшения точности юстировки ВУ

$$K_T = \frac{\int_0^T \sigma_0(t) dt}{\int_0^T \sigma_M(\tau) d\tau},$$

где $\int_0^T \sigma_0(t) dt$ – интегральная характеристика точности юстировки («интегральная ошибка»); $\sigma_0(t)$ – среднее квадратичное отклонение (СКО) погрешности юстировки ВУ относительно ССК ЛА (статистические данные, полученные в в/ч 75360); $\sigma_M(\tau)$ – СКО погрешности юстировки ВУ относительно ССК ЛА при реализации разработанных методов.

При проведении оценки эффективности разработанных методов использовались экспериментальные данные изменения СКО погрешности юстировки ВУ относительно ССК ЛА в зависимости от наработки [7]. С учетом того, что $T_p^M < T_p^0$, за оцениваемый период эксплуатации можно выполнить n юстировок без увеличения суммарных трудозатрат. В нашем случае

$$n = \frac{T_p^0}{T_p^M} \approx 8,4.$$

Примем допущение, что после каждой «оперативной» юстировки погрешность компенсируется, а закон изменения СКО погрешности $\sigma(t)$ остается прежним. На рис. 10 представлены зависимости изменения σ от времени наработки T_H для количества юстировок $n_{ю} = 2, 4, 8$ (заштриховано) при $\sigma_1 = 0,5\sigma_0; \sigma_2 = 2\sigma_0$.

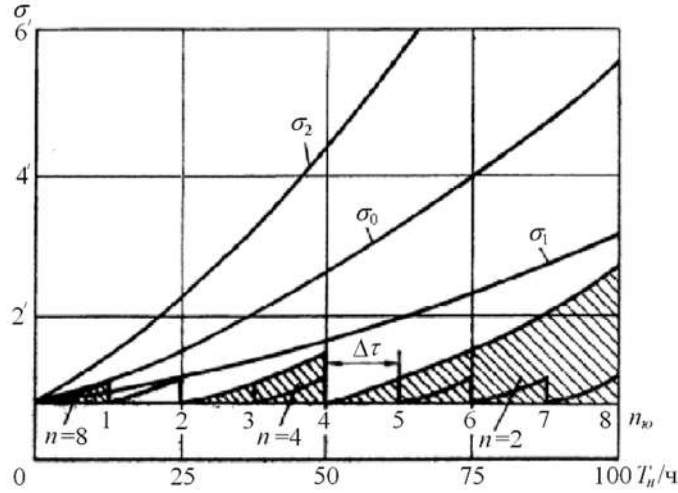


Рис. 10. График зависимости изменения СКО погрешности

При неизменных трудозатратах, соответствующих максимальному количеству «оперативных» юстировок $\left(\sum_{i=1}^n T_{p_i}^M = T_p^0, Z_{отн} = 1 \right)$, точность юстировки будет максимальной, а интегральная погрешность минимальна $\int_0^t \sigma_M(\tau) d\tau = \sum_{i=1}^n \sigma_i \min$, следовательно, коэффициент улучшения точности будет стремиться к своему максимальному значению ($K_T \rightarrow K_T \max$). Если «оперативная» юстировка будет выполнена в те же сроки, что и при существующей методике (через 100 ч наработки), то $\sum_{i=1}^n T_{p_i}^M = T_p^M$.

Закон изменения $\sigma(t)$ остается прежним и $K_T \rightarrow 1$. При этом относительные трудозатраты снижаются до минимальных: $Z_{отн} = \frac{T_p^M}{T_p^0} \rightarrow \min$. Оценим прирост точности K_T при частоте проведения «оперативной» юстировки через равные промежутки времени $\Delta\tau$. Взаимосвязь K_T от количества юстировок $n_{ю}$ через равные промежутки времени $\Delta\tau$ и относительных трудозатрат $Z_{отн}$ для различных значений $\sigma(t)$ представлена на рис. 11. Из графиков (рис. 11) видно, что предложенный показатель K_T обладает хорошей устойчивостью к изменению $\sigma_0(t)$. При увеличении σ_0 от $0,5\sigma_0$ до $2\sigma_0$ ($\sigma_1 = 0,5\sigma_0; \sigma_2 = 2\sigma_0$) коэффициент меняется примерно на 20%. Эта устойчивость позволяет выбрать рациональное количество юстировок независимо от точности юстировки ВУ в межрегламентный период эксплуатации. На практике за оцениваемый период эксплуатации (100 ч наработки) проводить «оперативную» юстировку более 4...5 раз нецелесообразно, так как K_T возрастает при такой периодичности всего на 10...15%. Рациональное количество «оперативных» юстировок χ при известном законе $\sigma(t)$ можно выбрать по отношению приростов показателей на интервале оцениваемого периода эксплуатации T_H : $\chi = \frac{\Delta K_T}{\Delta Z_{отн}}$. Максимальный прирост точности на единицу трудозатрат удастся достичь при проведении 2...3 юстировок за период T_H . Таким образом, применение предложенного подхода при наличии статистических данных изменения $\sigma(t)$ позволит выбрать рациональную стратегию «оперативной» юстировки в межрегламентный период эксплуатации.

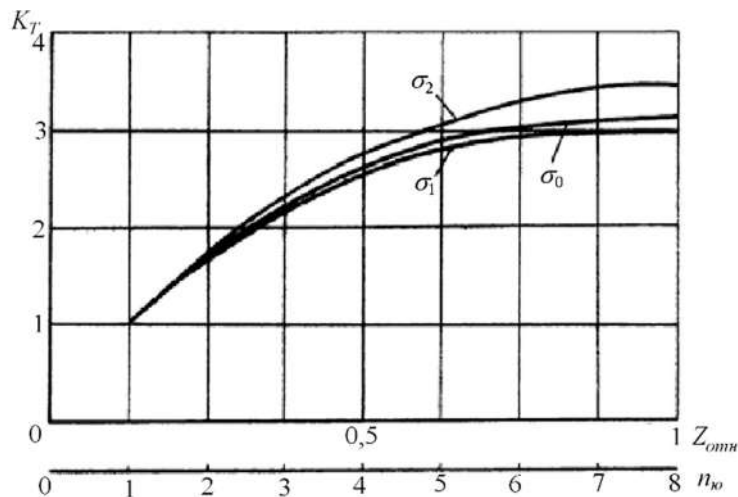


Рис. 11. График изменения коэффициента улучшения

Эффективность решения задачи навигации с «ВК» определялась по величине бокового отклонения Z от ЗЛП без учета и с учетом оцениваемого значения погрешности юстировки ВУ. В процентном соотношении прирост эффективности применения ОЭПрНК ΔW при использовании разработанного метода показан на рис. 12. Из графика видно, что учет оцениваемой погрешности $\Delta\phi_{\Gamma}$, приводящей к ошибке определения бокового отклонения от ЗЛП ΔZ при решении задачи навигации с визуальной коррекцией, обеспечивает прирост эффективности применения ОЭПрНК до 16 %.

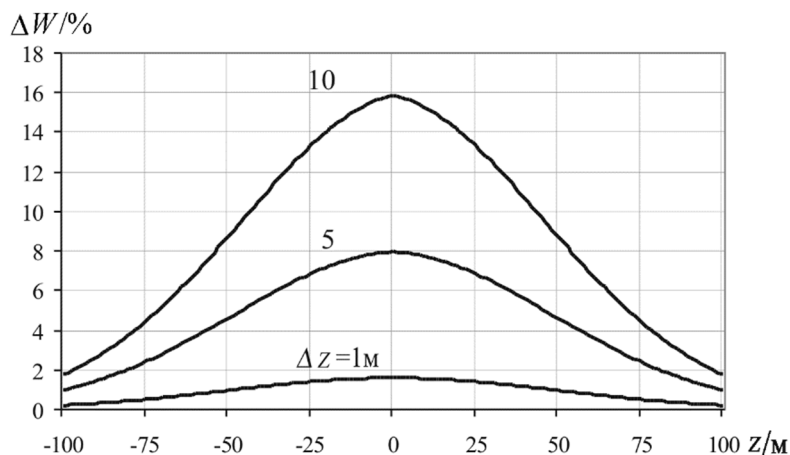


Рис. 12. График процентного соотношения прироста эффективности ОЭПрНК разработанным методом

Заключение

Таким образом, разработанные новые методы, новизна которых подтверждена соответствующими патентами на способы их реализации, позволяют повысить готовность ОЭПрНК к применению, снизить трудозатраты на обеспечение ТХ в межрегламентный период эксплуатации в целом на порядок, а также повысить интегральную точность юстировки примерно в 3 раза. Полученные в работе результаты научных исследований могут быть использованы при обосновании тактико-технических требований к аппаратуре оперативного контроля ТХ ОЭПрНК, при разработке и обосновании методов управления ТХ в ОТС, методов ТЭ АТ по состоянию с контролем параметров, а также в учебном процессе вузов при подготовке специалистов по эксплуатации технических систем различного назначения.

Список литературы

1. Пат. 2102685 РФ, МКИ 7 F 41 G 3/32. Способ контроля точности юстировки неподвижной оси прицела в вертикальной плоскости / Ю. Т. Зырянов, В. В. Шелковский, С. И. Шатунов ; заявитель и патентообладатель Тамбов. ВВАИУ. № 940150031/02 ; заявл. 21.04.94 ; опубл. 20.01.98, Бюл. № 2. 5 с.

2. Пат. 2187776 РФ, МКИ ⁷ F 41 G 3/32. Способ контроля точности юстировки прицела летательного аппарата в вертикальной плоскости / Ю. Т. Зырянов, В. В. Морозов; заявитель и патентообладатель Тамбов. ВАИИ. № 2000102414/02 ; заявл. 31.01.00 ; опубл. 20.08.02, Бюл. № 23. 5 с.
3. Зырянов Ю. Т. Метод контроля точности юстировки визирного устройства прицельно-навигационного комплекса летательного аппарата в вертикальной плоскости // Оборонная техника. 2004. № 6. С. 26–28.
4. Зырянов Ю. Т. Оценка точности юстировки визирных устройств в полете // Известия вузов. Авиационная техника. 2004. № 4. С. 77–79.
5. Зырянов Ю. Т., Кириченко А. А., Крутиков Ю. Е. Выбор критериев оценки эффективности оперативной юстировки прицельно-навигационных комплексов в процессе их эксплуатации по состоянию // Проблемы и перспективы развития комплексов авиационного вооружения. М. : ВВИА им. проф. Н. Е. Жуковского, 1993. С. 96–98.
6. Зырянов Ю. Т., Малыков К. А. Анализ моделей эксплуатации авиационных прицельно-навигационных комплексов и направления их оптимизации // Материалы XI межведомственной науч.-техн. конф. (12–15 апреля 1997 г.). Тула : ТВВАУ, 1997. С. 44–48.

References

1. Patent 2102685 Russian Federation, MКИ 7 F 41 G 3/32. *Sposob kontrolya tochnosti yustirovki nepodvizhnoy osi pritsela v vertikal'noy ploskosti = A method for controlling the accuracy of the alignment of the fixed axis of the sight in the vertical plane.* Yu.T. Zyryanov, V.V. Shelkovskiy, S.I. Shatunov; applicant and patent holder Tambov. VVAIU. № 940150031/02; appl. 21.04.94; publ. 20.01.98, Bull. № 2. 5 p. (In Russ.)
2. Patent 2187776 Russian Federation, MКИ 7 F 41 G 3/32. *Sposob kontrolya tochnosti yustirovki pritsela letatel'nogo apparata v vertikal'noy ploskosti = A method for controlling the accuracy of the alignment of the sight of an aircraft in a vertical plane.* Yu.T. Zyryanov, V.V. Morozov; applicant and patent holder Tambov. VAIИ. № 2000102414/02; appl. 31.01.00; publ. 20.08.02, Bull. № 23. 5 p. (In Russ.)
3. Zyryanov Yu.T. Method for controlling the accuracy of alignment of the sighting device of the sighting and navigation complex of an aircraft in a vertical plane. *Oboronnaya tekhnika = Defense technology.* 2004;(6):26–28. (In Russ.)
4. Zyryanov Yu.T. Assessment of the accuracy of alignment of sighting devices in flight. *Izvestiya vuzov. Aviatcionnaya tekhnika = News of universities. Aviation equipment.* 2004;(4):77–79. (In Russ.)
5. Zyryanov Yu.T., Kirichenko A.A., Krutikov Yu.E. The choice of criteria for evaluating the effectiveness of operational alignment of sighting and navigation complexes in the process of their operation according to the state. *Problemy i perspektivy razvitiya kompleksov aviatsionnogo vooruzheniya = Problems and prospects of development of aviation weapons complexes.* Moscow: VVIA im. prof. N.E. Zhukovskogo, 1993:96–98. (In Russ.)
6. Zyryanov Yu.T., Malykov K.A. Analysis of models of operation of aviation sighting and navigation complexes and directions of their optimization. *Materialy XI mezhvedomstvennoy nauch.-tekhn. konf. (12–15 aprelya 1997 g.) = Materials of the XI interdepartmental scientific-technical conf. (April 12-15, 1997).* Tula: TVVAU, 1997:44–48. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Юрий Трифонович Зырянов

доктор технических наук, профессор,
 профессор кафедры конструирования
 радиоэлектронных и микропроцессорных систем,
 Тамбовский государственный технический университет
 (Россия, г. Тамбов, ул. Советская, 106)
 E-mail: zut-tmb@mail.ru

Yury T. Zyryanov

Doctor of technical sciences, professor,
 professor of the sub-department of design
 of radioelectronic and microprocessor systems,
 Tambov State Technical University
 (106 Sovetskaya street, Tambov, Russia)

**Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов /
 The author declares no conflicts of interests.**

Поступила в редакцию/Received 14.03.2023

Поступила после рецензирования/Revised 02.04.2023

Принята к публикации/Accepted 09.05.2023

ПРОМЫШЛЕННЫЙ ИНТЕРНЕТ ВЕЩЕЙ КАК РЕВОЛЮЦИОННЫЙ СКАЧОК РАЗВИТИЯ

И. А. Кубасов

Академия управления МВД РФ, Москва, Россия
igorak@list.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* В условиях цифровой трансформации государственного управления и бизнеса весьма важным является определение роли и места каждой из сквозных технологий, указанных в национальной программе «Цифровая экономика Российской Федерации». В рамках данной статьи исследованы роль и место одной из технологий – промышленного Интернета вещей в приборостроении, спрогнозированы основные направления развития промышленного Интернета вещей для успешной цифровой трансформации приборостроения. *Материалы и методы.* Методами исследования избраны: анализ зарубежного и отечественного опыта разработки и внедрения сквозной технологии – Интернета вещей; обобщение результатов анализа; определение роли и места промышленного Интернета вещей в приборостроении; прогноз основных направлений развития промышленного Интернета вещей для успешной цифровой трансформации приборостроения. *Результаты.* Обосновано: основными преимуществами промышленного Интернета вещей для приборостроения являются снижение производственных затрат, рост производительности труда, повышение надежности и качества производимого продукта; промышленный Интернет вещей выступает ключевым драйвером развития цифровой трансформации промышленного производства, особенно приборостроения, основанного на применении цифровых инструментов и ресурсов. Спрогнозированы основные направления дальнейшего развития ИИТ для успешной цифровой трансформации промышленного производства и, в частности, приборостроения: переход производства на экономику сервисов – «оборудование как услуга»; трансформация облачных ИИТ-платформ в инструмент кардинального повышения эффективности производственных систем; создание на основе ИИТ и других цифровых технологий «интеллектуальной цифровой сети» как Интернета будущего, характеризующегося интеллектуальными устройствами, предоставляющими персонализированные и предсказательные цифровые услуги. *Выводы.* Промышленный Интернет вещей становится следующим революционным скачком развития, сравнимым с изобретением парового двигателя или индустриализацией электричества.

Ключевые слова: промышленный Интернет вещей, приборостроение, цифровая трансформация, надежность, качество

Для цитирования: Кубасов И. А. Промышленный интернет вещей как революционный скачок развития // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 2. С. 83–89. doi:10.21685/2307-4205-2023-2-9

INDUSTRIAL INTERNET OF THINGS AS A REVOLUTIONARY LEAP IN DEVELOPMENT

I.A. Kubasov

Academy of Management of the Ministry of Internal Affairs of Russia, Moscow, Russia
igorak@list.ru

Abstract. *Background.* In the context of digital transformation of public administration and business, it is very important to determine the role and place of each of the end-to-end technologies embedded in the national program "Digital Economy of the Russian Federation". Within the framework of this article, the role and place of one of the technologies – the industrial Internet of Things in instrumentation is investigated and the main directions of the development of the industrial Internet of Things for the successful digital transformation of instrumentation are substantiated. *Materials and methods.* The research methods are chosen: analysis of foreign and domestic experience in the development and implementation of end-to-end technology – the Internet of Things; generalization of the results of the analysis; determination of the role and place of the industrial Internet of Things in instrumentation; forecast of the main directions of development of the industrial Internet of Things for successful digital transformation of instrumentation. *Results.* It is proved: the main advantages of the industrial Internet of Things for instrumentation are reduction of production costs, increase in labor productivity, increase in reliability and quality of the manufactured product; the industrial Internet of

Things is a key driver of the development of digital transformation of industrial production, and especially instrumentation based on the use of digital tools and resources. The main directions of further development of IIoT for the successful digital transformation of industrial production and, in particular, instrumentation are predicted: the transition of production to the economy of services – "equipment as a service"; the transformation of cloud IIoT platforms into a tool for radically improving the efficiency of production systems; the creation of an "intelligent digital network" based on IIoT and other digital technologies, like the Internet a future characterized by intelligent devices providing personalized and predictive digital services. *Conclusions.* The industrial Internet of Things is becoming the next revolutionary leap in development, comparable to the invention of the steam engine or the industrialization of electricity.

Keywords: industrial Internet of things, instrumentation, digital transformation, reliability, quality

For citation: Kubasov I.A. Industrial internet of things as a revolutionary leap in development. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2023;(2):83–89. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2023-2-9

Введение

Цифровая трансформация государственного управления и бизнеса предполагает переход к новой, более эффективной системе управления на основе высоких технологий. В национальной программе «Цифровая экономика Российской Федерации» указан ряд сквозных технологий: большие данные; искусственный интеллект; технологии беспроводной связи; технологии виртуальной и дополненной реальности; новые производственные технологии («цифровой двойник»); промышленный интернет и др. [1]. При этом Правительством Российской Федерации определены три стратегические технологии в области цифровой трансформации государственного управления: искусственный интеллект; большие данные; Интернет вещей [2]. Все эти сквозные технологии – инновационные средства изменений, позволяющие войти в качественно новый мир [3]. Инновации уже влияют на производство, безопасность, социальную сферу, культуру и все остальные области нашей жизни. С уверенностью можно констатировать о новой четвертой промышленной революции [4].

Интернет вещей (от англ. IoT – *internet of things*) – это сеть, объединяющая физические объекты, которые имеют встроенные технологии, позволяющие осуществлять взаимодействие с внешней средой, передавать сведения о своем состоянии и принимать данные извне с помощью Wi-Fi, Bluetooth или проводной связи [5, 6]. Особую роль и место в цифровой трансформации занимает промышленный Интернет вещей (от англ. IIoT – *industrial internet of things*) – по сути, сегмент Интернета вещей, который непосредственно связан с производством, где осуществляется сбор данных в режиме реального времени с помощью различных датчиков (сенсоров) и анализ полученной информации.

Следует отметить, что цифровая трансформация промышленного производства, основанная на применении цифровых технологий, в том числе промышленного Интернета вещей, наряду с возможностями несет риски, которые важно осознавать и компенсировать. Только представьте, что может случиться, если хакер подключится к платформе «умного» приборостроительного производства и перехватит управление производством систем контроля и диагностирования радиоэлектронной аппаратуры?

Более того, ожидается, что количество угроз безопасности будет расти по мере того, как устройства промышленного Интернета вещей становятся все более распространенными. Gartner прогнозирует, что 25 % хакерских атак будут связаны с IoT, а расходы на безопасность IoT достигнут \$547 млн в год [6]. Так что обеспечить не только качество и надежность «умных» систем, оптимизировать их стоимость, но и обеспечить их безопасность – важные задачи, стоящие перед разработчиками.

При этом конечный эффект от этих цифровых преобразований трудно спрогнозировать с учетом возникающих новых вызовов (негативного фактора) и возможного синергетического эффекта от взаимного влияния на развитие сквозных технологий (позитивного фактора). Поэтому весьма актуальным является системный подход к разработке и внедрению сквозных технологий, а также определение роли и места каждой из сквозных технологий в цифровой трансформации.

В рамках данной статьи исследованы роль и место одной из технологий – промышленного Интернета вещей в приборостроении и спрогнозированы основные направления дальнейшего развития промышленного Интернета вещей для успешной цифровой трансформации приборостроения.

Материалы и методы

Методами исследования избраны: анализ зарубежного и отечественного опыта разработки и внедрения сквозной технологии – Интернета вещей; обобщение результатов анализа; определение роли и места промышленного Интернета вещей в приборостроении; прогноз основных направлений

дальнейшего развития промышленного Интернета вещей для успешной цифровой трансформации приборостроения.

Результаты

Весьма важный сегмент Интернета вещей – промышленный Интернет вещей (ПоТ), представляющий собой многоуровневую систему, включающую датчики и контроллеры, установленные на узлах и агрегатах промышленного объекта, средства передачи собираемых данных и их визуализации, мощные аналитические инструменты интерпретации получаемой информации и многие другие компоненты (рис.1).

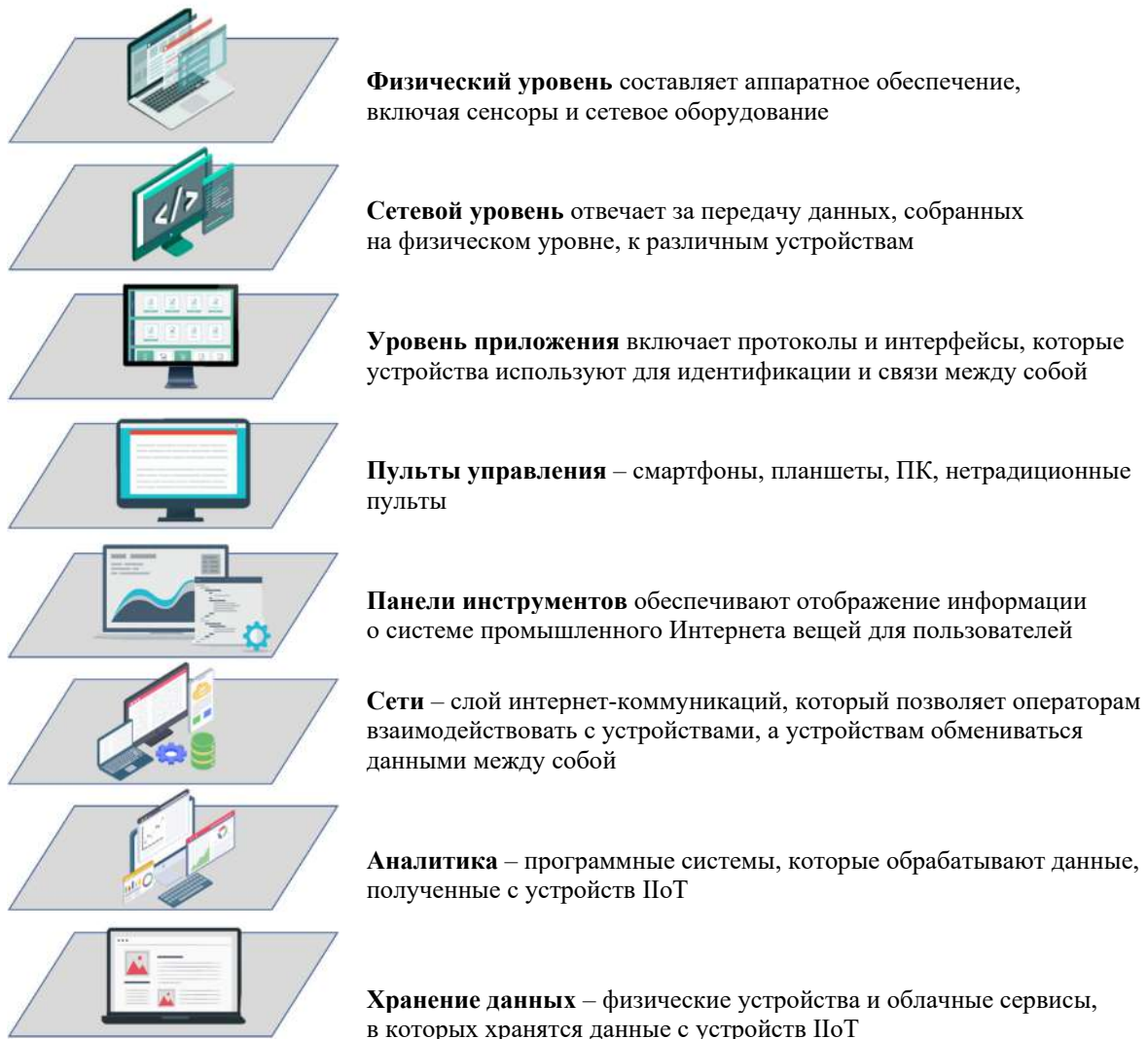


Рис. 1. Уровни ПоТ

Рассматривая ПоТ как мощную сквозную технологию, которая позволяет более быстро и эффективно отслеживать, анализировать и контролировать производственные процессы, можно выдвигать следующие гипотезы:

1) ПоТ выступает ключевым драйвером развития цифровой трансформации промышленного производства и особенно приборостроения, основанного на применении цифровых инструментов и ресурсов;

2) основные направления дальнейшего развития ПоТ для успешной цифровой трансформации промышленного производства и, в частности, приборостроения: переход производства на экономику сервисов – «оборудование как услуга»; трансформация облачных ПоТ-платформ в инструмент кардинального повышения эффективности производственных систем; создание на основе ПоТ и других цифровых технологий «интеллектуальной цифровой сети» как Интернета будущего, характеризуемого

интеллектуальными устройствами, предоставляющими «проницательные» (персонализированные и предсказательные) цифровые услуги.

Попытаемся подтвердить выдвинутые гипотезы следующими рассуждениями.

Сфера применения промышленного Интернета вещей с каждым годом расширяется по мере наращивания перечня промышленных устройств. Однако чтобы система работала, требуется применение другой сквозной технологии – беспроводной связи. Она способна ускорить развитие Интернета вещей и открыть совершенно новые горизонты. Так, к сетям 5G смогут одновременно подключиться гораздо больше пользователей, примерно на 1000 устройств больше на каждый метр. Все они будут обеспечивать стабильно высокое качество связи и скорость загрузки данных (в 20 раз больше, чем у 4G). Кроме того, технология более бережно относится к батарее: устройство будет разряжаться медленнее. Прогнозируют, что скорость в сетях шестого поколения может достигать до 1 Тбит/с, а для управления сетями потребуются искусственный интеллект.

Основными компонентами ПоТ являются передовые аналитические инструменты, основанные на технологиях искусственного интеллекта, и большие данные. Именно уровень ПоТ «Аналитика» обеспечивает превращение промышленного Интернета вещей в стратегический инструмент кардинального повышения эффективности производства.

Перемещение аналитики ближе к источникам данных поможет повысить качество производства и продукции. С появлением недорогих датчиков и процессоров становится возможным собирать и обрабатывать все больше и больше данных о производстве. Граничные («туманные») расчеты со встроенной аналитикой становятся приемлемой альтернативой в тех случаях, когда запускать аналитику в облаке небезопасно или по каким-то причинам отказались от облачного решения.

Благодаря применению технологий ПоТ появилась возможность внедрения еще одной сквозной технологии – «цифровых двойников» – как пример новых производственных технологий. «Цифровой двойник» на производстве позволяет получить нужную информацию о продукте на разных этапах его жизненного цикла: при создании, в процессе эксплуатации, развития, по итогам использования. Данные в режиме реального времени от датчиков, встроенных в физические объекты или из других источников, могут использоваться для решения аналитических задач, таких как мониторинг состояния, диагностика отказов и прогнозная аналитика. Полученные знания могут увеличить стоимость производственных активов предприятия.

Также ПоТ помогает разрабатывать технологии дополненной и виртуальной реальности (AR/VR). Обучение новых сотрудников с помощью тренажеров может быть наиболее эффективным способом. Технологии, используемые в ПоТ, такие как игры, дополненная/виртуальная реальность и 3D-погружение с использованием носимых устройств, позволяют с высокой степенью точности имитировать реальные производственные процессы.

Промышленный Интернет вещей предлагает революционный уровень видимости в производственном цехе всех операций, а также возможность удобного управления ресурсами предприятия. Технологии ПоТ заполняют пробелы, из-за которых такие системы, как ERP и MES, достигают своих пределов: зависимость от ручного ввода данных и невозможность работы с подробной информацией (записи о состоянии оборудования в режиме реального времени, местонахождение товарно-материальных ценностей и т.д.).

Развитие ПоТ влияет и на предложение элементной базы, и на снижение стоимости, и на предложение интеграционных решений различного мониторинга и систем обратного регулирования. При этом развитие внедрения датчиков охватывает как исторически «железные» отрасли физического реального производства и продуктов, как роботы и автономные устройства, так и сферу услуг, в том числе финансовых.

Следовательно, основными преимуществами промышленного Интернета вещей для приборостроения являются снижение производственных затрат, рост производительности труда, повышение надежности и качества производимого продукта. В настоящее время именно облачные ПоТ-платформы играют роль основного драйвера развития приборостроительного производства. В силу этого можно спрогнозировать два основных направления развития промышленного Интернета вещей для успешной цифровой трансформации приборостроения.

Первое направление – внедрение сервиса «оборудование как услуга», позволяющего разрабатывать новые виды технологического оборудования для изготовления деталей, сборки, регулировки, контроля и испытаний приборов с учетом решения вопросов обеспечения их надежности, экологической безопасности окружающей среды. Что это значит: вендоры предлагают сервис «оборудование

как услуга», гарантируя работоспособность оборудования, беря на себя обязательства по его обслуживанию. На основе регулярного сбора и анализа информации об условиях эксплуатации прогнозируются возможные поломки и их своевременное предотвращение.

Еще одно направление развития – трансформация облачных IoT-платформ в инструмент кардинального повышения эффективности производственных систем. Облачные IoT-платформы позволяют оптимизировать производственные процессы: обеспечить точность операций, сократить складские запасы, минимизировать ошибки персонала и время человеческого вмешательства. Все это даст возможность значительно увеличить объемы производства, сэкономить средства, повысить надежность и качество любого продукта.

Обсуждение

Проникновение Интернета и принципов совместной экономики (от англ. *sharing economy*) в производственные процессы и сферы человеческой жизни уже не воспринимается как взлом. Технологии создания открытого программного кода или другой ценности для потребителей в режиме краудсорсинга (от англ. *crowdsourcing*, от *crowd* – толпа и *sourcing* – использование ресурсов) не считаются разглашением коммерческой тайны [7]. В результате имеем новые сервисы, которые все более персонализированы и удобны для потребителя, а многие визионеры любят предсказывать, что следующая индустриальная революция будет связана именно с персонализацией.

Предоставляя производителям посекундные данные об операциях в цехах, IoT позволяет предприятиям значительно повысить производительность производственного процесса. IBM сообщает, что использование аналитических данных IoT для оптимизации производственного процесса может привести к увеличению количества продуктов на той же производственной линии до 20 % [8].

Приложения IoT, которые позволяют производителям получить более высокий уровень вертикальной видимости, делятся на две группы:

- приложения, поддерживающие производственные операции;
- приложения, облегчающие управление промышленными активами.

Согласно исследованию McKinsey, к 2025 г. улучшения операций, вызванные приложениями IoT, могут стоить более 470 миллиардов долларов в год [9]. Приложения IoT для производства связаны с такими операциями, как мониторинг и оптимизация производительности оборудования, контроль качества производства и взаимодействие человека с машиной.

Согласно исследованию ITIF, приложения IoT для мониторинга использования машин могут повысить производительность производства на 10–25 % и создать к 2025 г. глобальную экономическую стоимость до 1,8 трлн долл. [8, 9].

Мониторинг использования машины начинается с получения соответствующих данных о рабочих параметрах машины, например, времени работы, фактической рабочей скорости, выходе продукта и т.д., с датчиков, систем SCADA или DCS. Данные собираются в режиме реального времени и передаются в облако для обработки. Облако агрегирует данные и превращает их в информативную информацию о ключевых показателях эффективности использования оборудования (TEEP, OEE, время настройки и настройки, холостой ход и незначительные остановки и т.д.). После анализа данных результаты визуализируются и отображаются через пользовательское приложение (веб- или мобильное).

Мониторинг качества производимой продукции может осуществляться двумя способами: путем проверки незавершенного производства (от англ. *WIP* – *work in progress*) по мере ее прохождения по производственному циклу или путем контроля состояния и калибровки машин, на которых производится продукция.

Контроль качества, основанный на проверке *WIP*, дает более точные результаты (помогает выявить мелкие дефекты, скажем, неточности в соосности деталей), однако существуют определенные ограничения, затрудняющие использование метода. Контроль качества на основе проверки незавершенного производства применим только для дискретного производства. Это дорого, требует много времени и труда, так как *WIP* проверяются вручную.

Второй метод, основанный на контроле за состоянием и калибровке машин, предлагает меньшую дифференциацию по объему – он обеспечивает простую бинарную классификацию «хорошо» и «плохо». Тем не менее он помогает обнаруживать узкие места в производственных операциях, выявлять плохо настроенные и/или неэффективные машины, своевременно предотвращать поломки машин и многое другое.

Наряду с повышением эффективности производственных операций промышленный Интернет вещей применяется в производстве для обеспечения надлежащего использования активов, продления срока службы оборудования, повышения надежности и обеспечения наилучшей отдачи от активов. Приложения ПоТ, облегчающие управление промышленными активами, включают: отслеживание промышленных активов; управление запасами; профилактическое обслуживание (на основе мониторинга состояния).

Решения для управления запасами на основе промышленного Интернета вещей помогают производителям автоматизировать отслеживание запасов и отчетность, обеспечивать постоянную видимость статуса и местонахождения отдельных единиц запасов и оптимизировать время выполнения заказа.

По данным Deloitte, решения для профилактического обслуживания на основе промышленного Интернета вещей, как ожидается, снизят затраты на техническое обслуживание заводского оборудования на 40 % и к 2025 г. принесут экономическую выгоду в размере 630 млрд долл. в год проекты профилактического обслуживания [9].

Исследователи используют признанные шаблоны данных в качестве основы для создания прогностических моделей. Модели обучаются, тестируются, а затем используются для определения возникновения каких-либо зарождающихся проблем, прогнозирования вероятного отказа машины, точного определения условий эксплуатации и моделей использования машины, которые приводят к отказам и т.д.

Например, параметры состояния машины (температура, вибрация и т.д.), рабочие параметры (скорость, давление и т.д.) и параметры окружающей среды (влажность, температура и т.д.) находятся в пределах нормальных пороговых значений. Однако объединение этих параметров и анализ объединенного набора данных в сравнении с прогностическими моделями помогает выявить, что сочетание нормальных параметров, взятых по отдельности, может привести, скажем, к отказу двигателя машины. После выявления потенциального сбоя решение для профилактического обслуживания отправляет уведомление специалистам по обслуживанию, информируя их о потенциальной деградации и рекомендуя меры по устранению последствий.

ПоТ следует использовать для автоматизации различных процессов в системе КИПиА (контрольно-измерительные приборы и автоматика). Это подразумевает использование алгоритмов машинного обучения для выявления шаблонов и оптимизации настроек, а также сокращение ручного вмешательства.

Следовательно, промышленный Интернет вещей позволяет создать производство экономичное, гибкое и более эффективное. Следующий этап оптимизации производственных процессов будет характеризоваться все более плотной конвергенцией сквозных информационных технологий.

Заключение

На основе анализа зарубежного и отечественного опыта разработки и Интернета вещей, определения роли и места промышленного Интернета вещей, а также прогноза основных направлений развития промышленного Интернета вещей можно заключить: промышленный Интернет вещей становится следующим революционным скачком развития, сравнимым с изобретением парового двигателя или индустриализацией электричества.

Список литературы

1. Национальная программа «Цифровая экономика Российской Федерации»: распоряжение Правительства РФ № 1632-р от 28 июля 2017 г.
2. Стратегическое направление в области цифровой трансформации государственного управления: распоряжение Правительства РФ № 2998-р от 22 октября 2021 г.
3. Атлас сквозных технологий цифровой экономики России. URL: <https://ucarecdn.com/5041fcd3-a14c-4f4d-9c91-b42a77f72d87> (дата обращения: 20.03.2023).
4. Алгиничева Т. А. Интернет вещей как ведущий драйвер цифровой трансформации // Управление и цифровизация: национальное и региональное измерение: сб. ст. II Нац. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Брянск: Брянский государственный университет имени академика И. Г. Петровского, 2022. С. 197–200.
5. Лапшова О. А., Листошенкова О. С. Интернет вещей в условиях цифровой трансформации общества // Социально-психологические проблемы ментальности/менталитета. 2021. № 17. С. 66–72. doi:10.35785/978-5-88018-646-4-2021-17-66-72

6. Industrial Internet of Things, IIoT. URL: <https://it-enterprise.com/knowledge-base/technology-innovation/promyshlennyj-internet-veschej> (дата обращения: 20.03.2023).
7. Интернет вещей, IoT, M2M (мировой рынок). URL: <https://www.tadviser.ru/index.php> (дата обращения: 20.03.2023).
8. IIoT – Industrial Internet of Things (Промышленный интернет вещей). URL: <https://www.tadviser.ru/index.php> (дата обращения: 20.03.2023).
9. Boris Shiklo. IoT in Manufacturing: The Ultimate Guide. URL: <https://www.scnsoft.com/blog/iot-in-manufacturing> (дата обращения: 20.03.2023).

References

1. *Natsional'naya programma «Tsifrovaya ekonomika Rossiyskoy Federatsii: rasporyazhenie Pravitel'stva RF № 1632-r ot 28 iyulya 2017 g. = National Program "Digital Economy of the Russian Federation : Decree of the Government of the Russian Federation No. 1632-r dated July 28, 2017.* (In Russ.)
2. *Strategicheskoe napravlenie v oblasti tsifrovoy transformatsii gosudarstvennogo upravleniya: rasporyazhenie Pravitel'stva RF № 2998-r ot 22 oktyabrya 2021 g. = Strategic direction in the field of digital transformation of public administration: Decree of the Government of the Russian Federation No. 2998-r dated October 22, 2021.* (In Russ.)
3. *Atlas skvoznykh tekhnologiy tsifrovoy ekonomiki Rossii = Atlas of end-to-end technologies of the digital economy of Russia.* (In Russ.). Available at: <https://ucarecdn.com/5041fcd3-a14c-4f4d-9c91-b42a77f72d87> (accessed 20.03.2023).
4. Alginicheva T.A. Internet of things as a leading driver of digital transformation // *Upravlenie i tsifrovizatsiya: natsional'noe i regional'noe izmerenie: sb. st. II Nats. nauch.-prakt. konf. s mezhdunar. uchastiem = Management and digitalization: national and regional dimension : collection of articles II National Scientific and practical conference with international participation.* Bryansk: Bryanskiy gosudarstvennyy universitet imeni akademika I.G. Petrovskogo, 2022:197–200. (In Russ.)
5. Lapshova O.A., Listoshenkova O.S. Internet of things in conditions of digital transformation of society. *Sotsial'no-psikhologicheskie problemy mental'nosti/mentaliteta = Socio-psychological problems of mentality/mentality.* 2021;(17):66–72. (In Russ.). doi:10.35785/978-5-88018-646-4-2021-17-66-72
6. *Industrial Internet of Things, IIoT.* Available at: <https://it-enterprise.com/knowledge-base/technology-innovation/promyshlennyj-internet-veschej> (accessed 20.03.2023).
7. *Internet veshchey, IoT, M2M (mirovoy rynek) = Internet of Things, IoT, M2M (global market).* (In Russ.). Available at: <https://www.tadviser.ru/index.php> (accessed 20.03.2023).
8. *IIoT – Industrial Internet of Things (Promyshlennyy internet veshchey).* Available at: <https://www.tadviser.ru/index.php> (accessed 20.03.2023).
9. Boris Shiklo. *IoT in Manufacturing: The Ultimate Guide.* Available at: <https://www.scnsoft.com/blog/iot-in-manufacturing> (accessed 20.03.2023).

Информация об авторах / Information about the authors

Игорь Анатольевич Кубасов

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

Igor A. Kubasov

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

**Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов /
The author declares no conflicts of interests.**

Поступила в редакцию/Received 07.03.2023

Поступила после рецензирования/Revised 25.03.2023

Принята к публикации/Accepted 17.04.2023

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ СОЗДАНИЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ТЕКСТУРИРОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ ПЬЕЗОЭЛЕМЕНТОВ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

А. А. Трофимов¹, В. В. Кикот², Е. А. Фокина³, Д. М. Марков⁴, И. Е. Смирнов⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} Пензенский государственный университет, Пенза, Россия
¹ alex.t1978@mail.ru, ² kikot.v.v@mail.ru, ^{3, 4, 5} iit@pnzgu.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Важнейшим стимулом к исследованию пьезокерамических материалов служат возрастающие требования к расширению диапазона рабочих температур, улучшению метрологических характеристик, устойчивости к воздействию дестабилизирующих факторов устройств, создаваемых на их основе. При этом наряду с поиском новых перспективных материалов и отработкой технологии их изготовления, направленными на решение отмеченных проблем, все более необходимой является разработка высокотемпературных текстурированных материалов для изготовления многослойных пьезоэлементов преобразователей. *Материалы и методы.* Методы исследований выбирали исходя из возможности получения наиболее полной информации об изменении структуры и свойств материала после спекания и поляризации изделий. При выполнении исследований применены рентгеноструктурный, рентгенографический, металлографический и электронно-микроскопический анализы. В ходе работы проводили измерения механической и электрической прочности, трещиностойкости, диэлектрической проницаемости, пьезоэлектрических и сегнетоупругих характеристик изделий. *Результаты.* Разработана технология изготовления многослойных пьезопакетов, получены результаты отработки технологии получения пьезокерамики системы твердых растворов, проведены исследования структуры, диэлектрических и пьезоэлектрических свойств керамики в интервале температур 20 ÷ 600 °С. Изготовлены экспериментальные образцы многослойных пьезоэлементов.

Ключевые слова: пьезочувствительность, пьезокерамический элемент, пьезопривод, технология изготовления, многослойная структура, пьезоактюатор, макет, шликерное литье

Для цитирования: Трофимов А. А., Кикот В. В., Фокина Е. А., Марков Д. М., Смирнов И. Е. Исследование технологии создания высокотемпературных текстурированных материалов для изготовления многослойных пьезоэлементов преобразователей // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 2. С. 90–95. doi:10.21685/2307-4205-2023-2-10

RESEARCH OF TECHNOLOGY FOR CREATING HIGH-TEMPERATURE TEXTURED MATERIALS FOR MANUFACTURING MULTILAYER PIEZO TRANSDUCER ELEMENTS

A.A. Trofimov¹, V.V. Kikot², E.A. Fokina³, D.M. Markov⁴, I.E. Smirnov⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} Penza State University, Penza, Russia
¹ alex.t1978@mail.ru, ² kikot.v.v@mail.ru, ^{3, 4, 5} iit@pnzgu.ru

Abstract. *Background.* The most important stimulus for the study of piezoceramic materials is the increasing requirements for extending the operating temperature range, improving the measurement characteristics, and the stability to destabilizing factors of the devices created on their basis. However, along with a search for new promising materials and refinement of manufacturing technology to solve the above problems, the development of high-temperature textured materials for manufacturing multilayer piezoelectric transducer elements is becoming increasingly necessary. *Materials and methods.* Research methods were chosen based on the possibility of obtaining the most complete information about the change in the structure and properties of the material after sintering and polarization of products. When carrying out research, X-ray structural, radiographic, metallographic and electron-microscopic analyses were used. The measurements of mechanical and electrical strength, fracture resistance, dielectric permittivity, piezoelectric and segmented elastic characteristics of the products were carried out in the course of the work. *Results.* The technology of multilayer piezo packages production has been developed, the results of the technology of solid solution system piezoceramics production have been obtained, the structure, dielectric and piezoelectric properties of ceramics in the temperature range 20÷600 °C have been studied. Experimental samples of multilayer piezoelements were made.

Keywords: piezosensitivity, piezoceramic element, piezoceramic elements, manufacturing technology, multi-layer structure, piezoactuator, model, slip casting

For citation: Trofimov A.A., Kikot V.V., Fokina E.A., Markov D.M., Smirnov I.E. Research of technology for creating high-temperature textured materials for manufacturing multilayer piezo transducer elements. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2023;(2):90–95. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2023-2-10

Основная часть

Пьезокерамика находит широкое применение в различных областях народного хозяйства, ракетно-космической и специальной техники [1–3]. Пьезокерамические элементы могут быть использованы в различных акустических устройствах, в датчиках для измерения давлений, вибраций и ускорения, датчиках для ультразвуковых линий задержки, в фильтровой технике, системах зажигания, гироскопах, пьезотрансформаторах. Находят применение в телефонах, микрофонах, звукозаписывающих устройствах, предназначенных для интенсификации технологических процессов, сейсмоприемниках, аппаратах медицинской диагностики, гироскопах и многих других устройствах.

Пьезокерамические элементы в составе многослойной структуры достаточно широко используются для создания чувствительных элементов датчиков высокой чувствительности, микроконденсаторов переменной емкости, микрофазовращателей, переключателей, пьезоприводов, управляемых микрозеркалами для адаптивной оптики и других устройствах микро- и нанoeлектроники.

Производство многослойных пьезокерамических элементов, состоящих из чередующихся слоев, обладает рядом преимуществ:

- тонкие керамические слои позволяют создавать большие перемещения при низких напряжениях возбуждения (20–100 В) [4];
- высокая интенсивность электрического поля (до 3000 В/мм) позволяет получить большую величину перемещения на единицу объема;
- малая мощность потребления;
- надежная работа в жестких условиях благодаря использованию встроенных электродов.

Разнообразие областей применения пьезокерамики приводит к большому разнообразию требований на ее свойства. Например: для специальных пьезодатчиков [5] требуется керамика, способная работать в широком интервале температур, для фильтровых резонаторов необходима высокая стабильность параметров в широком интервале температур и в течение длительного промежутка времени, для гидроакустических применений необходима пьезокерамика способная работать в сильных электрических полях и при больших давлениях, для гидроакустики и сейсмоприемников требуется высокоэффективная пьезокерамика (с большими значениями пьезомодулей). Требования, предъявляемые к пьезокерамике, непрерывно повышаются. Это заставляет искать новые пьезокерамические материалы и исследовать их свойства.

К изыскиваемым в этой работе пьезоэлектрическим материалам для работы их в качестве преобразователя в специальных пьезодатчиках предъявляются следующие требования:

- работоспособность в диапазоне температур от минус 60 °С до +600 °С;
- высокая чувствительность;
- минимальное изменение чувствительности от времени, температуры, давления;
- минимальный температурный гистерезис чувствительности;
- высокая прочность пьезокерамики.

Создание сегнетопьезоэлектрических материалов с оптимальными свойствами для различных применений является важной материаловедческой задачей. Параметры пьезоэлементов в значительной степени определяются составом пьезокерамического материала, из которого они изготавливаются.

К настоящему времени практическое применение нашли в основном три группы пьезокерамических материалов. К ним относятся: титанат бария и его производные материалы на основе титаната свинца и ниобатные материалы. Эти материалы наиболее полно исследованы и именно для них в литературе известны характеристики, определяющие возможность использования их в качестве пьезоэлектрических преобразователей. Так, известно, что применение в пьезодатчиках керамики титаната бария ограничено температурами порядка 70–80 °С.

Введение добавок Са и Рb повышает рабочие температуры до 110–130 °С, но вдвое снижает чувствительность. Введение кобальта в твердый раствор титаната бария-кальция (BaCa)TiO₃

повышает устойчивость состава к воздействию сильных электрических полей и больших механических напряжений. Низкий верхний предел рабочих температур и низкотемпературные фазовые переходы ограничивают применение керамик на основе титаната бария в широком температурном интервале.

С целью расширения интервала рабочих температур были разработаны пьезодатчики с керамикой $(PbBa)Nb_2O_6$. Эти пьезодатчики работают на сдвиг, чувствительность их характеризуется пьезомодулем d_{15} , верхний предел рабочих температур – до 200 °С.

Пьезокерамика на основе твердых растворов $(PbBa)Nb_2O_6$ по ряду показателей эффективнее составов системы титаната бария, однако пока не удается определить условия для получения стабильных составов.

Сейчас в пьезоэлектрических датчиках ценятся пьезокерамические материалы системы ЦТС. Семейство пьезокерамик ЦТС (цирконат-титанат свинца) имеет температуры Кюри до 350–400 °С, рабочие температуры порядка 250 °С, хорошую пьезочувствительность, но требуют тщательных исследований с учетом предъявляемых требований [6].

В последние годы интенсивно ведется разработка новых пьезокерамических материалов. Сейчас известны составы, у которых достаточно хорошие пьезосвойства сохраняются до 400 °С. Это материалы на основе титаната свинца, метаниобата свинца, метаниобатов натрия и калия.

При проведении исследований решались следующие задачи:

- поиск и исследование новых пьезокерамических материалов, работоспособных в интервале рабочих температур, – от минус 60 °С до +600 °С;
- исследование возможности повышения температурной стабильности пьезокерамики;
- поиск путей увеличения пьезочувствительности пьезоматериалов;
- разработка теоретических основ влияния дефектов структуры на стабильность рабочих параметров пьезоматериалов;
- получение и исследование диэлектрических свойств и стабильности рабочих параметров при воздействии дестабилизирующих факторов, в том числе при воздействии повышенных температур;
- внедрение разработанной технологии изготовления высокотемпературных текстурированных материалов пьезоэлементов при изготовлении пьезопроводов на основе пьезоэлектрических пластин, полученных методом холодного полусухого прессования для систем структурного мониторинга работоспособности объектов специальной техники. Укрупненная структурная схема технологического процесса производства пьезокерамических элементов методом холодного полусухого прессования представлена на рис. 1.

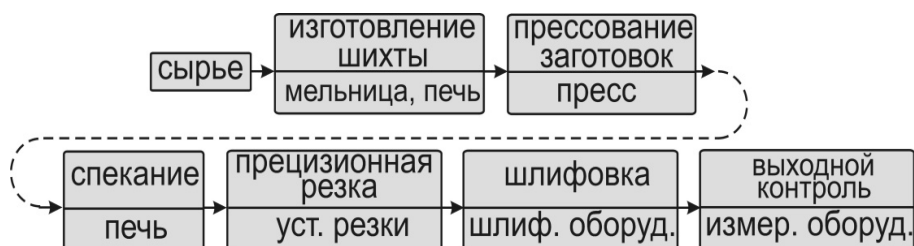


Рис. 1. Укрупненная структурная схема технологического процесса производства пьезокерамических элементов

При проведении исследований рассмотрены известные сейчас сегнетоэлектрики и твердые растворы на их основе, перспективные для получения пьезокерамики. Проведен обзор кристаллохимических принципов поиска новых составов, работоспособных в диапазоне температур от минус 60 °С до +600 °С, проанализированы экспериментальные данные относительно возможности управления электрофизическими свойствами материала, проанализированы возможности повышения пьезоактивности.

Рассмотрены вопросы технологии производства пьезокерамики, влияние отдельных технологических факторов на ее электрофизические и механические свойства. Исследованы режимы термообработки и поляризации, проведен рентгеноструктурный анализ.

Получены зависимости, показывающие влияние примесных атомов на стабильность пьезоэлектрических свойств пьезокерамики. Проведен анализ основных механизмов, связанных с диффузией примесей к доменным границам, определены характерные времена таких процессов, предложены

рекомендации по улучшению стабильности рабочих параметров пьезоматериалов. Получены результаты отработки технологии получения пьезокерамики системы твердых растворов $(1-x)\text{PbTiO}_3 + x\text{Bi}(\text{Zn}_{0,5}\text{Zr}_{0,5})\text{O}_3$. Проведены исследования структуры, диэлектрических и пьезоэлектрических свойств этой керамики в интервале температур $20 \div 600^\circ\text{C}$, стабильности пьезосвойств при циклическом изменении температуры от 20 до 600°C . Изготовлены экспериментальные образцы многослойных пьезоэлементов с техническими характеристиками, приведенными в табл. 1.

Таблица 1

Технические характеристики экспериментальных образцов многослойных пьезоэлементов

Наименование характеристики	Значение
Длина a , мм	от 5 до 50
Ширина b , мм	от 5 до 50
Толщина H , мм	от 1 до 10
Толщина слоя h , мкм	от 30 до 50
Количество слоев n , шт.	Определяется толщиной одного слоя и толщиной пьезоэлемента
Пьезочувствительность d_{33} , не менее, пКл/Н	250
Температура Кюри, $^\circ\text{C}$, не менее	260
*Максимальное напряжение, В	200
Максимальная деформация, %	0,1
**Электрическая емкость, мкФ	не менее 1
Максимальное электрическое поле, кВ/мм	2

Внешний вид одного из изготовленных макетов многослойного пьезоактюатора приведен на рис. 2.

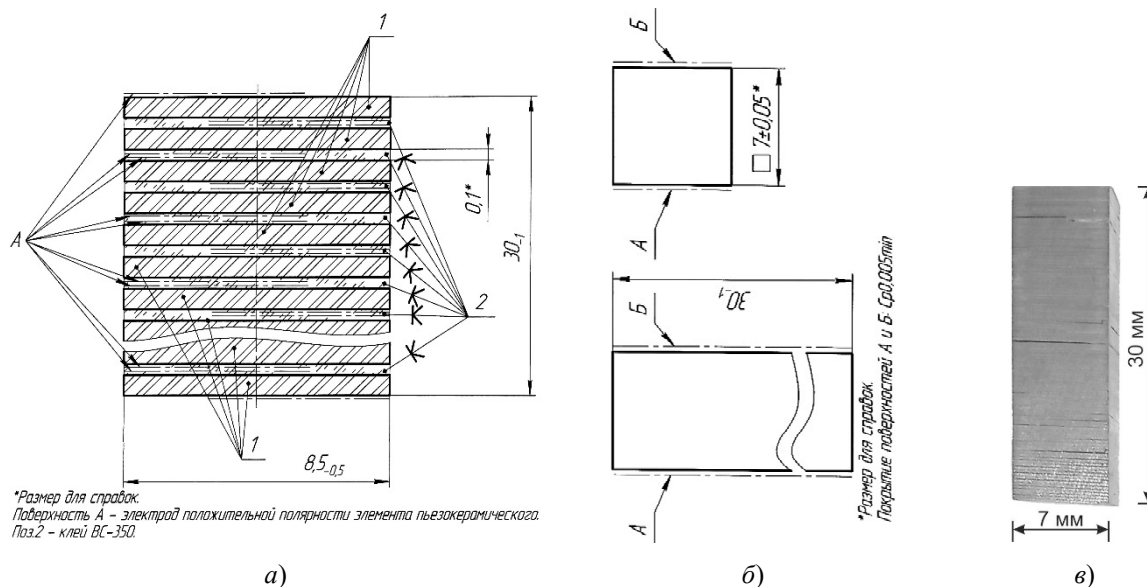


Рис. 2. Внешний вид макета многослойного пьезоактюатора:

a – эскиз пьезосборки; b – эскиз пьезоактюатора; $в$ – макет пьезоактюатора

В результате проработки вопросов по изготовлению пьезопакетов разработана и отработана технология изготовления многослойных пьезопакетов с линейной деформацией до 15 мкм при высоте пьезопакета 30 мм и управляющем напряжении 200 В [7].

Заключение

Дальнейшее улучшение технических характеристик (увеличение линейной деформации при заданном управляющем напряжении) возможно при отработке технологии соединения (склеивания) пьезоэлементов в пьезопакете. В частности:

- при отработке возможности изготовления пьезокерамических элементов толщиной менее 100 мкм;
- при выборе клея с пониженной вязкостью, обеспечивающего минимально возможную толщину клеевого слоя.

Для выполнения технических требований необходимо применение технологии изготовления монолитных многослойных пьезоэлементов с использованием технологии шликерного литья.

Список литературы

1. Дмитриенко А. Г., Трофимов А. Н., Трофимов А. А. Вопросы разработки унифицированных конструкций датчиков для перспективных систем измерения и контроля специальной техники // Измерительная техника. 2010. № 10. С. 18–21.
2. Дмитриенко А. Г., Блинов А. В., Трофимов А. Н., Трофимов А. А. Тенденции развития датчиков, преобразователей и на их основе систем измерения, мониторинга и контроля технически сложных объектов ракетно-космической техники // Датчики и системы. 2012. № 9. С. 4–6.
3. Бастрыгин К. И., Трофимов А. А. Система измерения, мониторинга, контроля и диагностики параметров ракетного двигателя // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2017. № 3. С. 18–25.
4. Губич И. А., Кикот В. В., Кошкин Г. А. [и др.]. Исследование многослойных пьезоактюаторов инжекторов системы управления питанием двигателей внутреннего сгорания // Проблемы автоматизации и управления в технических системах : XXXIV Междунар. науч.-практ. конф. Пенза : Изд-во ПГУ, 2021. С. 98–103.
5. Бастрыгин К. И., Трофимов А. А., Баранов А. С. [и др.]. Имитационное моделирование пьезоэлектрического датчика давления // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2017. № 1. С. 20–28.
6. Окадзак К. Технология керамических диэлектриков : пер. с японского. М. : Энергия, 1976. 336 с.
7. Бобцов А. А., Бойков В. И., Быстров С. В., Григорьев В. В. Исполнительные устройства и системы для микроперемещений. СПб. : ГУ ИТМО, 2011. 131 с.

References

1. Dmitrienko A.G., Trofimov A.N., Trofimov A.A. Issues of development of unified sensor designs for advanced measurement and control systems of special equipment. *Izmeritel'naya tekhnika = Measuring equipment*. 2010;(10):18–21. (In Russ.)
2. Dmitrienko A.G., Blinov A.V., Trofimov A.N., Trofimov A.A. Trends in the development of sensors, transducers and on their basis measurement systems, monitoring and control of technically complex objects of rocket and space technology. *Datchiki i sistemy = Sensors and systems*. 2012;(9):4–6. (In Russ.)
3. Bastrygin K.I., Trofimov A.A. System of measurement, monitoring, control and diagnostics of rocket engine parameters. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2017;(3):18–25. (In Russ.)
4. Gubich I.A., Kikot V.V., Koshkin G.A. et al. Investigation of multilayer piezoactuators of injectors of the internal combustion engine power management system. *Problemy avtomatizatsii i upravleniya v tekhnicheskikh sistemakh: XXXIV Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. = Problems of automation and control in technical systems : XXXIV International scientific and practical conference*. Penza: Izd-vo PGU, 2021:98–103. (In Russ.)
5. Bastrygin K.I., Trofimov A.A., Baranov A.S. et al. Simulation modeling of a piezoelectric pressure sensor. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2017;(1):20–28. (In Russ.)
6. Okadzaki K. *Tekhnologiya keramicheskikh dielektrikov: per. s yaponskogo = Technology of ceramic dielectrics : translated from Japanese*. Moscow: Energiya, 1976:336. (In Russ.)
7. Bobtsov A.A., Boykov V.I., Bystrov S.V., Grigor'ev V.V. *Ispolnitel'nye ustroystva i sistemy dlya mikroperemeshcheniy = Actuators and systems for micro-displacements*. Saint Petersburg: GU ITMO, 2011:131. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Алексей Анатольевич Трофимов
 доктор технических наук, доцент,
 профессор кафедры информационно-измерительной
 техники и метрологии,
 Пензенский государственный университет
 (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
 E-mail: alex.t1978@mail.ru

Aleksey A. Trofimov
 Doctor of technical sciences, associate professor,
 professor of the sub-department of information
 and measuring equipment and metrology,
 Penza State University
 (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Виктор Викторович Кикот

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры ракетно-космического
и авиационного приборостроения,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: kikot.v.v@mail.ru

Екатерина Александровна Фокина

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

Дмитрий Максимович Марков

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

Иван Евгеньевич Смирнов

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

Victor V. Kikot

Candidate of technical sciences, associate professor,
associate professor of the sub-department
of rocket-space and aviation instrumentation,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Ekaterina A. Fokina

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

Dmitry M. Markov

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

Ivan E. Smirnov

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 15.04.2023

Поступила после рецензирования/Revised 30.04.2023

Принята к публикации/Accepted 05.05.2023

ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

DIAGNOSTIC METHODS FOR ENSURING RELIABILITY AND QUALITY OF COMPLEX SYSTEMS

УДК 004.05

doi:10.21685/2307-4205-2023-2-11

ТЕСТИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ВЫПОЛНЕНИЯ КОДА PYTHON ПРОГРАММ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ЭТАПА СЕРТИФИКАЦИОННЫХ ИСПЫТАНИЙ (РАЗРАБОТКИ) В СИСТЕМЕ СЕРТИФИКАЦИИ МИНОБОРОНЫ РОССИИ

В. В. Самаров

ООО «16 НИИЦ», Мытищи, Московская обл., Россия
samarov_vladimir@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Во многих случаях программные изделия, подлежащие проверке в системе обязательной сертификации Минобороны России, разрабатываются с помощью интерпретируемого языка программирования Python. При проведении проверок приложений, разработанных на языке Python на предмет соответствия их кода требованиям руководящего документа «Защита от несанкционированного доступа к информации. Часть 1. Программное обеспечение средств защиты информации. Классификация по уровню контроля отсутствия недеklarированных возможностей» (Гостехкомиссия России, М., 1999), далее – РД НДВ, наряду со статическим анализом должен проводиться динамический анализ (для уровней контроля РД НДВ 3 и 2). *Материалы и методы.* Вместе с тем в настоящее время в системе сертификации Минобороны России отсутствуют сертифицированные средства и рекомендованные методы и алгоритмы, которые могут быть использованы для проведения тестирования динамического выполнения кода Python программ на этапе сертификационных испытаний. Перспективным подходом в исследовании недеklarированных возможностей кода Python приложений при проведении динамического тестирования является метод, основанный на использовании статистики генерируемой встроенным профайлером интерпретатора Python. *Результаты и выводы.* Подробно описана последовательность действий по формированию с помощью статистических данных, полученных посредством системы профилирования Python, отчетности, анализ которой позволяет сделать обоснованные выводы по соответствию/несоответствию исследуемого кода приложения, разработанного на языке программирования Python требованиям РД НДВ, в части динамического анализа.

Ключевые слова: сертификационные испытания программных изделий, динамический анализ кода Python программ, контроль полноты и отсутствия избыточности на уровне файлов и функциональных объектов, профилирование кода для динамического анализа

Для цитирования: Самаров В. В. Тестирование динамического выполнения кода python программ при проведении этапа сертификационных испытаний (разработки) в системе сертификации Минобороны России // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 2. С. 96–103. doi:10.21685/2307-4205-2023-2-11

TESTING THE DYNAMIC EXECUTION OF PYTHON PROGRAM CODE DURING THE CERTIFICATION TESTING (DEVELOPMENT) STAGE IN THE CERTIFICATION SYSTEM OF THE MINISTRY OF DEFENSE OF RUSSIA

V.V. Samarov

LLC "16 NIITS", Mytishchi, Moscow region, Russia
samarov_vladimir@mail.ru

Abstract. *Background.* In many cases, software products subject to verification in the mandatory certification system of the Russian Ministry of Defense are developed using the interpreted Python programming language. When checking applications developed in the Python language for compliance of their code with the requirements of the governing document "Protection against unauthorized access to information. Part 1. Information security software. Classification according to the level of control of the absence of undeclared capabilities" (State Technical Commission of Russia, Moscow, 1999) 1, hereinafter – RD NDV, along with static analysis, a dynamic analysis should be carried out (for control levels of RD NDV 3 and 2). *Materials and methods.* At the same time, at present, the certification system of the Russian Ministry of Defense lacks certified tools and recommended methods and algorithms that can be used to test the dynamic execution of the Python code of programs at the stage of certification tests. A promising approach in the study of undeclared capabilities of the Python code of applications during dynamic testing is a method based on the use of statistics generated by the built-in profiler of the Python interpreter. *Results and conclusions.* The article describes in detail the sequence of actions for generating, using statistical data obtained through the Python profiling system, reporting, the analysis of which allows drawing reasonable conclusions on the compliance / non-compliance of the studied application code developed in the Python programming language with the requirements of the RD NDV, in terms of dynamic analysis.

Keywords: certification tests of software products, dynamic code analysis of Python programs, control of completeness and lack of redundancy at the level of files and functional objects, code profiling for dynamic analysis

For citation: Samarov V.V. Testing the dynamic execution of python program code during the certification testing (development) stage in the certification system of the ministry of defense of Russia. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2023;(2):96–103. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2023-2-11

В системе сертификации Минобороны России динамический анализ исследуемого кода проводится в соответствии с требованиями РД НДВ [1].

В соответствии с этим документом при проведении динамического анализа должны быть осуществлены:

- контроль выполнения функциональных объектов (ФО);
- сопоставление фактических маршрутов выполнения функциональных объектов и маршрутов, построенных в процессе проведения статического анализа.

Для выполнения перечисленных требований при анализе проектов, разработанных на языке Python, предлагается воспользоваться статистикой, которая может быть получена профилировщиком интерпретатора Python – cProfile [2].

Действительно, ранее автором была рассмотрена отчетность, предоставляемая профилировщиком cProfile, и установлено, что генерируемой в результате профилирования статистической информации достаточно для формирования обоснованного вывода как по отработавшим функциональным объектам, так и по маршрутам их выполнения [3].

Для тестирования динамического выполнения кода Python программ при проведении сертификационных испытаний (этапа разработки) с использованием профилировщика cProfile (системы профилирования Python) предлагается воспользоваться следующим алгоритмом (на примере тестирования кросс-платформенного проекта, разработанного на языке Python, функционирующего в том числе в сертифицированной ОС «Astra Linux Special Edition» 1.6) [4]:

1. С помощью встроенного профилировщика cProfile получить статистику вызовов ФО исследуемого проекта при его выполнении в формате pstats [2], для чего в терминале выполнить команду:

```
python -m cProfile -o proj_name.pstats proj_main_module_app.py,
```

где *proj_name.pstats* – результаты профилирования проекта *proj_name* с главным модулем *proj_main_module_app.py* в потоковом формате pstats.

После чего произвести обработку заявленных функциональных возможностей исследуемого проекта. По окончании обработки функциональных возможностей исследуемого проекта зафиксировать сформированный файл *proj_name.pstats proj*.

2. Получить из файла *proj_name.pstats* статистическую информацию в текстовом виде, для чего в терминале выполнить команду:

```
python -c "import pstats; p = pstats.Stats('proj_name.pstats'); p.sort_stats('time').print_stats()" > proj_name_prof.txt
```

После чего зафиксировать полученный текстовый файл *proj_name_prof.txt*

3. С помощью питон-модуля *gprof2dot* [5] и результатов профилирования, сформированных при выполнении п.1, получить граф (файл *proj_name.png* *) с деревом фактических вызовов функций исследуемого проекта, для чего в терминале выполнить следующие команды:

```
pip3 list // просмотр установленных в системе пакетов
pip3 install gprof2dot // установка питон библиотеки gprof2dot (в случае отсутствия данного пакета в системе)
sudo apt list graphviz */ получение информации о пакете graphviz (установлен/не установлен)
sudo apt install graphviz */ установка пакета graphviz (если не установлен)
gprof2dot -f pstats proj_name.pstats | dot -Tpng -o proj_name.png
```

После чего зафиксировать полученный графический файл *proj_name.png*

Примечание: для построения графов, в системе должно быть установлено ПО «Graphviz» [6] (входит в состав ОС «Astra Linux Special Edition» 1.6. В случае проведения испытаний в ОС семейства «Windows» ПО «Graphviz» должно быть установлено дополнительно).

4. Произвести формирование текстового файла *FO_proj_name.txt* с перечнем функциональных объектов в виде

```
Path_to_analized_proj+file_name1_py[Num_Str]FO_name[1]+(«.fnc»)
Path_to_analized_proj+file_name1_py[Num_Str]FO_name[2]+(«.fnc»)
.....
Path_to_analized_proj+file_name1_py[Num_Str]FO_name[A]+(«.fnc»)
Path_to_analized_proj+file_name2_py[Num_Str]FO_name[1]+(«.fnc»)
.....
Path_to_analized_proj+file_nameN_py[Num_Str]FO_name[Z]+(«.fnc»)
(где:
```

Path_to_analized_proj – абсолютный путь к каталогу с анализируемым проектом;

file_name_py – имя файла из каталога с анализируемым проектом;)

file_name_py[Num_Str]FO_name – имя ФО (класса, функции) из файла *file_name_py* (ФО объявлен в строке [Num_Str] файла);

«.fnc» – технологический маркер, обозначающий класс/функцию как объект, для которого применимы операции, предоставляемые файловой системой.

Примечание: для получения статистических данных, необходимых для дальнейшего получения перечня функциональных объектов в представленном виде, требуется воспользоваться существующими инструментами статического анализа (например: утилитой *ctags* [7], статическим анализатором исходных текстов – «SCI Understand» [8] и др.) или разработать Python утилиту, осуществляющую построение абстрактного синтаксического дерева (использование стандартного Python-модуль «ast» [9] позволяет сформировать перечень функциональных объектов анализируемого проекта (в том числе с корректной обработкой функций-декораторов, а также асинхронных функций).

5. По исходным тестам исследуемого проекта сформировать граф возможных вызовов ФО, для чего в терминале выполнить следующие действия:

```
pip3 list // просмотр установленных в системе пакетов
pip3 install code2flow // установка питон библиотеки code2flow
code2flow -language = py Path_to_analized_proj -o proj_name_stat.png *
```

После этого зафиксировать полученный графический файл *proj_name_stat.png*, представляющий собой граф вызовов функциональных объектов исследуемого проекта.

Примечание: для построения графов в системе должно быть установлено ПО «Graphviz» (входит в состав ОС «Astra Linux»). В случае проведения испытаний в ОС «Windows» ПО «Graphviz» должно быть установлено дополнительно).

6. Осуществить преобразование данных, полученных на этапе выполнения п. 2 (файл *proj_name_prof.txt*), к представлению, аналогично описанному в п.4.

7. Произвести сравнение перечня функциональных объектов, сформированного по результатам статического анализа (п. 4), с фактически отработавшими ФО (п. 6), для этого выполнить следующие действия:

1) скопировать в каталог *\data* «ПИ «ПМАКФИ-16» [10] файлы *FO_proj_name.txt* и *proj_name_prof.txt*;

2) запустить ПИ «ПМАКФИ-16» с параметрами:

```
python app.py --first = data/FO_proj_name.txt --second = data/proj_name_prof.txt
--dest_path = PROJ_DIR --reg = 1 --exts = ".fnc"
```

где *app.py* – главный модуль ПИ «ПМАКФИ-16»; *--first* – параметр с указанием пути к первому файлу *FO_proj_name.txt*, сформированному на этапе выполнения п. 4; *--second* – параметр с указанием пути ко второму файлу *proj_name_prof.txt*, сформированному на этапе выполнения п. 2; *--dest_path = PROJ_DIR* – имя каталога, по которому производится анализ (основной каталог запуска питон проекта).

8. Перейти в каталог *\result* «ПИ «ПМАКФИ-16». Ознакомиться с файлами отчетов (*Rep_equals.txt* – перечень ФО, определенных в результате статического анализа и фактически отработавших по результатам динамического анализа; *Rep_file1_only.txt* – перечень ФО, определенных в результате статического анализа, но отработавших по результатам динамического анализа; *Rep_file2_only.txt** – перечень ФО, фактически отработавших по результатам динамического анализа, но отсутствующих в файлах исходных текстов исследуемого проекта по результатам статического анализа (рис. 1); *result.html* – сводный html отчет с результатами анализа, рис. 2).

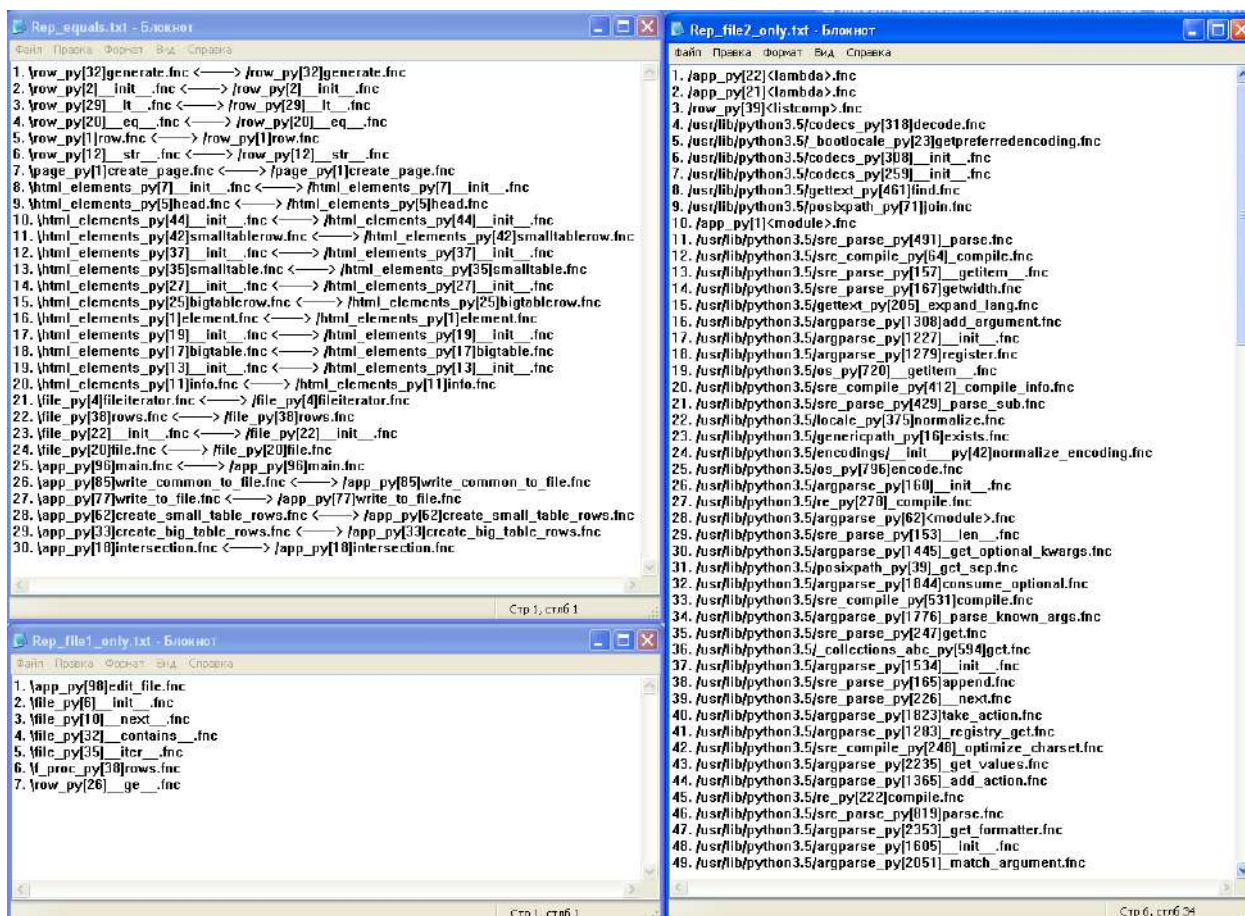


Рис. 1. Видеокادر отчетов *Rep_equals.txt*, *Rep_file1_only.txt* и *Rep_file2_only.txt*, сформированных по результатам анализа тестового проекта

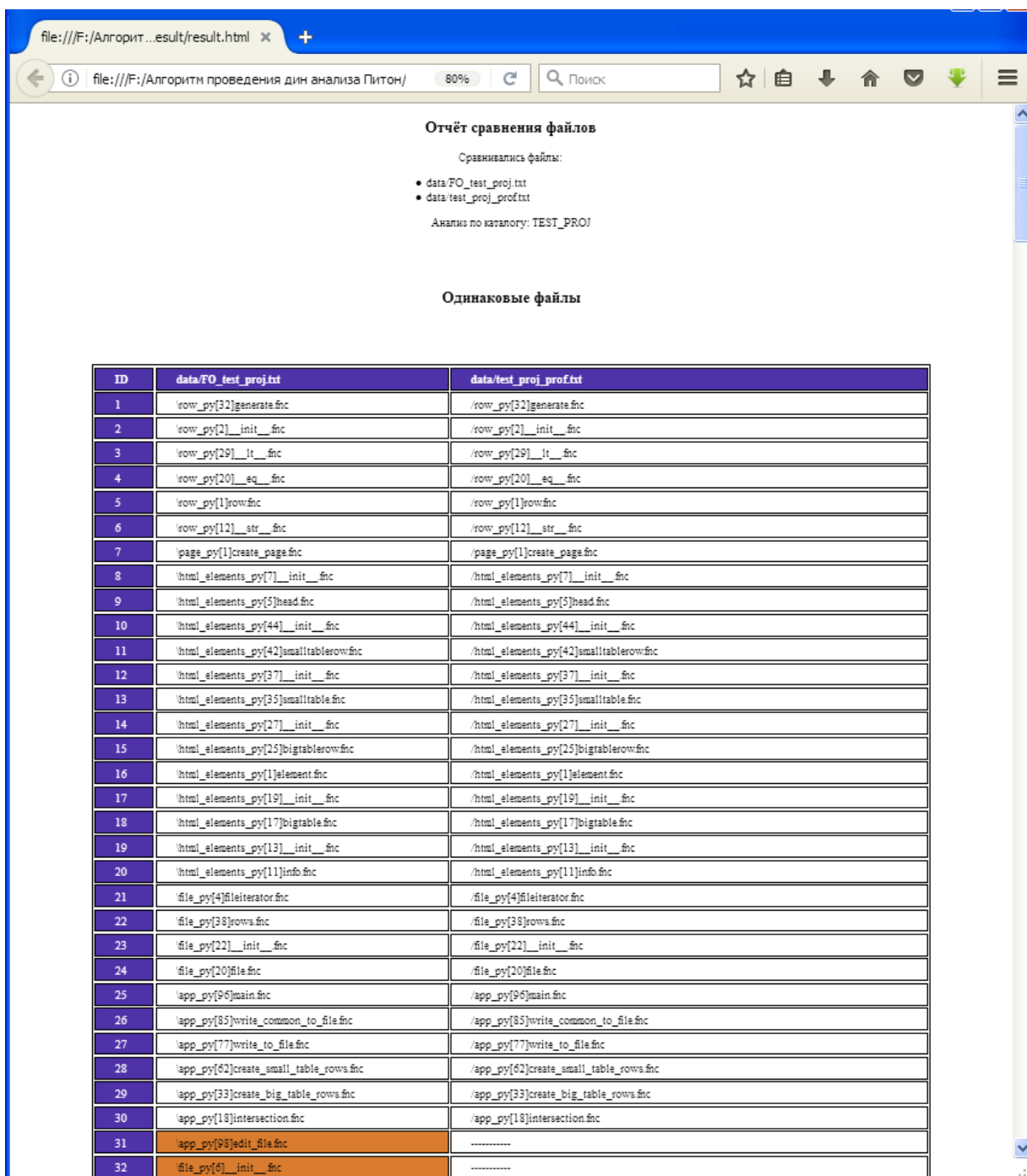


Рис. 2. Видеокادر сводного отчета *result.html*, сформированного по результатам анализа тестового проекта

9. По результатам анализа отчетности, сформированной «ПИ «ПМАКФИ-16», сделать заключения:

- о фактической полноте отработки функциональных объектов из состава пакета с исходными текстами исследуемого проекта (файлы *Rep_equals.txt* и *Rep_file1_only.txt*) и, как следствие, отсутствие (наличие) функциональной и файловой избыточности;
- по полноте исходных текстов на уровне файлов и на уровне функциональных объектов.

Примечание: при анализе файла отчета *Rep_file2_only.txt* обратить внимание на файлы, из которых вызывались функциональные объекты, с целью определения источника и статуса соответствующего программного модуля. Статус программного модуля может быть:

- верифицированный, в случае, если данный программный модуль получен из надежного источника (например, из состава интерпретатора Python версии 3.5, входящего в состав сертифицированной ОС «Astra Linux» 1.6);

– неverified, в случае, если источник получения данного программного модуля (библиотеки) не установлен/сомнительный (при идентификации статуса используемых файлов особое внимание уделить Python файлам из каталогов «Site-Packages» и «Dist-packages», а также версии фактически используемого интерпретатора Python).

10. Ознакомиться с файлом *proj_name.png*, представляющим собой граф фактических вызовов функций тестового проекта (сформирован на этапе выполнения действий описанных в п. 3, рис. 3 (справа), сравнить его с графом вызовов функций (файл *proj_name_stat.png*, сформирован на этапе выполнения п. 5), построенных в результате анализа исходных текстов проекта, рис. 3 (слева)).

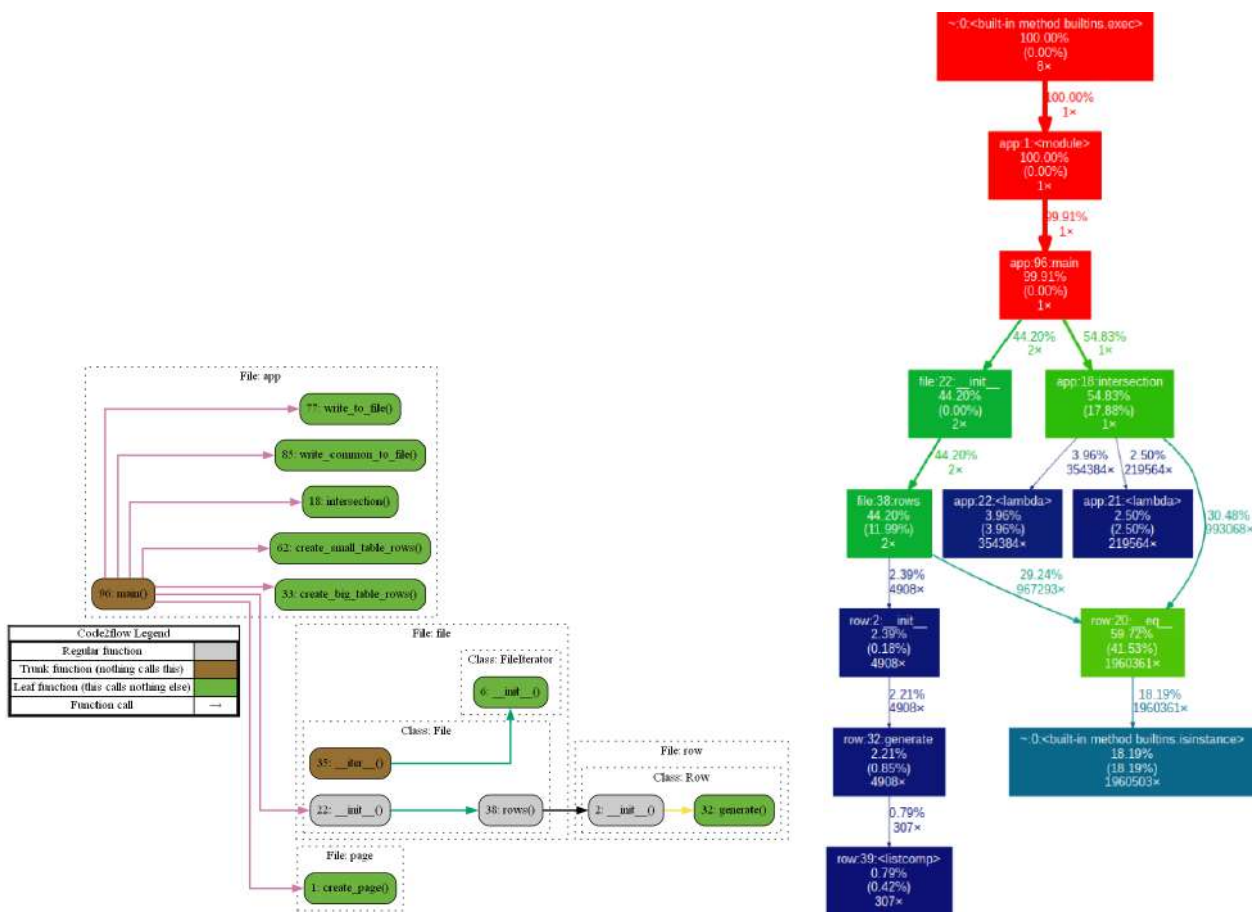


Рис. 3. Видеокادر файлов отчетов, представляющих собой графы вызовов функциональных объектов тестового проекта, сформированных по исходным текстам на этапе статического анализа (слева) и по результатам фактического исполнения кода программы (справа)

11. Сделать заключение о соответствии (несоответствии) фактических маршрутов выполнения функциональных объектов, сформированных по результатам выполнения исследуемого проекта, с возможными маршрутами выполнения ФО, сформированными по результатам выполнения статического анализа (при анализе акцентировать внимание на обязательность выполнения критических маршрутов выполнения программы).

Заключение

Приведенный алгоритм, реализующий исследовательский подход, основанный на использовании системы профилирования sProfile, может быть использован специалистами испытательных лабораторий (аккредитованных в системах сертификации Минобороны России) при проведении соответствующих этапов сертификационных испытаний, а также разработчиками программных изделий (предприятиями промышленности) на этапе разработки и тестирования.

Список литературы

1. Защита от несанкционированного доступа к информации Часть 1. Программное обеспечение средств защиты информации. Классификация по уровню контроля отсутствия недеklarированных возможностей. URL: <https://fstec.ru/tekhnicheskaya-zashchita-informatsii/dokumenty/114-spetsialnye-normativnye-dokumenty/382-rukovodyashchij-dokument-prikaz-predsedatelya-gostekhkomissii-rossii-ot-4-iyunya-1999-g-n-114> (дата обращения: 20.02.2023).
2. 27.4. The Python Profilers – Python 3.5.9 documentation. URL: <https://docs.python.org/3.5/library/profile.html> (дата обращения: 20.02.2023).
3. Старостин И. Е. Программная реализация решения потенциально-поточным методом задач построения моделей систем из результатов испытаний этих систем // Надежность и качество сложных систем. 2020. № 3. С. 128–136. doi:10.21685/2307-4205-2020-3-15
4. Операционная система Astra Linux Special Edition: описание, назначение, применение. URL: <https://astralinux.ru/products/astra-linux-special-edition> (дата обращения: 20.02.2023).
5. gprof2dot ‘ PyPi. URL: <https://pypi.org/project/gprof2dot> (дата обращения: 20.02.2023).
6. Graphviz. URL: <https://graphviz.org> (дата обращения: 20.02.2023).
7. Universal Ctags. URL: <https://ctags.io> (дата обращения: 20.02.2023).
8. Understand: An IDE and Static Code analysis Tool by SciTools. URL: <https://www.scitools.com> (дата обращения: 20.02.2023).
9. 32.2. ast – Abstract Syntax Trees – Python 3.5.9 documentation. URL: <https://docs.python.org/3.5/library/ast.html> (дата обращения: 20.02.2023).
10. Самаров В. В., Юрков Н. К. Программная реализация контроля файловой избыточности и подтверждения полноты исходных текстов на уровне файлов // Надежность и качество сложных систем. 2021. № 2. С. 104–108. doi:10.21685/2307-4205-2021-2-11

References

1. *Zashchita ot nesanktsionirovannogo dostupa k informatsii Chast' 1. Programmnoe obespechenie sredstv zashchity informatsii. Klassifikatsiya po urovnyu kontrolya otsutstviya nedeklarirovannykh vozmozhnostey = Protection against unauthorized access to information Part 1. Information security software. Classification according to the level of control of the absence of undeclared opportunities.* (In Russ.). Available at: <https://fstec.ru/tekhnicheskaya-zashchita-informatsii/dokumenty/114-spetsialnye-normativnye-dokumenty/382-rukovodyashchij-dokument-prikaz-predsedatelya-gostekhkomissii-rossii-ot-4-iyunya-1999-g-n-114> (accessed 20.02.2023).
2. *27.4. The Python Profilers – Python 3.5.9 documentation.* Available at: <https://docs.python.org/3.5/library/profile.html> (accessed 20.02.2023).
3. Starostin I.E. Software implementation of the solution of problems of constructing models of systems from the test results of these systems by a potentially streaming method. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2020;(3):128–136. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2020-3-15
4. *Operatsionnaya sistema Astra Linux Special Edition: opisaniye, naznachenie, primeneniye = Astra Linux Special Edition operating system: description, purpose, application.* (In Russ.). Available at: <https://astralinux.ru/products/astra-linux-special-edition> (accessed 20.02.2023).
5. *gprof2dot ‘ PyPi.* Available at: <https://pypi.org/project/gprof2dot> (accessed 20.02.2023).
6. *Graphviz.* Available at: <https://graphviz.org> (accessed 20.02.2023).
7. *Universal Ctags.* Available at: <https://ctags.io> (accessed 20.02.2023).
8. *Understand: An IDE and Static Code analysis Tool by SciTools.* Available at: <https://www.scitools.com> (accessed 20.02.2023).
9. *32.2. ast – Abstract Syntax Trees – Python 3.5.9 documentation.* Available at: <https://docs.python.org/3.5/library/ast.html> (accessed 20.02.2023).
10. Samarov V.V., Yurkov N.K. Software implementation of file redundancy control and confirmation of completeness of source texts at the file level. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2021;(2):104–108. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2021-2-11

Информация об авторах / Information about the authors

Владимир Владимирович Самаров

заместитель начальника испытательной лаборатории,
 ООО «16 НИИЦ»
 (Россия, Московская обл., г. Мытищи,
 Олимпийский пр-т, 29)
 E-mail: samarov_vladimir@mail.ru

Vladimir V. Samarov

Deputy Head of the testing laboratory,
 LLC "16 NIITS"
 (29 Olimpiyskiy avenue, Mytishchi,
 Moscow region, Russia)

**Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов /
The author declares no conflicts of interests.**

Поступила в редакцию/Received 20.02.2023

Поступила после рецензирования/Revised 10.03.2023

Принята к публикации/Accepted 25.03.2023

МОЛНИЕЗАЩИТА ПНЕВМОКЛАПАНА ВОЗДУШНОГО СУДНА

В. Н. Савельев¹, Н. С. Новоточинов², Н. П. Ямпурин³

^{1,2} Волжский государственный университет водного транспорта, Нижний Новгород, Россия

³ Арзамасский политехнический институт (филиал) Нижегородского государственного технического университета имени Р. Е. Алексеева, Арзамас, Нижегородская обл., Россия

¹ valerijsavel@yandex.ru, ² n.novotochinov1@gmail.com, ³ yampurin@apingt.u.edu.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Важным устройством системы кондиционирования воздуха воздушного судна является система автоматического регулирования давления для гермокабины, включающая в себя ряд устройств, но одним из основных является выпускной пневмоклапан. В состав электромеханизма пневмоклапана воздушного судна входят два бесколлекторных электродвигателя, которые управляют заслонкой, с датчиками положения ротора на основе магнитоуправляемой микросхемы на эффекте Холла. Микросхема уязвима к разряду молнии, поэтому сформулированы требования к молниезащите датчика Холла: узел защиты должен иметь минимальные габариты и располагаться внутри электронного узла управления и контроля пневмоклапана как можно ближе к объекту защиты, т.е. датчику Холла. *Материалы и методы.* Пневмоклапан должен пройти испытание на восприимчивость к переходным процессам, вызванным молнией, согласно квалификационным требованиям КТ-160D по категории А3, которая обозначает испытание контактным вводом третьего уровня. Выбран элемент защиты в виде TVS диода (ограничителя напряжения), который устанавливается в цепях питания и на линиях логических сигналов с датчиков Холла. Разработана электрическая схема молниезащиты от переходных процессов на отечественной элементной базе, приведена ее практическая реализация в виде печатного узла для установки в электромеханизм пневмоклапана. Выполнено моделирование работы схемы молниезащиты от переходных процессов в программном пакете Multisim, для чего разработаны SPICE модели отечественных элементов и схема генератора микросекундных импульсов. *Результаты и выводы.* Результаты моделирования молниезащиты пневмоклапана подтвердили работоспособность предложенного решения.

Ключевые слова: воздушное судно, выпускной пневмоклапан, датчик Холла, переходные процессы, квалификационные требования, молниезащита, TVS диод, электрическая схема, печатный узел, моделирование

Для цитирования: Савельев В. Н., Новоточинов Н. С., Ямпурин Н. П. Молниезащита пневмоклапана воздушного судна // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 2. С. 104–114. doi:10.21685/2307-4205-2023-2-12

LIGHTNING PROTECTION OF THE AIR VALVE OF THE AIRCRAFT

V.N. Saveliev¹, N.S. Novotochinov², N.P. Yampurin³

^{1,2} Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia

³ Arzamas Polytechnic Institute (branch) Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Arzamas, Nizhny Novgorod region, Russia

¹ valerijsavel@yandex.ru, ² n.novotochinov1@gmail.com, ³ yampurin@apingt.u.edu.ru

Abstract. *Background.* Topicality of the topic an important device of the aircraft air conditioning system is the automatic pressure control system for the pressurized cabin, which includes a number of devices, but one of the main ones is the exhaust valve. The electromechanism of the aircraft pneumatic valve includes two brushless electric motors that control the damper, with rotor position sensors based on a magnetically controlled Hall effect microcircuit. inside the electronic control and monitoring unit of the pneumatic valve as close as possible to the object of protection, i.e. the Hall sensor. The pneumatic valve must pass the test for susceptibility to transients caused by lightning, according to the qualification requirements KT-160D in category A3, which means the third level contact test. A protection element was chosen in the form of a TVS diode (voltage limiter), which is installed in the power circuits and on the logic signal lines from the Hall sensors. *Materials and methods.* An electrical circuit of lightning protection against transients on the domestic element base has been developed, its practical implementation in the form of a printed circuit assembly for installation in the pneumatic valve electromechanism has been presented. The operation of the lightning protection circuit against transients was simulated in the Multisim software package, for which SPICE models of domestic elements and a microsecond pulse generator circuit were developed. *Results and conclusions.* The simulation results of the pneumatic valve lightning protection confirmed the operability of the proposed solution.

Keywords: aircraft, air outlet valve, Hall sensor, transients, qualification requirements, lightning protection, TVS diode, electrical circuit, printing unit, simulation

For citation: Saveliev V.N., Novotochinov N.S., Yampurin N.P. Lightning protection of the air valve of the aircraft. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2023;(2):104–114. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2023-2-12

Введение

В последние десятилетия все больше внимания уделяется системам автоматизации жизнеобеспечения воздушного судна (ВС), одной из них является система кондиционирования воздуха (СКВ). Она обеспечивает комфортные условия жизнедеятельности экипажа и пассажиров ВС и предназначена для создания и поддержания параметров воздуха в герметичной кабине (температура, давление, влажность, примеси) для обеспечения нормальных жизненных условий во всех ожидаемых условиях эксплуатации ВС (на земле, при взлете/посадке, в полете). Важным устройством СКВВС является система автоматического регулирования давления (САРД) для гермокабины, включающая в себя ряд устройств, одним из основных является выпускной пневмоклапан [1]. В состав электромеханизма пневмоклапана входят два бесколлекторных электродвигателя, которые управляют заслонкой, с датчиками положения ротора на основе магнитоуправляемой микросхемы на эффекте Холла.

Перед запуском пневмоклапана в серийное производство необходимо провести квалификационные испытания в полном соответствии с программой испытаний, в которой для выпускного клапана содержится пункт «Восприимчивость к переходным процессам, вызванным молнией», методика данного испытания описана в документе КТ-160D [2]. Данное испытание сводится к воздействию микросекундными импульсами идеализированной формы (они имитируют импульсы наводки от молнии) на электромеханизм с целью оценки его устойчивости на повреждаемость. Поскольку магнитоуправляемая микросхема на эффекте Холла уязвима к воздействиям молнии [3], то необходимо устройство молниезащиты электромеханизма пневмоклапана. Устройство защиты должно представлять из себя небольшой печатный узел, который располагается как можно ближе к объекту защиты, т.е. датчику Холла и расположено внутри электронного блока управления и контроля пневмоклапана, внешний вид которого показан на рис. 1.

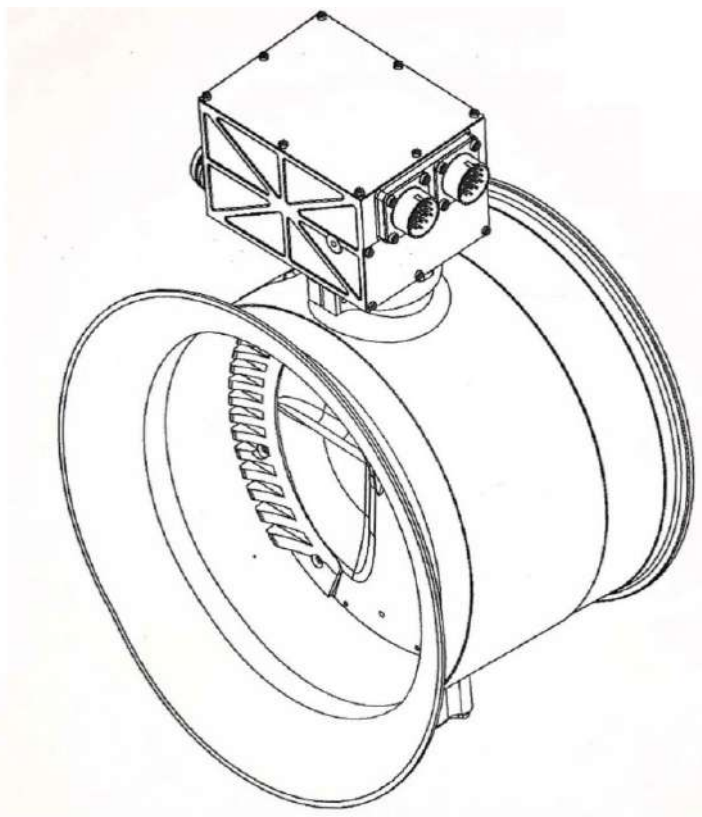


Рис. 1. Выпускной пневмоклапан (внизу) с электронным блоком управления и контроля (вверху)

Цель работы – исследовать возможность молниезащиты электромеханизма пневмоклапана воздушного судна при питании от бортовой сети постоянного тока с номинальным напряжением 27 В.

Требования к узлу защиты электромеханизма пневмоклапана от молнии и его реализация

Вопросам защиты бортовой аппаратуры аэрокосмических аппаратов от электромагнитных импульсов и полей электростатического разряда посвящен ряд работ, наиболее интересными являются работы [4, 5]. Однако к электрооборудованию ВС предъявляются особые требования: в соответствии с документом [2] пневмоклапан должен пройти испытание на восприимчивость к переходным процессам, вызванным молнией, согласно разделу 22 КТ-160D по категории А3, которая обозначает испытание контактным вводом третьего уровня. Такие испытания проводятся для оборудования, установленного в местах со средней степенью защищенности от электромагнитного воздействия. Испытание проводится для формы импульса, представленной на рис. 2, а испытательный уровень (амплитуда) выбирается из табл. 1, взятой из документа КТ-160D.

Таблица 1

Испытательные уровни для контактного ввода

Уровень	Формы импульсов	
	3	4
	V/I	V/I
1	100/10	50/15
2	250/5	125/12
3	600/12	300/30
4	1500/30	750/75
5	3200/64	1600/160

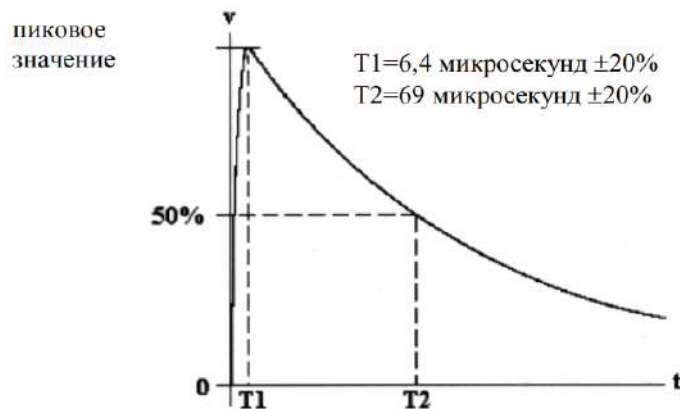


Рис. 2. Импульс напряжения/тока формы 3 для контактного ввода

В бесколлекторных электродвигателях ДБ 4-25-3 пневмоклапана применяются логические датчики Холла [3], которые являются микросхемами компараторного типа с логическими уровнями напряжения на выходе. При наличии магнитного поля на выходе формируется высокое напряжение или логическая единица, а при его отсутствии – низкое или логический ноль. Структурная схема микросхемы представлена на рис. 3.

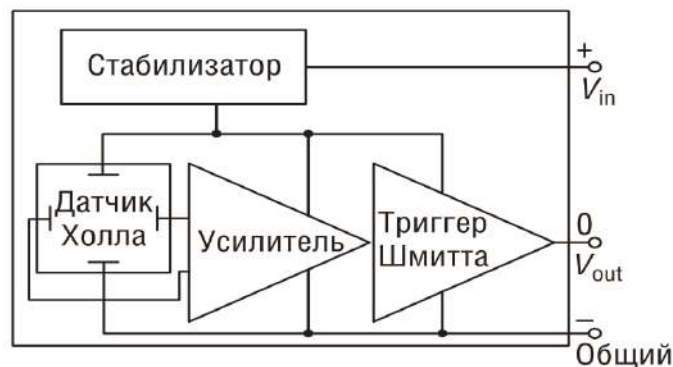


Рис. 2. Структурная схема микросхемы логического датчика Холла

Для молниезащиты датчика Холла необходимо выбрать элемент защиты, который должен обладать следующими свойствами:

- устойчиво работать при воздействии обратного напряжения;
- не должен оказывать влияния на работу основной электрической схемы при низком уровне обратных токов;
- время срабатывания должно быть на уровне десятков наносекунд для надежного подавления импульсов перенапряжения;
- хорошо рассеивать мощность при небольших габаритных размерах.

Сравнительные характеристики современных элементов защиты от переходных процессов представлены в табл. 2.

Таблица 2

Сравнительный анализ защитных ограничителей напряжения

Параметр	Газовые разрядники	Варисторы	TVS диоды
Уровень пиковых токов	высокий	высокий	средний
Минимальное напряжение включения, В	75	6	6
Точность напряжения включения	низкая	средняя	высокая
Эффективность ограничения выбросов напряжения	средняя	средняя	высокая
Типовая емкость, пФ	~1,5	~1400	~100
Соотношение “пиковый ток/габариты”	низкое	среднее	высокое
Время срабатывания	большое	среднее	малое

Исходя из данных табл. 2, можно сделать вывод, что каждый из элементов имеет как плюсы, так и минусы для использования.

Газовые разрядники невозможно использовать в узле молниезащиты, поскольку они обладают большими габаритами, что затруднит их размещение на плате. Кроме того, при небольшом числе переключений они имеют большое время срабатывания, что не позволяет обрабатывать микросекундные импульсы перенапряжений.

Варисторы по быстрдействию лучше, чем газовые разрядники, но обладают большой собственной емкостью, что может негативно влиять на работу основной электрической схемы.

TVS диоды (сокращенное от *Transient voltage Suppressor*, поэтому в литературе называют часто супрессорами) – это типичные ограничители напряжения, которые технически правильней назвать (это более современный вариант) импульсные лавинные стабилитроны [6]. Они ограничивают напряжение на защищаемом участке электрической схемы до безопасных значений, при этом поглощая и рассеивая энергию импульса помехи. У TVS диодов ярко выраженная нелинейная вольтамперная характеристика: для однонаправленных диодов она имеет несимметричный вид, для двунаправленных – симметричный. Они характеризуются высоким быстродействием в десятки наносекунд и при небольших габаритах способны рассеивать большие мощности. Также TVS диоды обладают небольшой емкостью, что позволяет применять их для защиты как линий питания, так и сигнальных линий.

TVS диоды (ограничители напряжения) устанавливаются параллельно в цепях питания и на линиях логических сигналов датчика Холла (см. рис. 2). В нормальных условиях работы схемы TVS диоды являются высокоимпедансной нагрузкой по отношению к защищаемой схеме и представляют собой разомкнутую цепь с незначительным током утечки. Когда напряжение переходного процесса превышает рабочее напряжение цепи, то импульс перенапряжения вызывает лавинный пробой в структуре TVS диода, через него протекает ток помехи, обусловленный эквивалентным сопротивлением источника помехи, при этом напряжение на диоде ограничивается его собственной внутренней структурой. В результате защищаемый участок схемы не подвергается воздействию высокого напряжения, а энергия помехи рассеивается.

В качестве TVS диода использован однонаправленный ограничитель напряжения 2P304P92 отечественного производства АЕЯР.432120.772 ТУ. Данный элемент применяется для защиты радиоэлектронной аппаратуры специального назначения от перенапряжений, обусловленных переходными процессами, разрядами статического электричества и наведенными электромагнитными импульсами иной природы.

Ограничитель напряжения 2P304P92 обладает следующими характеристиками:

- напряжение пробоя (V_{BR} , *breakdown voltage*) составляет от 83 до 92 В – это напряжение, при котором опасный импульс отводится на общий провод;
- ток пробоя составляет (I_T) 1 мА;
- максимальная импульсная мощность (I_{PPP}) 1500 Вт – это мощность, которую способен подать полупроводниковый ограничитель;
- ток утечки (I_L – постоянный обратный ток) равен 1 мкА.

Показатели импульсной электрической прочности к воздействию одиночных импульсов напряжения (ОИН) согласно АЕЯР.432120.772 ТУ приведены в табл. 3.

Таблица 3

Показатели импульсной электрической прочности 2P304P92

Параметры электрической прочности	Длительность ОИН, мкс		
	0,1	1,0	10,0
Предельно-допустимое напряжение ОИН, В	не более 5000	не более 5000	не более 5000
Расчетная предельно-допустимая энергия ОИН, мДж	не более 3,0	не более 56	не более 360

Схема молниезащиты от переходных процессов, разработанная для установки в электромеханизм пневмоклапана (рис. 3), состоит из TVS диодов, обозначенных на схеме как VD3...VD22, стабилитронов VD1, VD2 и резисторов R1, R2.

Так как один диод 2P304P92 является однонаправленным, то для формирования двунаправленной вольтамперной характеристики их включают по два встречно-последовательно, что обеспечивает работу на импульсах обратной полярности и, что важно, повышает надежность соединения [6].

Стабилитрон 2С524А1 с номинальным напряжением стабилизации 24 В и резистор R1-8В-1-360 Ом образуют параметрический стабилизатор напряжения для снижения номинального бортового напряжения 27 В (хотя может быть и 29 В), до номинального значения напряжения питания (не более 25 В) датчика Холла 129КХ011.АЕЯР.431160.993 ТУ.

В каждом электродвигателе используется по два датчика Холла, которые установлены со сдвигом на угол 90° и переключаются из одного состояния в другое через каждые 180°. По сигналам датчиков переключаются обмотки двигателя, создающие на роторе крутящий момент в нужном направлении. Сами двигатели входят в состав электромеханизма выпускного пневмоклапана, который соответственно является исполнительным устройством САРД ВС.

Эскиз печатного узла, выполненный по принципиальной схеме рис. 3, представлен на рис. 4. Данный печатный узел предназначен для установки в электрическую цепь электромеханизма, представленную на рис. 5. Точки ХР1... ХР12 обозначают места соединения контактов печатного узла молниезащиты со схемой электромеханизма пневмоклапана.

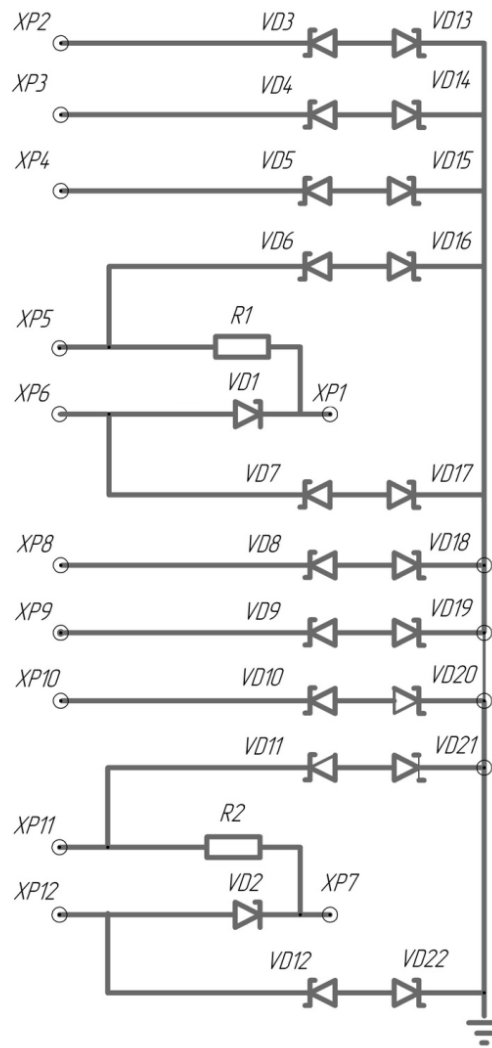


Рис. 3. Электрическая схема узла молниезащиты

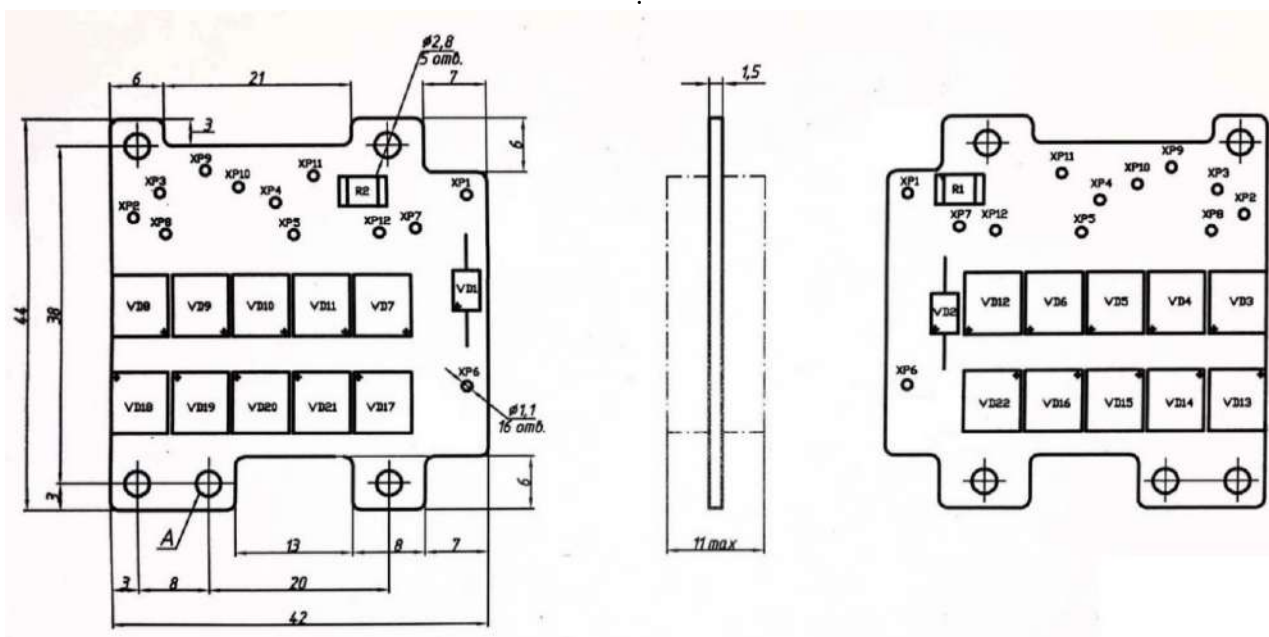


Рис. 4. Эскиз печатного узла защиты от переходных процессов

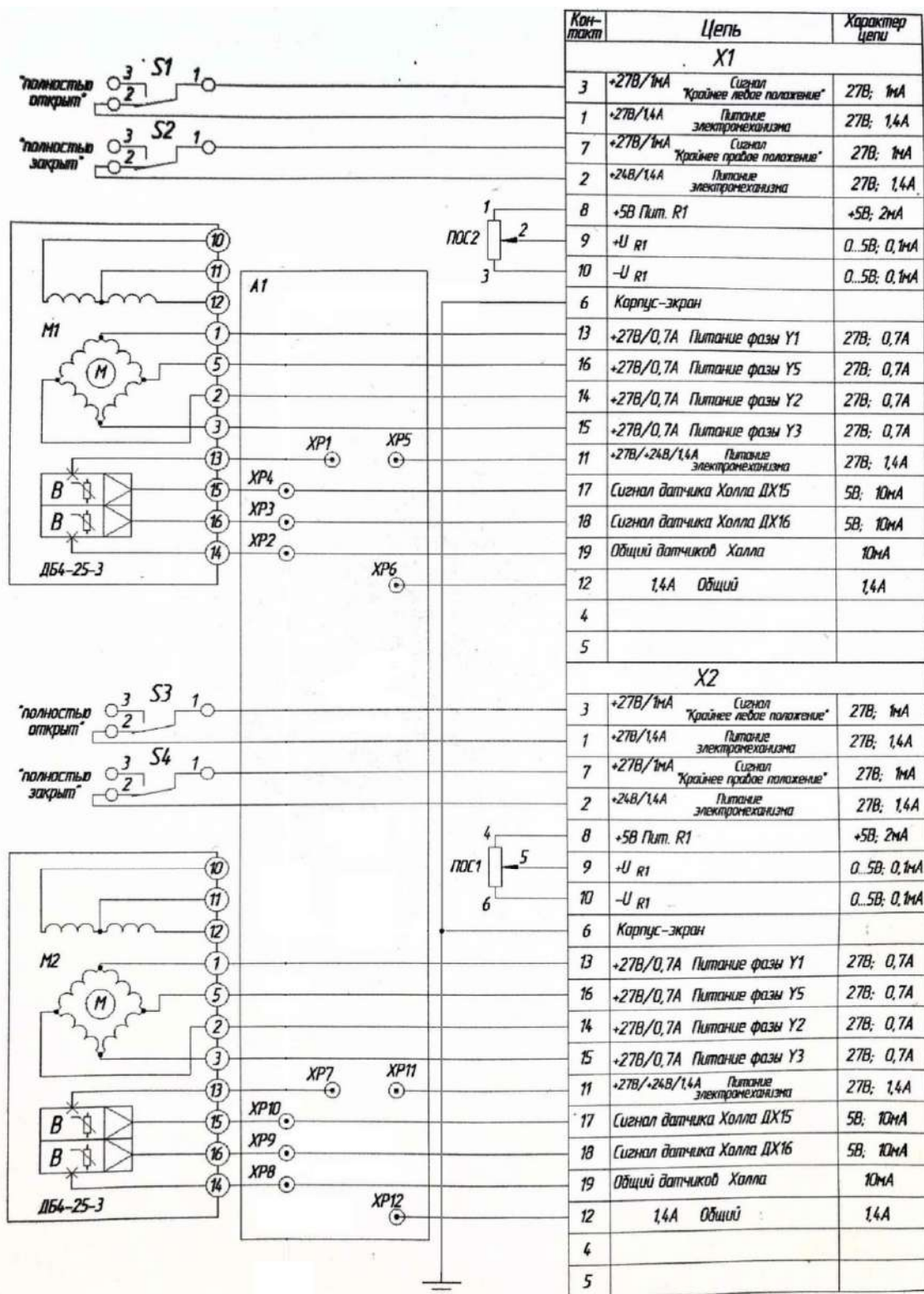


Рис. 5. Электрическая схема электромеханизма с контактами для подключения печатного узла молниезащиты

Электрическая схема пневмоклапана включает в себя два бесколлекторных электродвигателя (M1, M2) ДБ 4-25-3 с датчиком обратного положения ротора на основе магнитоуправляемой микросхемы на эффекте Холла 1293КХ011, которые соединены с блоком управления системы автоматического регулирования давления с помощью двух электрических соединителей типа СНЦ (X1, X2).

Четыре микропереключателя ПМ-21 (S1 -S4) необходимы для индикации конечных состояний заслонки пневмоклапана блоком управления САРД, двухсекционные потенциометры ПОС 1,2 используются в качестве устройства обратной связи по положению заслонки пневмоклапана.

Компьютерное моделирование узла молниезащиты пневмоклапана

Поскольку электромеханизм пневмоклапана включает два одинаковых электродвигателя М1 и М2, то при компьютерном моделировании достаточно исследовать схему для электродвигателя М1 (рис. 5) и с помощью генератора микросекундных импульсов оценить быстрдействие узла молниезащиты, т.е. время установления напряжения на выводах микросхемы с датчиком Холла.

Моделирование работы схемы молниезащиты от переходных процессов проводилось в программном пакете Multisim, но для его использования пришлось решить две задачи.

Во-первых, был разработан генератор периодической последовательности импульсов (рис. 2) на базе схемы Маркса 2-го порядка, особенностью которой является параллельный заряд конденсаторов с последующим последовательным разрядом [7]. Модель данного импульса представлена разностью двух экспоненциальных функций:

$$V = V_0 [e^{(-at)} - e^{(-bt)}],$$

где a, b – коэффициенты, определяющие скорости нарастания и спада; V_0 – амплитуда импульса перенапряжения. Такой импульс стремительно нарастает до пикового значения и относительно медленно достигает нулевого значения. Схема генератора микросекундных импульсов, реализованная в программном пакете Multisim, представлена в нижней части рис. 6. Для формирования импульса источник напряжения в 860 В заряжает (через замкнутый ключ S1 при разомкнутом S2) конденсатор C1. После размыкания ключа S1 и замыкания S2 идет заряд C2 через времязадающие резисторы R3 (заряд) и R4 (разряд). Тестирование работы данного генератора для номиналов резисторов и конденсаторов, приведенных на рис. 6, показало, что длительность фронта импульса T1 составляет 6.2 мкс, а длительность импульса T2 – 62.46 мкс, что укладывается в требуемый допуск $\pm 20\%$ (см. рис. 2). Максимальная амплитуда составила 604 В, что соответствует испытательному уровню 3 табл. 1.

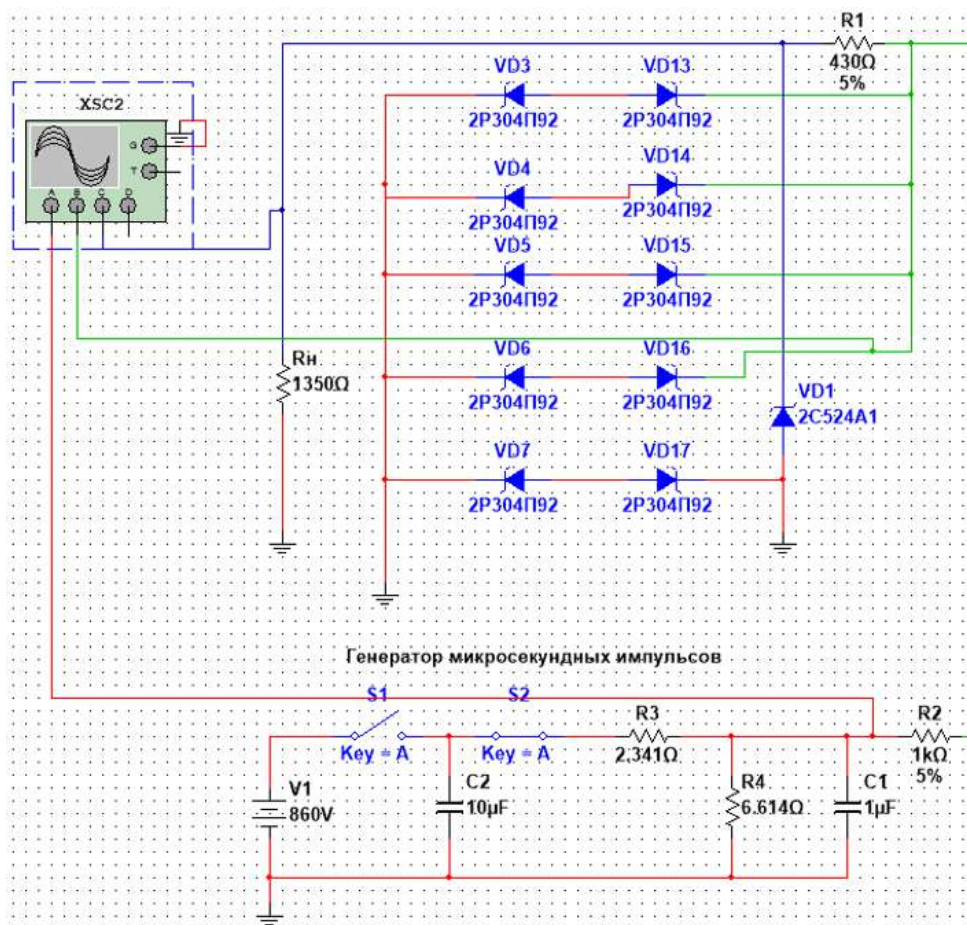


Рис. 6. Схема компьютерного моделирования молниезащиты для одного электродвигателя с датчиками Холла

Во-вторых, так как в библиотеке компонентов программы Multisim содержатся только иностранные электрорадиоэлементы, то потребовалось разработать SPICE модели двух отечественных

элементов: TVS диода 2P304П92 согласно АЕЯР.432120.772 ТУ и стабилитрона 2С524А1 по СМЗ.362.823ТУ. Проверка адекватности модели TVS диода проводилась с применением генератора микросекундных импульсов, которая показала стабилизацию при напряжении импульса выше 88 В. Проверка адекватности модели стабилитрона проводилась при постоянном напряжении 27 и 92 В.

Схема для моделирования переходных процессов приведена в верхней части рис. 6 и состоит из: VD3-VD13, VD4-VD14, ..., VD7-VD17 – включенных встречно-последовательно ограничителей напряжения 2P304П92;

VD1 – стабилитрона 2С524А1;

R1 – резистора P1-8В-1-360Ом ± 5 %-М-П;

Rн – эквивалента нагрузки – микросхемы 1293КХ011 (номинал в 1350 Ом определен по потребляемому току и приложенному напряжению);

XSC2 – четырехканального осциллографа, к которому подключены выход генератора микросекундных импульсов, ограничитель напряжения и резистор Rн .

Осциллограмма переходного процесса представлена на рис. 7, откуда видно, что TVS диоды ограничивают импульс до уровня 89 В, а стабилитрон формирует значения напряжения питания на уровне 24,4 В при максимальном напряжении питания микросхемы в 25 В.

Время переходного процесса не превышает 2,2 мкс.

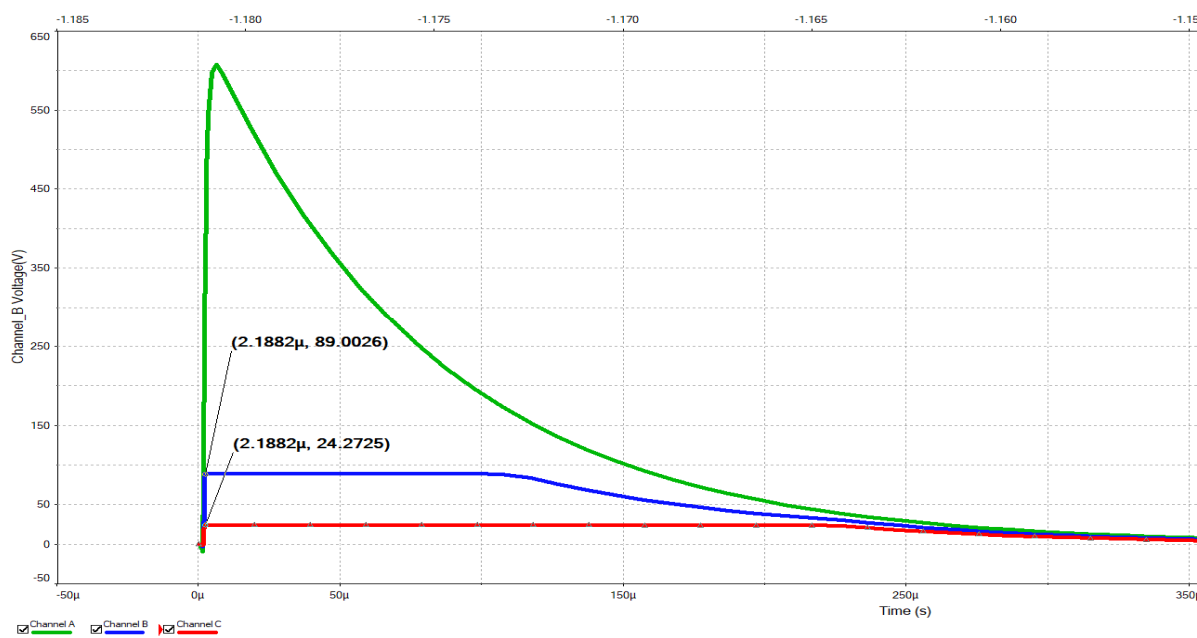


Рис. 7. Осциллограммы напряжений в схеме рис. 6: вверху – с генератора микросекундных импульсов; в середине – с TVS диода; внизу – на выводах питания микросхемы

Заключение

1. Одним из основных узлов системы автоматического регулирования давления для гермокабины воздушного судна является выпускной пневмоклапан, в состав электромеханизма которого входят два бесколлекторных электродвигателя с датчиками положения ротора на основе магнитоуправляемой микросхемы на эффекте Холла, которые чувствительны к воздействию молнии.

2. Для надежной работы пневмоклапан должен пройти испытание на восприимчивость к переходным процессам, вызванным молнией, согласно разделу 22 КТ-160D по категории АЗ, которая обозначает испытание контактным вводом третьего уровня.

3. Сформулированы требования к молниезащите датчика Холла, выбран элемент защиты в виде TVS диода (ограничителя напряжения), который устанавливается в цепях питания и на линиях логических сигналов с датчиков Холла.

4. Разработана схема молниезащиты от переходных процессов на отечественной элементной базе, приведена ее практическая реализация в виде печатного узла для установки в электромеханизм пневмоклапана.

5. Выполнено моделирование работы схемы молниезащиты в программном пакете Multisim, для чего разработаны SPICE модели отечественных элементов и схема генератора микросекундных импульсов. Показано, что время срабатывания схемы достаточно для ее надежного функционирования.

Список литературы

1. Полтавец М. Н., Маскаев Л. И., Курлаев Н. В. Комплексная система кондиционирования воздуха и система автоматического регулирования давления в кабине летательного аппарата. Новосибирск : НГТУ, 2021. 84 с.
2. Квалификационные требования КТ-160D. Условия эксплуатации и окружающей среды для бортового авиационного оборудования». Требования, нормы и методы испытаний. Авиационный регистр межгосударственного авиационного комитета. 2004. URL: https://rfimmunity.com/wp-content/uploads/2017/04/KT_I60D_RTCA_Russian.pdf (дата обращения: 20.03.2023).
3. Интегральные малопотребляющие датчики положения на основе эффекта Холла. URL: <https://www.compel.ru/lib/92805> (дата обращения: 20.03.2023).
4. Согомонян К. Э., Юрков Н. К. Воздействие ультракоротких импульсов электромагнитного излучения на беспилотный летательный аппарат // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2019. Т. 2. С. 313–317.
5. Костин А. В., Пиганов М. Н., Безруков В. С. Экспериментальное исследование, измерение и анализ помех в цепях бортовой аппаратуры космических аппаратов, вызванных электромагнитным полем электростатического разряда // Надежность и качество сложных систем. 2015. № 4. С. 46–55.
6. Серебряков А. С., Дулепов Д. Е., Осокин В. Л. Перенапряжение в электрических системах и защита от них. Старый Оскол : Тонкие наукоемкие технологии, 2021. 258 с.
7. Practical Simulation and Modelling of Lightning Impulse Voltage Generator using Marx Circuit. URL: http://ethesis.nitrkl.ac.in/6568/1/Vivek_Verma_110EE0061_Thesis.pdf (дата обращения: 20.03.2023).

References

1. Poltavets M.N., Maskaev L.I., Kurlaev N.V. *Kompleksnaya sistema konditsionirovaniya vozdukha i sistema avtomaticheskogo regulirovaniya davleniya v kabine letatel'nogo apparata = Integrated air conditioning system and automatic pressure control system in the cockpit of an aircraft*. Novosibirsk: NGTU, 2021:84. (In Russ.)
2. *Kvalifikatsionnye trebovaniya KT-160D. Usloviya ekspluatatsii i okruzhayushchey sredy dlya bortovogo aviatzionnogo oborudovaniya». Trebovaniya, normy i metody ispytaniy. Aviatzionnyy registr mezhgosudarstvennogo aviatzionnogo komiteta = KT-160D qualification requirements. Operating and environmental conditions for on-board aviation equipment". Requirements, norms and test methods. Aviation Register of the Interstate Aviation Committee*. 2004. (In Russ.). Available at: https://rfimmunity.com/wp-content/uploads/2017/04/KT_I60D_RTCA_Russian.pdf (accessed 20.03.2023).
3. *Integral'nye malopotreblyayushchie datchiki polozheniya na osnove effekta Kholla = Integrated low-consumption position sensors based on the Hall effect*. (In Russ.). Available at: <https://www.compel.ru/lib/92805> (accessed 20.03.2023).
4. Sogomonyan K.E., Yurkov N.K. The impact of ultrashort pulses of electromagnetic radiation on an unmanned aerial vehicle. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2019;2:313–317. (In Russ.)
5. Kostin A.V., Piganov M.N., Bezrukov V.S. Experimental investigation, measurement and analysis of interference in the circuits of onboard equipment of spacecraft caused by the electromagnetic field of an electrostatic discharge. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2015;(4):46–55. (In Russ.)
6. Serebryakov A.S., Dulepov D.E., Osokin V.L. *Perenapryazhenie v elektricheskikh sistemakh i zashchita ot nikh = Overvoltage in electrical systems and protection against them*. Staryy Oskol: Tonkie naukoemkie tekhnologii, 2021:258. (In Russ.)
7. *Practical Simulation and Modelling of Lightning Impulse Voltage Generator using Marx Circuit*. Available at: http://ethesis.nitrkl.ac.in/6568/1/Vivek_Verma_110EE0061_Thesis.pdf (accessed 20.03.2023).

Информация об авторах / Information about the authors

Валерий Николаевич Савельев

кандидат технических наук,
доцент кафедры систем информационной безопасности, управления и телекоммуникаций,
Волжский государственный университет водного транспорта
(Россия, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 7/55)
E-mail: valerijssavel@yandex.ru

Valeriy N. Saveliev

Candidate of technical sciences, associate professor
of the sub-department of information security,
management and telecommunications,
Volga State University of Water Transport
(7/55 Minina street, Nizhny Novgorod, Russia)

Николай Сергеевич Новоточинов

студент,
Волжский государственный университет
водного транспорта
(Россия, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 7/55)
E-mail: n.novotochinov1@gmail.com

Николай Петрович Ямпурин

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры конструирования и технологии
радиоэлектронных средств,
Арзамасский политехнический институт (филиал)
Нижегородского государственного технического
университета имени Р. Е. Алексеева
(Россия, Нижегородская обл., г. Арзамас,
ул. Калинина, 19)
E-mail: yampurin@apingu.edu.ru

Nikolai S. Novotochinov

Student,
Volga State University of Water Transport
(7/55 Minina street, Nizhny Novgorod, Russia)

Nikolai P. Yampurin

Doctor of technical sciences, professor,
professor of the sub-department of design
and technology of radioelectronic means,
Arzamas Polytechnic Institute (branch)
Nizhny Novgorod State Technical University
named after R. E. Alekseev
(19 Kalinina street, Arzamas,
Nizhny Novgorod region, Russia)

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

Поступила в редакцию/Received 04.02.2023

Поступила после рецензирования/Revised 15.03.2023

Принята к публикации/Accepted 30.03.2023

УДК 004.9, 504.05, 332.02

doi:10.21685/2307-4205-2023-2-13

SYSTEMATIC APPROACH FOR ENSURING THE RESILIENCE OF ECOLOGICAL-ECONOMIC SYSTEMS OF THE RUSSIAN ARCTIC (PART 2. ASSESSMENT PROCEDURE AND CRITERIA)

A.V. Masloboev

Putilov Institute for Informatics and Mathematical Modeling of the Federal Research Centre
"Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences", Apatity, Russia
Institute of North Industrial Ecology Problems of the Federal Research Centre
"Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences", Apatity, Russia
masloboev@iimm.ru

Abstract. *Background.* The study is aimed at design and development of methods and approaches to ensuring, assessment and regulation of the ecological robustness of Arctic regions in order to resilience and management efficiency enhancement of the ecological-economic systems performance of the Arctic. To date, this problem is of particular importance under conditions of intensive industrial development of the resource base of Arctic territories, which reduces the stability of Arctic ecosystems and negatively affects the health and life quality of the population. *Materials and methods.* The research work consists of two parts. In the first part the proposed principles of resilience management and criteria for ensuring the environmental safety of the Arctic region, based on the postulates of the theory of sustainable development and the concept of acceptable risk, are considered. In the second part the environmental safety metrics and systematic approach to assessing the level of ecological robustness of the Arctic ecosystems, based on expert methods for resilience analysis of organizational and technical systems, are discussed. *Results and conclusions.* The fundamental principles and a set of criteria for ensuring environmental safety for various types of economical activity in the Arctic region have been developed. A general systematic approach to the ecological robustness analysis of the Arctic region according to selected principles and criteria, based on the joint application of a hierarchical multi-level decomposition scheme "principle – criterion – indicator – index" and models for quantitative and qualitative assessment of the complex system resilience, is proposed. The use of developments provides the formation and advance of the legal regulatory framework (national public standard) for governing various types of economical activity in the Arctic region, as well as improving the quality of managerial decisions made by state, regional and enterprise authorities in the field of environmental safety and environmentally friendly, responsible nature management.

Keywords: ecological-economic system, resilience management, safety principles and criteria, estimation procedure, environmental quality control, sustainable development, acceptable risk concept, Arctic region

Financing: the work was carried out within the framework of the State Research Programs of the Putilov Institute for Informatics and Mathematical Modeling KSC RAS (project No. FMEZ-2022-0023) and Institute of North Industrial Ecology Problems KSC RAS (project No. FMEZ-2022-0010).

For citation: Masloboev A.V. Systematic approach for ensuring the resilience of ecological-economic systems of the Russian arctic (Part 2. Assessment procedure and criteria). *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2023;(2):115–126. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2023-2-13

МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОБЕСПЕЧЕНИЮ ЖИЗНЕСПОСОБНОСТИ ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМ РОССИЙСКОЙ АРКТИКИ (ЧАСТЬ 2. МЕТОД И КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ)

А. В. Маслобоев

Институт информатики и математического моделирования имени В. А. Путилова Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук», Апатиты, Россия
Институт проблем промышленной экологии Севера Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук», Апатиты, Россия
masloboev@iimm.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Работа направлена на создание и развитие методов и подходов обеспечения, оценки и регулирования экологической устойчивости арктических регионов для повышения жизнеспособности и эффективности управления функционированием эколого-экономических систем Арктики. Особую значимость эта задача приобретает сегодня в условиях интенсивного промышленного освоения ресурсной базы арктических территорий, что снижает устойчивость арктических экосистем и негативно влияет на здоровье и качество жизни населения. *Материалы и методы.* Работа состоит из двух частей. В первой части рассматриваются предложенные принципы управления устойчивостью и критерии обеспечения экологической безопасности Арктики, основанные на постулатах теории устойчивого развития и концепции приемлемого риска. Во второй части обсуждаются система показателей безопасности и методический подход к оценке уровня экологической устойчивости арктических экосистем, базирующийся на экспертных методах анализа жизнеспособности организационных и технических систем. *Результаты и выводы.* Разработаны основополагающие принципы и система критериев обеспечения экологической безопасности для различных видов хозяйственной деятельности в Арктике. Предложен общий методический подход к анализу экологической устойчивости Арктики по выбранным принципам и критериям, основанный на совместном применении иерархической многоуровневой схемы декомпозиции «принцип – критерий – индикатор – показатель» и моделей количественной и качественной оценки жизнеспособности сложных систем. Использование разработок обеспечивает формирование и развитие нормативно-правовой базы (национального общественного стандарта) для регулирования различных видов хозяйственной деятельности на территории арктических регионов, а также повышение качества принимаемых управленческих решений органами государственного, регионального и корпоративного управления в области экологической безопасности и экологически ответственного природопользования.

Ключевые слова: эколого-экономическая система, управление жизнеспособностью, принципы и критерии экологической безопасности, методика оценки, контроль качества окружающей среды, устойчивое развитие, концепция приемлемого риска, Арктика

Финансирование: работа выполнена в рамках государственных заданий ИИММ КНЦ РАН (НИР № FMEZ-2022-0023) и ИППЭС КНЦ РАН (НИР № FMEZ-2022-0010).

Для цитирования: Маслобоев А. В. Методический подход к обеспечению жизнеспособности эколого-экономических систем российской арктики (Часть 2. Метод и критерии оценки). 2023. № 2. С. 115–126. doi:10.21685/2307-4205-2023-2-13

Introduction

Ecological resilience is an integral part of the country's national security, the development of its economy and the social welfare of the state. Thereby, in this regard the problems of ecological resilience are as so important as the issues of ensuring military, economic and international security. Overcoming the consequences of global challenges and threats (climate change, loss of biodiversity, increase in consumption of natural resources, increase in volume of waste, etc.), which are the main causes of environmental quality loss and ecosystem degradation in general, requires availability of updated standards and state-of-the-art effective tools for ecological resilience management. These standards and means should provide the technical-organizational framework of a system focused on maintaining stable characteristics of the robustness of ecological-economic systems performance and minimizing the risks of negative impact on the environment as a result of making unreasonable managerial decisions, through the implementation of mechanisms for regulating and standardizing ecological security target indicators, the adoption of environmentally appropriate and best available technologies, as well as ecological efficiency enhancement programs. Though, the legal-regulatory framework adopted in our country to ensure ecological security does not fully take into account the specificity of management processes in this problem domain, unlike a number of leading foreign countries. This circumstance along with resource intensity and high initial cost of engineering integrated automated control systems

for management of ecological security greatly complicates the large-scale implementation of such tools in real practice.

The imperfection of the models, methods and tools currently used for analysis, assessment and organizational management of the ecological-economic systems resilience, as well as the need to mutual agreement and link these means with the basic provisions of the pursued public policy in the field of environmental protection predetermine the focus and relevance of this study. A special attention should be paid to solving the ecological security and resilience problems at the sectoral and regional levels and, as local quality targets are achieved, shifted towards the implementation and strategic planning of sustainable development policies at the state level. In addressing these issues, one cannot do without integrated interdisciplinary research based on a systems approach and allowing a comprehensive analysis of socio-political, economic, technological, environmental and administrative processes and the relationships between them in order to evaluate the trajectories for ensuring simultaneous economic growth, social stability and improvement the state of natural environment.

The subject of inquiry is the Arctic zone of Russia (Russian Arctic), which is a strategic macro-region of the Russian Federation and forms a fifth of the country's federal budget revenues. According to normative documents [1, 2, 3], ensuring the ecological resilience and security of the Russian Arctic is an indispensable priority when conducting any economic activity in this area in terms of maintaining the quality of the natural environment acceptable for the favorable life of the population and sustainable development of the regional economy, eliminating accumulated damage and recreating the environment due to the increasing economic activity in the development of the resource base of the Northern territories and the impact of global climate change. To achieve these goals, a fundamentally novel concept of ecological security based on the natural science backlog developed over the past 30 years, modern risk management practices, the principles of sustainable development and resilience management of complex systems, is needed. Research along these lines will provide new knowledge-producing on the matter and nature of relationships between various aspects of ecological security, which are necessary for an integral estimation of the resilience level of the Arctic ecological-economic systems and the generation of evidence-based well-grounded guidelines to decision makers (public authorities and business entities) to enhancing the efficiency and effort of environmental policy in the Russian Arctic.

The work is divided in two parts. The first part is discussed in [4]. In the second part we examine the environmental safety metrics and a general methodological approach to the ecological robustness analysis of the Arctic region according to principles and criteria selected and explicit in the first part of our study. The second part consists of three main sections. The background of the study and related work are discussed in the first section. The second section provides a framework of the systematic approach to aggregated assessing the level of ecological robustness of the Arctic ecosystems based on expert methods for resilience analysis of organizational and technical systems. The ecological resilience assessment procedure based on application of the hierarchical multi-level decomposition scheme "principle – criterion – indicator – index" and its formal representation are proposed in the third section. In conclusion, the summary and contributions of the study are given.

Background

Environmental protection and ecological resilience ensuring along with socio-economic and infrastructural development problems are among the main state imperatives for the development of the Russian Arctic. This thesis determines the need to prioritize environmental issues, both in terms of monitoring the climate policy impact on the performance of ecological-economic systems, and the generation of managerial decisions that enhance the ecological security of the Arctic regions of Russia taking into account up-to-date urgent challenges.

Any managerial decisions made in the field of industrial development of the Russian Arctic should be made taking into account the understanding of the basic principles of the concepts of ecological security [5, 6], ESG (Environmental, Social, and Corporate Governance) [7, 8], green and circular economy [9, 10]. To generation and validation of such decisions, comprehensive interdisciplinary ecological-economic research should be carried out. Therefore, at present it is especially urgent to develop models of potential actual threats to ecological security of critical facilities of the regional ecological-economic systems, a list of countermeasures to ensure the ecological resilience of natural-industrial systems in the Arctic regions, including novel standards for classifying industrial facilities according to the degree of environmental impact and assessing systemic risks of natural and man-made critical situations origination in these systems. The course

towards toughening the climate policy and national economy decarbonization, as well as the expanding adoption of friendly international environmental standards require, on the one hand, the new technologies development that meet the specified criteria, and, on the other hand, the impact assessment and analysis of the managerial decisions made on the performance of ecological-economic systems in the Arctic region and compliance with ecological security criteria.

Along these lines, tools for situational management of ecological resilience of the Russian Arctic critical infrastructures (by the example of the Northern Sea Route) [11], as well as a set of ecological security metrics [4] to estimating and analyzing the integral index of ecological resilience of the natural-industrial system facilities operating in this territorial district, have been developed. In addition, the Russian legislation in the field of ecological security and well-known practices of managing the resilience of natural-industrial systems are also examined. It has been revealed that the Russia's concept of ecological security in comparison with the leading world powers (USA, China) and the EU countries has a pronounced anthropocentric nature, since it is designed to ensure and protection the environmental interests of individuals from various external and internal threats (personal ecological security). Thus, within the bounds of this concept ecological security ensuring consists in overcoming the consequences of climate change, the growth of resource consumption, the environmental deterioration and degradation of the all natural components (water, air, soil, biodiversity, etc.), the increase in waste and is carried out by the state represented by all authorities, including local governments, and public associations of privy citizens through the organization and implementation of appropriate environmental protection measures, as well as the environmental awareness and education. At the same time, the estimation models for evaluating threats (damages) vested in departmental methodologies and tools for regulating ecological security enshrined in the federal laws are often based on adaptation the global concept of sustainable development with the response connotation. Such a way is not always acceptable in domestic practice and does not take into account the Russian specificity of business keeping and management, since the known liberal governance mechanisms inherent in foreign policies are either not agreed-upon the rules, or completely contradict game directive adopted in our country in problem area under consideration. Thereby, the efforts of researchers should be focused on the development of scientifically well-grounded guidelines to decision-makers for improving Russian approaches to the organizational management of ecological resilience (robustness) and ensuring the environmental safety of natural-industrial systems. An overview of key trends and characteristics of the state-of-the-art ecological security studies is in detail represented in research [12].

Historically, the traditional approach to ensuring the ecological security in our country was based on the concept of "absolute security" [13]. According to study [14], its essence boiled down to the desire of making technology and the technosphere absolutely safe for people and expected the introduction of all kinds of protection measures that are practically feasible. Practice shows that the concept of absolute security is inadequate to the laws of the technosphere, unattainable or associated with exceeding, sometimes unjustified financial expenditure for the society. In addition, the demands of absolute security captivating with its humanity can turn into a tragedy for people, because it is impossible to ensure zero risk in existing complex systems, and an individual must be oriented towards the possibility of critical situations emergence. Therefore, starting from the late 70s – early 80s of the 20th century in industrialized countries a transition settled in the studies and research related to ensuring and managing the ecological security from the concept of absolute security to the concept of acceptable (tolerated) risk [15] based on the general provisions of the theory of economic risk [16]. The essence of this concept lies in the desire to create such a small danger that society is ready to put up with in case of the emergence and development of critical situations in terms of the quality of life, the level of socio-economic development, geopolitical position and other essential factors. The principle of acceptable risk has become known as the ALARA principle (As-Low-As-Reasonably-Achievable).

The concept of acceptable risk integrates technical-organizational, technological, socio-economic and military-political aspects and is a certain compromise between the level of security in general and the possibilities of achieving it. As shown in [17], the magnitude of acceptable risk can be estimated using the cost-based mechanism, which allows distributing the society's expenditure of achieving a given level of security between the natural, man-made and social spheres. That is, it is necessary to maintain an appropriate ratio of costs in these areas, since the imbalance in favor of one of them can cause a sharp increase in risk level and it will go beyond the permissible values. With an increase in the costs of ensuring the security of natural-industrial systems, the technosphere risks decrease, but meanwhile, socio-economic ones increase. Spending excessive funds on improving the security of natural-industrial systems in conditions of limited economic opportunities can simultaneously cause implicit damage to the social sphere [18].

In real practice, one has to combine and choose between different risk management concepts as stated in [19]. Since the measures to reduce environmental risks are quite expensive, the concept of acceptable risk can be suitable for solving urgent problems of ensuring ecological security. This is the optimal principle of risk management, when the costs of environmental protection measures are comparable to the amount of potential losses and the degree of possible negative consequences of the implementation of these risks. The concept of acceptable risk can be effectively applied to any field of activity, branch of production or organization. Undoubtedly, there is no absolute security, since there will always be some level of residual risk. How much risk is acceptable or unacceptable following [20] is resolved and established by public authorities (regulators), oversight bodies, administrations and management of specific enterprises. The degree of introduction of this concept into the practice today is varied in different countries and in some of them it has already been successfully embedded and adopted into active legislation as laid down by [21].

Estimation methodology and Related work

State-of-the-art methodology for assessing the ecological resilience of socio-economic systems includes the following methods:

1. The method of environmental indicators analysis provides evaluation of ecological indices such as water, air, and soil pollution levels, waste volume, etc.
2. The method of environmental impact assessment provides quantification of the resources used by the system and the waste it produces, and comparison with the capacity of the environment.
3. Ecological footprint method provides the impact assessment of the system on the environment by measuring the amount of biologically productive land and water resources needed to sustain a specific level of resource consumption, emissions to the environment and waste disposal.
4. Environmental cost accounting method allows assessing the impact of production activities on the environment in monetary terms taking into account all costs of water, air, and soil cleaning, as well as compensation for ecosystem damage.
5. Life-cycle assessment method allows evaluating the environmental consequences of the entire product life-cycle from raw material extraction to waste disposal.
6. Environmental risk assessment method allows estimating the probability of negative consequences for the environment and human health as a result of production activities, as well as to determine the most effective measures to reduce risks.
7. Environmental audit method allows assessing the compliance of production activities with the requirements of environmental legislation, identifying problem areas and proposing measures to eliminate them.
8. Environmental transparency method makes it possible to ensure the availability of information on the impact of production activities on the environment to the general public, which contributes to increasing awareness and citizen participation in decision-making.
9. Environmental compensation method allows taking into account biodiversity losses and other negative consequences for ecosystems when developing new projects and proposing measures for their compensation, such as creating new nature reserves or restoring destroyed forests.
10. Ecological design method allows taking into account environmental aspects when designing new facilities and developing new products, which contributes to reducing negative impact on the environment.
11. Environmental responsibility method makes it possible to hold companies and organizations responsible for their negative impact on the environment and take measures to reduce it, such as introducing environmental certificates or standards.
12. Viability assessment method provides evaluation of the system's ability to survive and develop in the long-term outlook.
13. Economic assessment method provides evaluation of the economic efficiency of the system taking into account its impact on the environment.
14. Multi-criteria assessment method provides evaluation of the environmental sustainability of the system taking into account several criteria, such as economic efficiency, social responsibility, and environmental impact.

Within this methodology, three main classes of ecological security assessment methods can be distinguished:

1. Environmental monitoring methods provide collection and analysis of data on various ecological parameters, including measurement of air, water, soil pollution levels, biodiversity and radiation. Environmental monitoring involves systematic and regular observation of the environment to assess its quality and safety. The data obtained from environmental monitoring is analyzed using statistical methods and models

that allow for the assessment of environmental and human health risks. Based on the results of the analysis, measures are developed to enhance ecological security, such as reducing harmful emissions and improving water quality.

2. Environmental modeling methods intend the use of mathematical models to forecast the impact on the environment, such as calculating air pollution levels or climate change.

3. Environmental impact assessment methods allow the estimated probability of environmental risks and their consequences for the environment and human health. These methods include risk analysis of various types of pollution, such as chemicals, radiation and climate change, and also allow for the identification of possible negative impacts on the environment and human health resulting from new projects or construction.

The analysis of domestic and foreign scientific literature also allows for the conditional classification of known methods for assessing the ecological security and resilience of territories into three complementary groups: qualitative, quantitative, and combined. Quantitative methods are based on the measurement and analysis of quantitative parameters, such as air, water and soil pollution levels. Qualitative methods are vice versa based on the analysis of qualitative ecosystem characteristics, such as biodiversity, plant and animal life conditions, etc. Combined methods use both quantitative and qualitative parameters to obtain a more complete and accurate assessment. The difference between these approaches lies in the fact that quantitative methods provide precise numerical values, which are convenient for comparing and analyzing data; qualitative methods allow for the assessment of ecosystem conditions with consideration for its complex structure and interrelationships between elements, and combined methods integrate the advantages of both approaches and allow for a more complete and accurate assessment of the environmental situation.

Quantitative methods are effectively applied to identify specific sources of pollution and determine necessary measures for improving the environmental situation, but may be limited by data availability and measurement methods and may not always consider the structure of interrelationships between ecosystem elements. Qualitative methods are successfully used to identify problems that cannot be measured quantitatively, but are highly subjective depending on the experience and knowledge of experts, and may not always be used for data comparison and analysis. Combined methods, despite their inherent advantages of qualitative and quantitative approaches, can be labor-intensive and costly compared to single methods.

Known combined methods for assessing the ecological security and resilience of the region include:

1. Matrix method, which involves integrating qualitative assessments of probability and importance of environmental risks using a matrix, where each risk is evaluated on a scale of probability and importance.

2. Analytic hierarchy process method, which uses a combination of expert assessments and mathematical models to determine the importance and probability of environmental risks.

3. Multiple criteria method, which involves using several criteria to assess environmental risks, such as expert assessments, statistical data and mathematical models.

4. Bayesian statistical methods that use a combination of data from different sources, such as expert assessments, statistical data and modeling results, for more accurate assessment of environmental risks.

5. Multi-criteria optimization methods that provide the determination of the best combination of measures for preventing or reducing environmental risks based on several criteria, such as cost, effectiveness, system performance and environmental efficiency.

6. Fuzzy-set methods that involve determining the degree of risk based on fuzzy inference rules and linguistic variables, and also allow for considering not only point values of individual parameters, but also their uncertainty and fuzziness, resulting in more accurate and realistic outcomes considering multiple factors and conditions.

The next proposed method for assessing and analyzing the resilience of regional ecological-economic systems belongs to the class of multi-criteria combined methods and is positioned among known methodological approaches as a tool for environmental safety (sustainability) analysis based on the use of a hierarchical multi-level decomposition scheme "principle – criterion – indicator – index". Most related work (e.g., [22, 23]) to our study examining the same class of methods are based on the reliability theory fundamentals [24] and the use of computational operations with a multi-dimensional data cube (OLAP-cube) [25] in the aggregated assessment procedures of system and critical infrastructure resilience. The key principles, criteria and indices of ecological security used in our assessment procedure of ecological-economic system resilience were in detail discussed in [4] and [26].

The method for assessing and analyzing the resilience of ecological-economic systems must adequately meet the following functional requirements:

1. Compliance with the basic provisions and criteria of the national public standard for ensuring ecological security in the Arctic [26], as well as norms and rules established by the legislation of the Russian Federation in the field of environmental protection.

2. Applicability to all structural elements, critical infrastructures and resilience types of regional ecological-economic systems.
3. The ability to operate with all the resilience components (domains) of the ecological-economic systems either individually or in the aggregate.
4. The ability to derive quantitative, semi-quantitative and qualitative estimates of the ecosystem resilience and their aggregation into a generalized assessment.
5. The ability for self-verifying and audit, i.e., solving the inverse problem, and interpreting the results of the assessment.
6. Supplement of the potential of already existing risk and security management practices.
7. The ability to joint use (integration) other assessment tools for the analysis of various types of threats, safety indicators and optimization of target resilience functions taking into account the peculiarities of the life-cycle of objects in ecological-economic systems.
8. Consideration of cascade effects and the ability to obtain relative resilience estimates for critical elements of ecological-economic systems, e.g., through continuous monitoring of their resilience over time or by comparing their own resilience characteristics with other critical elements of these systems.
9. Variability in adjusting assessment parameters to balance the resilience level of the critical elements and infrastructure in ecological-economic systems subject to multiple threats with the level of resilience achieved through anti-crisis measures taken by risk managers and operators managing the development of these systems, and which society is willing to accept under current conditions.
10. Usability, low cost, ease of implementation and application for solving both specific and more general problems of managing and maintaining the resilience of complex systems.

Assessment procedure framework and formal representation

The systematic approach to ecological security and resilience assessment and analysis corresponds a hierarchically organized four-level decomposition of environmental safety indices, focusing mainly on the socio-economic and natural-industrial resilience domains. The holistic and easy-to-use structure of the method for estimating integral environmental safety index adopted from study [22] is shown in Figure 1, illustrating the four-level scheme "principle – criterion – indicator – index" and different steps in the assessment procedure (selection of the generic indicators and influencing factors, quantification, expert’s judgments aggregation, defuzzification, calculations of the weighted average crisp scores, bottom-up synthesis of the total ecological resilience index, interpretation of the results in radar charts, etc.).

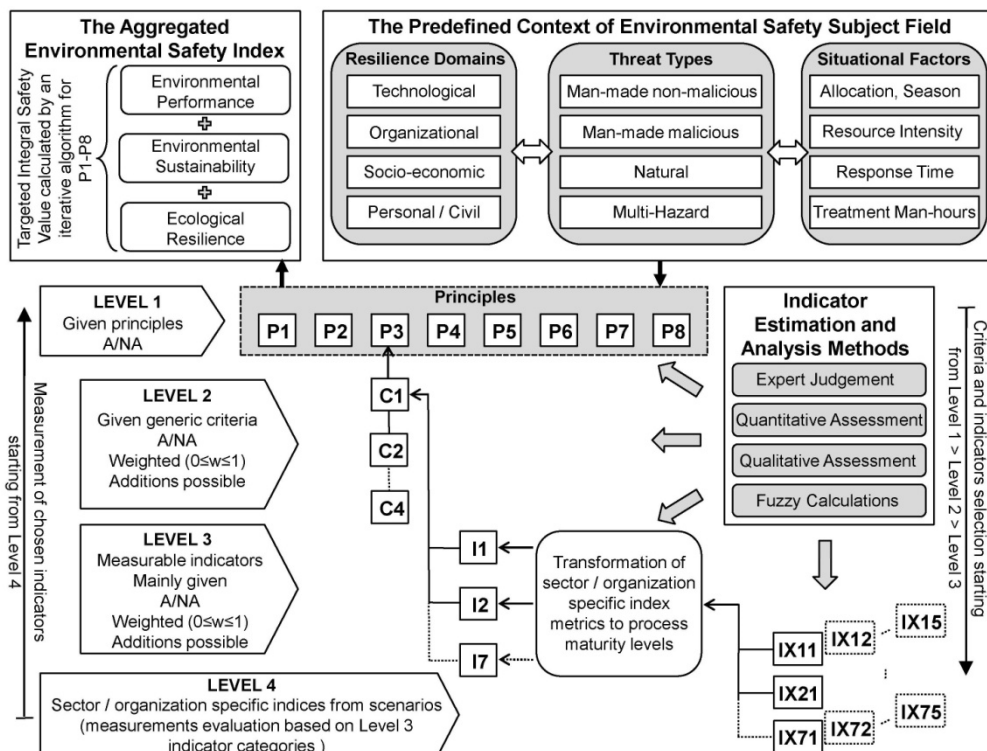


Fig. 1. The overall hierarchical scheme of Environmental Safety Index systematic assessment (adopted from [22])

The backbone for environmental safety index is ecological security ensuring principles (*P1 – P8*) described in the first part of our study [4] and reflecting the different strategies of resilience management of the regional ecological-economic systems. These eight principles form the first level (Level 1) of integral indicators in resilience assessment procedure. Level 1 remains given. Each integral indicator (principle) at Level 1 is decomposed to a subset of given generic criteria correspond the second level (Level 2) indicators ($C^l_{i...}C^l_{N-} C^{\delta}_{i...}C^{\delta}_M$). In total, we have extracted 43 criteria at Level 2. Level 2 is tailorable. Similarly, each criterion at Level 2 is further decomposed to the next subset of mainly given measurable indicators ($I^{l_j}...I^{l_k} - I^{\delta_j}...I^{\delta_l}$), which are comprised at the third level. Therein, we have assigned 271 indicators. Level 3 is also tailorable. In turn, each indicator at Level 3 is additionally decomposed to a subset of sectoral (organizational) indices specific to the critical facilities or infrastructures of ecological-economic systems, taking into account critical situation scenarios selected for analysis under given conditions. We have primarily specified 1156 indices at fourth level. Thus, the bottom of the resilience scoring system hierarchy is Level 4, which consists of different quantitative, semi-quantitative and qualitative metrics and measures referred to sector-specific characteristics of ecological-economic systems. Indices represented at Level 4 ($IX^{lij}_p...IX^{lij}_Q - IX^{\delta ij}_p...IX^{\delta ij}_R$) are transformed to a quantitative measurement scale using fuzzy calculations and normalization technique. The weights are assigned by experts to the indicators defined at levels 2, 3 and 4 according to their significance and interest to measure. When fuzzification and weighting factors determination of all indices at Level 4 is done, the overall ecological security and resilience index estimation is implemented through weighted aggregation of the indicators going upwards the hierarchy from Level 4 to Level 1 (meanwhile, each indicator at given levels get a concrete assessment). Alternatively, it is also possible to focus on some single indicators at various levels that seem more suitable to identify gaps in environmental safety and resilience in terms of flexibility of applying the proposed assessment procedure. At once, the selection of criteria and indicators, which are interesting to measure, is starting from Level 1 downwards the bottom, and the very measurement of chosen indicators is starting from Level 4 upwards to the top, i.e., the levels 1, 2, and 3 are aggregations of level 4 indices, rather than genuine measurable indicators as such. Finally, the defuzzification of operationalized fuzzy scores should be carried out until the crisp estimates of the all aggregated indices are obtained. Thereupon, an interpretation of the resulting assessments is given in graphical or tabular form.

Subsequently, the selection of relevant specific criteria and indicators at levels 2, 3 and 4, as well as the data acquisition for estimation procedure depend on the initially predefined context and detailed specification of scenario, including resilience domains, security threat types and situational factors. Establishment of the weighting coefficients for measured indices importance is a prerogative of expert’s judgments.

Based on the research results [27], a formal representation of the described multi-level hierarchical assessment procedure of ecological-economic system resilience can be written with the following formulas:

$$ESR = f(ESR_{Org}, ESR_{Tech}, ESR_{Pers}, ESR_{SoEc}, t) \xrightarrow{\gamma} opt, \tag{1}$$

$$ESRI = \frac{1}{8} \prod_{p=1}^8 \left[\frac{1}{l} \prod_{c=1}^l u_c \left[\frac{1}{n} \prod_{i=1}^n v_i \left[\frac{1}{m} \prod_{j=1}^m w_j IX_{c,i,j} \right] \right] \right], \tag{2}$$

$$\sum_{c=1}^l u_c = \sum_{i=1}^n v_i = \sum_{j=1}^m w_j = 1, \tag{3}$$

where *ESR* is the resilience of ecological-economic system; *ESR_{Org}* is the organizational resilience; *ESR_{Tech}* is the technological resilience; *ESR_{Pers}* is the individual (personal) resilience; *ESR_{SoEc}* is the socio-economic (cooperative) resilience; *ESRI* is the aggregated environmental safety index calculated on the basis of indicator values at levels 2, 3 and 4 of the evaluation system decomposition, respectively; *IX_{c,i,j}* are the drawn resulting estimates of the particular resilience and safety indicators at levels 2, 3 and 4, respectively; *l, n, m* are the number of estimating safety and resilience indicators at levels 2, 3 and 4, respectively; *u_c, v_i, w_j* are the agreed weighting coefficients (weights) stated by experts for particular indicators at levels 2, 3 and 4, respectively, possessing the values in the range [0, 1] subject to the relative measure of significance of the indicators involved in the assessment; γ is a degree of concordance between integral environmental performance and environmental sustainability indexes characterizing the state variation in time of ecological resilience domains; *t* is a time parameter conditionally reflecting the dynamics of changes in the security and resilience indicators under consideration.

The proposed integral estimation model (1)–(3) of the overall environmental safety index uses an original system of ecological security and resilience indicators designed as a result of the generalization of existing indicated systems and the formation of aggregated indicators obtained by convolving a series of groups of the generally accepted standard security indices. As well, the model also implicates several individual resilience indicators reflecting the specificity of critical elements and infrastructures of the ecological-economic systems.

The choice of a multiplicative convolution of criteria in formula (2) is due to the need to comply with the principle of "equitable compromise" between the key ecological security and resilience indicators, taking into account their equal significance. In addition, the selected criteria we have initially defined are interdependent, and changing the characteristics of one of them can significantly affect the assessment of the parameters of others. In some cases, when evaluating and analyzing specific groups of ecological security or resilience indicators, additive convolution of criteria can be also applied. This is allowed when the criteria can be evaluated independently of each other, i.e., when assessing the environmental safety of the commercial introduction of various prospective technologies in the industrial sector of regional economy.

In fine, it should be noted that the designed method is in some way an omnibus technique for the workflow implementation of the overall security and resilience analysis of ecological-economic systems. Since it is mostly intended for self-assessment, it can be in some cases not fully objective, but, however, the estimation results are sufficiently indicative for strategic decision-making support to enhance security and resilience of the regional ecological-economic systems in various emergency situations by leveling the highlighted strengths and weaknesses of the performance of critical facilities and infrastructures operating in these systems. Improving the objectivity and adequacy of the method to obtain better results from the different perspective can be further achieved through its use in combination with other well-known methodologies for situational management and assessment of the system robustness, such as methods for in-depth analysis of the technological and organizational resilience of critical infrastructures [28, 29].

Conclusion

With the worsening of the environmental situation in the Arctic regions, which is caused by the aggravation of regional and global environmental problems, as well as the emergence of natural and man-made critical situations, the resilience and security of ecological-economic systems play a vital role in the sustainable development of these territories and are at the forefront of world science, being the subject of many state-of-the-art studies around the world, both in the field of the humanities (political, economic, social, etc.), as well as technical and natural sciences. Thus, the issues and goals of developing standards and models for organizational management (regulation) of ecological security, principles and methods for assessing the resilience of ecological-economic systems come to the foreground. The problem-solving of these objectives is utterly necessary for the preparation of scientifically grounded evidence-based guidelines and scope for the greening of regional and national policies in the Russian Arctic and effective implementation of the sustainable development strategy for this macro-region. Along the lines of solving these problems in the course of the study, the following main results were drawn:

1. The fundamental principles and a set of criteria for managing and ensuring ecological security and resilience for various types of economical activity in the regions of the Russian Arctic have been developed. The proposed principles and criteria are based on the postulates of the theory of sustainable development and the concept of acceptable risk. The set of key indicators of ecological security and resilience can be expanded and deepen subject to the changing legislation, preferences of experts and the current state of affairs in the socio-economic sphere.

2. A generic methodological approach to assessing the overall level of ecological robustness (security and resilience integral index) of Arctic ecosystems according to selected principles and criteria is proposed. The approach is based on the joint application of a hierarchical multi-level decomposition scheme "principle – criterion – indicator – index", methods of expert analysis and models for quantitative and qualitative assessment of the resilience of organizational and technical systems.

The contribution of our findings to the development of the theory and practice of managing ecological-economic systems lies in the interdisciplinary scientific study of the goals and objectives of the conceptualization and institutionalization of ecological security and in the adaptation of quantitative and qualitative methods for assessing the resilience of critical infrastructures for a prescriptive analysis of the ecological robustness of regional systems. The application field of the research results is the methodical-organizational support of information and analytical decision support systems for the preventive management of ecological security. In addition, the combination of the proposed developments with well-known advanced solutions can be efficiently used under implementation of the key provisions of the Strategy for Environmental safety of

the Russian Federation for the period up to 2025 [3] and the Strategy for the Development of the Arctic zone of the Russian Federation and ensuring national security for the period up to 2035 [1] in the Murmansk region in terms of the design and adoption of environmentally friendly ESG and CSR behavioral models of business entities, as well as new standards governing the public domain of environmental safety for elements of industrial-natural systems.

Further research in the problem area under consideration will be continued in the direction of developing advising (recommending) intelligent systems and decision support tools for managing ecological security and resilience, which will provide accounting both quantitative information and non-formalizable qualitative aspects that describe the state of regional ecosystems and influencing factors in the integral assessment of the ecological robustness level and ecological-economic system performance for the subsequent generation of guidelines formulated in natural language (in verbal form) to decision makers and the synthesis of adequate situational control models in the face of constantly growing volumes of diverse data that require operational analytical processing, control, verification and interpretation.

References

1. *Strategii razvitiya Arkticheskoy zony Rossiyskoy Federatsii i obespecheniya natsional'noy bezopasnosti na period do 2035 goda (utv. Ukazom Prezidenta RF ot 26.10.2020 № 645) = Strategies for the development of the Arctic zone of the Russian Federation and ensuring national security for the period up to 2035 (approved by Decree of the President of the Russian Federation No. 645 of 10/26/2020).* (In Russ.). Available at: <http://static.kremlin.ru/media/events/files/ru/J8FhckYOPAQQfxN6Xlt6ti6XzpTVAvQy.pdf> (accessed 14.03.2023).
2. *Strategiya natsional'noy bezopasnosti Rossiyskoy Federatsii (utv. Ukazom Prezidenta RF № 400 ot 2 iyulya 2021 g.) = National Security Strategy of the Russian Federation (approved by Presidential Decree No. 400 of July 2, 2021).* (In Russ.). Available at: <http://static.kremlin.ru/media/events/files/ru/QZw6hSk5z9gWq0pID1ZzmR5cER0g5tZC.pdf> (accessed 14.03.2023).
3. *Strategii ekologicheskoy bezopasnosti Rossiyskoy Federatsii na period do 2025 goda (utv. Ukazom Prezidenta RF ot 19.04.2017 № 176) = Environmental safety strategies of the Russian Federation for the period up to 2025 (approved by Decree of the President of the Russian Federation No. 176 dated 04/19/2017).* (In Russ.). Available at: <http://static.kremlin.ru/media/acts/files/0001201704200016.pdf> (accessed 14.03.2023).
4. Masloboev A.V. Methodological approach to ensuring the viability of ecological and economic systems of the Russian Arctic (Part 1. Principles of sustainability management). *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems.* 2023;(1):142–156. (In Russ.)
5. Voronchikhina D.N. Modern concepts of environmental safety. Problems of environmental policy implementation in the Russian Federation. *Diskurs-Pi = Discourse-Pi.* 2019;16(4):79–96. (In Russ.)
6. Dyadik V.V., Masloboev V.A., Klyuchnikova E.M. et al. Conceptualization of environmental policy: analysis of Russian and foreign scientific discourse and state priorities for the development of the Arctic. *Sever i rynek: formirovanie ekonomicheskogo poryadka = The North and the market: the formation of an economic order.* 2023;26(1):7–34. (In Russ.)
7. Spitz K., Trudinger J., Orr M. *Environmental Social Governance. 1st Edition.* CRC Press, 2022:278.
8. Dathe T., Dathe R., Dathe I., Helmold M. *Corporate Social Responsibility (CSR), Sustainability and Environmental Social Governance (ESG). Approaches to Ethical Management.* Springer Cham, 2022:203.
9. Porfir'ev B.N. «Zelenaya» ekonomika: realii, perspektivy i predely rosta = "Green" economy: realities, prospects and limits of growth. Moscow: Moskovskiy tsentr Karnegi, 2013:32. (In Russ.)
10. Antonova I.I. (ed.). *Tsirkulyarnaya ekonomika: obespechenie ustoychivogo razvitiya i konkurentosposobnosti regiona = Circular economy: ensuring sustainable development and competitiveness of the region.* Moscow: Infra-M, 2022:270. (In Russ.)
11. Gurlev I.V., Masloboev A.V., Malygin I.G. Situational awareness of the state of the ports of the Northern Sea transport corridor in the management of environmental safety of the Arctic. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems.* 2022;(4):120–134. (In Russ.)
12. Liu Ch., Li W., Xu J. et al. Global trends and characteristics of ecological security research in the early 21st century: A literature review and bibliometric analysis. *Ecological Indicators.* 2022;137(108734).
13. Volik B.G. On the concepts of technogenic security. *Avtomatika i telemekhanika = Automation and telemechanics.* 1998;(2):165–170. (In Russ.)
14. Feoktistova O.G., Turkin I.K., Barinov S.V. Relevance of industrial risk assessment at aviation enterprises. *Nauchnyy vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta grazhdanskoy aviatsii = Scientific Bulletin of the Moscow State Technical University of Civil Aviation.* 2017;20(4):162–175. (In Russ.)
15. Elagin A.G. Some security laws and their characteristics. *Trudy Akademii upravleniya MVD Rossii = Proceedings of the Academy of Management of the Ministry of Internal Affairs of Russia.* 2020;(4):15–22. (In Russ.)
16. Willett A.H. *The economic theory of risk and insurance.* University of Pennsylvania Press, 1951:136.
17. Efremov I.V., Rakhimova N.N. *Tekhnogennyye sistemy i ekologicheskyy risk = Technogenic systems and environmental risk.* Orenburg: OGU, 2016:171. (In Russ.)
18. The concept of acceptable risk. *Informatsionnyy resurs po okhrane truda = Information resource on labor protection.* (In Russ.). Available at: http://ohrana-bgd.ru/bgdobsh/bgdobsh1_39.html (accessed 14.03.2023).

19. Rød B., Lange D., Theocharidou M., Pursiainen C. From risk management to resilience management in critical infrastructure. *Journal of Management in Engineering*. 2020;36(4).
20. *Ponyatie riska. Kontseptsiya priemlemogo dopustimogo riska. Upravlenie riskami = The concept of risk. The concept of acceptable acceptable risk.* (In Russ.). Available at: <https://www.prodlenka.org/metodicheskie-razrabotki/274358-ponyatie-riska-koncepcija-priemlemogo-dopusti> (accessed 14.03.2023).
21. Davydova O.G., Malkov A.V. Ensuring the safety of industrial facilities (on the example of nuclear power plants). *Vestnik rossiyskogo khimiko-tekhnologicheskogo universiteta imeni D.I. Mendeleeva. Seriya: Gumanitarnye i sotsial'no-ekonomicheskie issledovaniya = Bulletin of the D. I. Mendeleev Russian University of Chemical Technology. Series: Humanitarian and Socio-economic studies*. 2015;2(6):6–14. (In Russ.)
22. Pursiainen C.H., Rød B., Baker G. et al. Critical Infrastructure Resilience Index. *Risk, Reliability and Safety: Innovating Theory and Practice. Proceedings of the 26th European Safety and Reliability conference, ESREL / ed. by Walls, Revie & Bedford (Glasgow, Scotland, September 25–19, 2016)*. London, UK: Taylor & Francis Group, 2017:2183–2189.
23. Rehak D., Senovsky P., Hromada M., Lovecek T. Complex approach to assessing resilience of critical infrastructure elements. *International Journal of critical infrastructure protection*. 2019;(25):125–138.
24. Yurkov N.K., Mikhaylov V.S. *Integral'nye otsenki v teorii nadezhnosti. Vvedenie i osnovnye rezul'taty = Integral estimates in reliability theory. Introduction and main results*. Moscow: Tekhnosfera, 2020:152. (In Russ.)
25. Jovanovic A.S., Schmid N., Klimek P., Choudhary A. Use of Indicators for Assessing Resilience of Smart Critical Infrastructures. *IRGC Resource Guide on Resilience / ed. by I. Linkov, M.V. Florin*. Lausanne: EPFL International Risk Governance Center, 2016:136–140.
26. Kashulin N.A., Masloboev V.A. (eds.). *Natsional'nyy obshchestvennyy standart «Ekologicheskaya bezopasnost' Arktiki» = National Public Standard "Environmental safety of the Arctic"*. Moscow: Libri Plyus, 2016:88. (In Russ.)
27. Masloboev A.V. Formal models of viability of regional critical infrastructures. *Trudy ISA RAN = Proceedings of the ISA RAS*. 2022;72(3):59–80. (In Russ.)
28. Mindykowski P. et al. *Physical exposure identification and mapping methodologies. IMPROVER Project Re-port: Deliverable 3.1*. 2016:45.
29. Bram S., Degerman H., Melkunaite L. et al. *Organisational resilience concepts applied to critical infrastructure. IMPROVER Project Report: Deliverable 4.3*. 2017. Available at: <http://improverproject.eu/2017/05/31/d-4-3-organisational-resilience-concepts-applied-to-critical-infrastructure> (accessed 14.03.2023).

Список литературы

1. Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года (утв. Указом Президента РФ от 26.10.2020 № 645). URL: <http://static.kremlin.ru/media/events/files/ru/J8FhckYOPAQQfxN6Xlt6ti6XzprTVAvQu.pdf> (дата обращения: 14.03.2023).
2. Стратегия национальной безопасности Российской Федерации (утв. Указом Президента РФ № 400 от 2 июля 2021 г.). URL: <http://static.kremlin.ru/media/events/files/ru/QZw6hSk5z9gWq0plD1ZzmR5cER0g5tZC.pdf> (дата обращения: 14.03.2023).
3. Стратегии экологической безопасности Российской Федерации на период до 2025 года (утв. Указом Президента РФ от 19.04.2017 № 176). URL: <http://static.kremlin.ru/media/acts/files/0001201704200016.pdf> (дата обращения: 14.03.2023).
4. Маслобоев А. В. Методический подход к обеспечению жизнеспособности эколого-экономических систем российской Арктики (Часть 1. Принципы управления устойчивостью) // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 1. С. 142–156.
5. Ворончихина Д. Н. Современные концепции экологической безопасности. Проблемы реализации экологической политики в Российской Федерации // Дискурс-Пи. 2019. Т. 16, № 4. С. 79–96.
6. Дядик В. В., Маслобоев В. А., Ключникова Е. М. [и др.]. Концептуализация экологической политики: анализ российского и зарубежного научного дискурса и государственные приоритеты развития Арктики // Север и рынок: формирование экономического порядка. 2023. Т. 26, № 1. С. 7–34.
7. Spitz K., Trudinger J., Orr M. *Environmental Social Governance*. 1st Edition. CRC Press, 2022. 278 p.
8. Dathe T., Dathe R., Dathe I., Helmold M. *Corporate Social Responsibility (CSR), Sustainability and Environmental Social Governance (ESG). Approaches to Ethical Management*. Springer Cham, 2022. 203 p.
9. Порфирьев Б. Н. «Зеленая» экономика: реалии, перспективы и пределы роста. М. : Московский центр Карнеги, 2013. 32 с.
10. Циркулярная экономика: обеспечение устойчивого развития и конкурентоспособности региона / под ред. И. И. Антоновой. М. : Инфра-М, 2022. 270 с.
11. Гурлев И. В., Маслобоев А. В., Малыгин И. Г. Ситуационная осведомленность о состоянии портов Северного морского транспортного коридора в управлении экологической безопасностью Арктики // Надежность и качество сложных систем. 2022. № 4. С. 120–134.
12. Liu Ch., Li W., Xu J. [et al.]. Global trends and characteristics of ecological security research in the early 21st century: A literature review and bibliometric analysis // *Ecological Indicators*. 2022. Vol. 137. Article no. 108734.
13. Волик Б. Г. О концепциях техногенной безопасности // *Автоматика и телемеханика*. 1998. Вып. 2. С. 165–170.

14. Феоктистова О. Г., Туркин И. К., Баринов С. В. Актуальность оценки производственного риска на авиа-предприятиях // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. 2017. Т. 20, № 4. С. 162–175.
15. Елагин А. Г. Некоторые законы безопасности и их характеристики // Труды Академии управления МВД России. 2020. № 4. С. 15–22.
16. Willett A. H. The economic theory of risk and insurance. University of Pennsylvania Press, 1951. 136 p.
17. Ефремов И. В., Рахимова Н. Н. Техногенные системы и экологический риск. Оренбург : ОГУ, 2016. 171 с.
18. Концепция приемлемого риска // Информационный ресурс по охране труда. URL: http://ohrana-bgd.ru/bgdobsh/bgdobsh1_39.html (дата обращения: 14.03.2023).
19. Rød B., Lange D., Theocharidou M., Pursiainen C. From risk management to resilience management in critical infrastructure // Journal of Management in Engineering. 2020. Vol. 36, iss. 4. Article no. 04020039.
20. Понятие риска. Концепция приемлемого допустимого риска. Управление рисками. URL: <https://www.prodlenka.org/metodicheskie-razrabotki/274358-ponjatie-riska-koncepcija-priemlemogo-dopusti> (дата обращения: 14.03.2023)
21. Давыдова О. Г., Малков А. В. Обеспечение безопасности промышленных объектов (на примере атомных электростанций) // Вестник российского химико-технологического университета имени Д. И. Менделеева. Серия: Гуманитарные и социально-экономические исследования. 2015. Т. 2, № 6. С. 6–14.
22. Pursiainen C. H., Rød B., Baker G. [et al.]. Critical Infrastructure Resilience Index // Risk, Reliability and Safety: Innovating Theory and Practice. Proceedings of the 26th European Safety and Reliability conference, ESREL / ed. by Walls, Revie & Bedford (Glasgow, Scotland, September 25–19, 2016). London, UK : Taylor & Francis Group, 2017. P. 2183–2189.
23. Rehak D., Senovsky P., Hromada M., Lovecek T. Complex approach to assessing resilience of critical infrastructure elements // International Journal of critical infrastructure protection. 2019. № 25. P. 125–138.
24. Юрков Н. К., Михайлов В. С. Интегральные оценки в теории надежности. Введение и основные результаты. М. : Техносфера, 2020. 152 с.
25. Jovanovic A. S., Schmid N., Klimek P., Choudhary A. Use of Indicators for Assessing Resilience of Smart Critical Infrastructures // IRGC Resource Guide on Resilience / ed. by I. Linkov, M. V. Florin. Lausanne : EPFL International Risk Governance Center, 2016. P. 136–140.
26. Национальный общественный стандарт «Экологическая безопасность Арктики» / под ред. Н. А. Кашулина, В. А. Маслобоева. М. : Либри Плюс, 2016. 88 с.
27. Маслобоев А. В. Формальные модели жизнеспособности региональных критических инфраструктур // Труды ИСА РАН. 2022. Т. 72, № 3. С. 59–80.
28. Mindykowski P. [et al.]. Physical exposure identification and mapping methodologies. IMPROVER Project Report: Deliverable 3.1. 2016. 45 p.
29. Bram S., Degerman H., Melkunaite L. [et al.]. Organisational resilience concepts applied to critical infrastructure. IMPROVER Project Report: Deliverable 4.3. 2017. URL: <http://improverproject.eu/2017/05/31/d-4-3-organisational-resilience-concepts-applied-to-critical-infrastructure> (дата обращения: 14.03.2023).

Информация об авторах / Information about the authors

Андрей Владимирович Маслобоев

доктор технических наук, доцент,
ведущий научный сотрудник,
заведующий лабораторией информационных технологий управления региональным развитием, Институт информатики и математического моделирования имени В. А. Путилова Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук»; Институт проблем промышленной экологии Севера Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук» (Россия, г. Апатиты, ул. Ферсмана, 14)
E-mail: masloboev@iimm.ru

Andrey V. Masloboev

Doctor of technical sciences, associate professor, leading researcher, head of the laboratory of information technologies for regional development management, Putilov Institute for Informatics and Mathematical Modeling of the Federal Research Centre "Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences"; Institute of North Industrial Ecology Problems of the Federal Research Centre "Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences" (14 Fersmana street, Apatity, Russia)

**Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов /
The author declares no conflicts of interests.**

Поступила в редакцию/Received 17.02.2023

Поступила после рецензирования/Revised 11.03.2023

Принята к публикации/Accepted 25.03.2023