

СОДЕРЖАНИЕ

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ ПРОБЛЕМ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА

- Острейковский В. А., Шевченко Е. Н.**
О РОЛИ ОПЕРАТОРА ЭНТРОПИИ ПРИ ОЦЕНКЕ И АНАЛИЗЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ
ДОЛГОВЕЧНОСТИ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ..... 3
- Березнев В. А., Дивеев А. И.**
МЕТОД РЕДУКЦИИ ПРОСТРАНСТВА СОСТОЯНИЙ
ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ..... 17
- Маклашов В. А., Пиганов М. Н.**
МЕТОДИКА УНИФИКАЦИИ СРЕДСТВ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ БОРЬБЫ 26

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ

- Бутусов О. Б., Дикусар В. В., Редикутьцева Н. И.**
НЕЧЕТКИЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ
ДЛЯ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В ЭКОЛОГИИ..... 33
- Боков А. С., Важенин В. Г., Иофин А. А., Мухин В. В.**
РЕТРАНСЛЯЦИОННЫЙ ИМИТАТОР СИГНАЛОВ ДЛЯ ПРОВЕРКИ ХАРАКТЕРИСТИК
БОРТОВЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИСТЕМ И УСТРОЙСТВ 40

ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

- Садыхов Г. С., Кудрявцева С. С., Калашников В. С.**
РАСЧЕТ И ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ РЕСУРСА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ПРИНУДИТЕЛЬНЫХ
ИСПЫТАНИЙ НА ОТКАЗ НЕВОССТАНАВЛИВАЕМЫХ ОБЪЕКТОВ..... 50
- Юрков Н. К., Михайлов В. С., Трусов В. А.**
ОЦЕНКА И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА
ПО РЕЗУЛЬТАТАМ БИНОМИАЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЙ, НЕ ДАВШИХ ОТКАЗЫ 62
- Григорьев А. В., Лысенко А. В., Таньков Г. В., Наумова И. Ю., Юрков Н. К.**
ГРАДУИРОВОЧНАЯ ФУНКЦИЯ ИЗМЕРЕНИЯ АППЛИКАТЫ ВИБРАЦИОННОГО
ПЕРЕМЕЩЕНИЯ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА РАЗМЫТИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ КРУГЛОЙ МЕТКИ..... 70
- Быков А. П., Андросов С. В., Пиганов М. Н.**
МЕТОДИКА ТЕПЛО ВАКУУМНЫХ ИСПЫТАНИЙ ПРИБОРОВ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА..... 78

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ИНФОРМАТИКИ

- Имамудинов А. И., Слепцов Н. В.**
АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ЭВОЛЮЦИОННО-ГЕНЕТИЧЕСКИХ ВЫЧИСЛЕНИЙ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ
ХАРАКТЕРИСТИК ОБОБЩЕНИЯ 84
- Имамудинов А. И., Слепцов Н. В.**
ОСНОВАНИЯ ПРИМЕНЕНИЯ КВАЗИБИОЛОГИЧЕСКИХ ПОДХОДОВ К РЕШЕНИЮ
ОПТИМИЗАЦИОННЫХ ЗАДАЧ 92
- Имамудинов А. И.**
ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГЕНЕТИЧЕСКОГО ПОИСКА 100

CONTENT

FUNDAMENTALS OF RELIABILITY ISSUES AND QUALITY.....3

Ostreykovsky V. A., Shevchenko E. N.

ON THE ROLE OF THE ENTROPY OPERATOR WHEN ESTIMATING AND ANALYSIS
OF THE INDICATORS OF LONGNESS OF COMPLEX TECHNICAL DYNAMIC SYSTEMS.....3

Bereznev V. A., Diveev A. I.

STATE SPACE REDUCTION METHOD FOR OPTIMAL CONTROL PROBLEM.....17

Maklashov V. A., Piganov M. N.

METHOD OF UNIFICATION OF ELECTRONIC WARFARE MEANS26

TECHNOLOGICAL BASES OF IMPROVING THE RELIABILITY AND QUALITY OF PRODUCTS

Butusov O. B., Dikusar V. V., Redikul'tseva N. I.

FUZZY DIFFERENTIAL SYSTEMS AND THEIR APPLICATION
FOR MATHEMATICAL MODELING IN ECOLOGY.....33

Bokov A. S., Vazhenin V. G., Iofin A. A., Mukhin V. V.

RETRANSMITTING SIMULATOR FOR TESTING
OF AIRBORNE RADAR SYSTEMS AND DEVICES PERFORMANCE.....40

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

Sadykhov G. S., Kudryavtseva S. S., Kalashnikov V. S.

CALCULATION AND ESTIMATION OF USEFUL OPERATION TIME
BASED ON FORCED FAILURE TESTS OF IRREPARABLE ITEMS50

Yurkov N. K., Mihailov V. S., Trusov V. A.

ESTIMATION AND PREDICTION OF THE RESIDUAL RESOURCE
BASED ON THE RESULTS OF BINOMIAL TESTS THAT DID NOT GIVE UP.....62

Grigorev A. V., Lysenko A. V., Tankov G. V., Naumova I. Yu., Yurkov N. K.

THE CALIBRATION MEASUREMENT APPLICATION VIBRATION DISPLACEMENTS
BASED ON THE ANALYSIS OF DEFOCUS OF THE IMAGE OF A CIRCULAR MARK.....70

Bykov A. P., Androssov S. V., Piganov M. N.

TECHNIQUE OF THERMAL-VACUUM TESTING OF SPACECRAFT78

GENERAL ISSUES OF COMPUTER SCIENCE

Imamutdinov A. I., Sleptsov N. V.

ANALYSIS OF THE PROCESS OF EVOLUTIONARY GENETIC CALCULATIONS
IN TERMS OF GENERALIZATION CHARACTERISTICS84

Imamutdinov A. I., Sleptsov N. V.

BASES OF APPLICATION OF QUASI-BIOLOGICAL APPROACHES
ON SOLVING OPTIMIZATION PROBLEMS92

Imamutdinov A. I.

PROVIDING COMPUTATIONAL EFFICIENCY OF GENETIC SEARCH.....100

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ ПРОБЛЕМ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА

FUNDAMENTALS OF RELIABILITY ISSUES AND QUALITY

УДК 517.98: 519.2: 621.039

DOI 10.21685/2307-4205-2019-3-1

В. А. Острейковский, Е. Н. Шевченко

О РОЛИ ОПЕРАТОРА ЭНТРОПИИ ПРИ ОЦЕНКЕ И АНАЛИЗЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ¹

V. A. Ostreykovsky, E. N. Shevchenko

ON THE ROLE OF THE ENTROPY OPERATOR WHEN ESTIMATING AND ANALYSIS OF THE INDICATORS OF LONGNESS OF COMPLEX TECHNICAL DYNAMIC SYSTEMS

Аннотация. *Актуальность и цель.* В связи с современными воззрениями вопросы оценки асимметрии времени на показатели долговечности оборудования структурно и функционально сложных технических систем (СФСС) относятся к первообразному фундаментальному понятию науки, в рамках которого решение поднимаемой проблемы является чрезвычайно актуальной. Поэтому целью предлагаемой статьи является анализ влияния роли оператора энтропии на показатели долговечности СФСС. *Материалы и методы.* Так как традиционные детерминистические и вероятностные математические методы, основанные на теориях прочности и математической статистики, не учитывают эффекта асимметрии времени в модусах «прошлое–настоящее–будущее», то в данной статье используется аппарат теории операторов современного функционального анализа. *Результаты и выводы.* На базе второго закона термодинамики рекомендуется применение математического аппарата для учета связи асимметрии времени в моделях оценки показателей долговечности оборудования СФСС. Показана эффективность использования функций Ляпунова при

Abstract. *Background.* In connection with modern views, the evaluation of time asymmetry on equipment durability indicators of structurally and functionally complex technical systems (SFCS) are related to the primitive fundamental concept of science, within which the solution of the problem being raised is extremely important. Therefore, the purpose of the proposed article is to analyze the influence of the role of the entropy operator on the durability indices of the SFCS. *Materials and methods.* Since traditional deterministic and probabilistic mathematical methods based on theories of strength and mathematical statistics do not take into account the effect of time asymmetry in the “past-present-future” modes, this article uses the apparatus of the theory of modern functional analysis operators. *Results and conclusions.* On the basis of the second law of thermodynamics, it is recommended to use a mathematical apparatus to account for the connection of the time asymmetry in models for estimating indicators of the durability of SFSS equipment. The efficiency of using Lyapunov functions when applying the entropy operator M in problems of assessing resource characteristics and state at various stages of the life cycle

¹ Работа выполнена при поддержке РФФИ (Проекты № 17-01-00244, №18-07-00391, № 18-47-860007).

применении оператора энтропии M в задачах оценки ресурсных характеристик и состояния на различных этапах жизненного цикла изделий сложных технических комплексов. В общем виде разработана методика учета оператора энтропии и функций Ляпунова в задачах оценки показателей долговечности оборудования СФСС.

Ключевые слова: оператор энтропии, функции Ляпунова, необратимость, асимметрия времени.

of products of complex technical complexes is shown. In general, a method has been developed for accounting for the entropy operator and Lyapunov functions in problems of estimating the durability of the SFCS equipment.

Keywords: entropy operator, Lyapunov functions, irreversibility, time asymmetry.

Введение

С появлением во второй половине XX в. структурно и функционально сложных систем (СФСС) длительного использования, весьма дорогостоящих и выполняющих критически важные функции, проблема обеспечения их высокой надежности, безопасности и эффективности приобрела первостепенное значение. К таким системам прежде всего следует отнести авиационные и ракетно-космические комплексы, транспорт, объекты обычной и ядерной энергетики, химической промышленности, системы добычи, транспортировки и переработки нефтегазовой отрасли. Поэтому решение проблемы долговечности сложных динамических систем носит межотраслевой характер.

Здесь также нужно особо подчеркнуть, что у приведенных выше систем ресурс и срок службы может составлять 30–50 и более лет, и, следовательно, очень важным фактором их применения по назначению является значение в данный момент величины остаточного ресурса. А это приводит к необходимости оценивать состояние оборудования СФСС в модусах времени «прошлое–настоящее–будущее». Так как все характеристики состояния конструктивных элементов и подсистем СФСС являются функциями длительности эксплуатации, то для таких сложных комплексов проблема времени приобретает исключительное значение [1–4].

Известно [5–8], что проблема времени является одной из самых сложных и парадоксальных с древнейших времен. Причем сложности касаются не только ее разрешения, но и самой постановки проблемы.

Рассогласованность представлений о времени принято объяснять принципиальным различием между подходами к ее рассмотрению – метафизическим, объединяющим натурфилософские, мифологические и художественные попытки понять сущность и природу времени, и научным (инструментальным), включающим математическое и естественнонаучное знание о свойствах и проявлении времени, его использовании и измерении. В настоящий момент проблема времени не только сохраняет свою остроту в науке (особенно в технике, медицине, экологии в связи с появлением сложных высокоопасных комплексов во многих сферах деятельности человека [5, 6]), но и тяготеет к разрешению в различного рода синтетических моделях, объединяющих научное и философское знание [7].

Постановка задачи

До последней трети XX в. исторически сложилось, что методологический подход к оценке остаточных ресурсов и сроков службы изделий СФСС основывался на достижениях теории прочности и долговечности, теории марковских процессов и постулатов Н. М. Седякина и К. Шеннона. Эти подходы для своего времени были достаточно обоснованными и использовались в нормативных документах по расчету показателей долговечности в различных отраслях техники [9].

Так, в частности, феноменология методов оценки ресурса, срока службы и остаточного ресурса оборудования сложных систем на основе чисто детерминированного подхода требует большого объема статистических данных реальной эксплуатации объектов, что часто трудно выполнить. Результаты подобных расчетов показателей долговечности даже при достаточно обширных статистических данных свидетельствуют о высокой степени осторожности в оценке полученных результатов [9].

Использование вероятностно-статистических методов по числу отказов объектов, несомненно, повышает достоверность получаемых результатов в решении задач оценивания показателей долговечности оборудования сложных систем длительного использования. Однако эти результаты также обладают значительной степенью неопределенности из-за введения понятий доверительных интервалов.

Сочетание детерминированных и вероятностно-статистических методов может повысить достоверность оценок остаточного ресурса и срока службы сложных высоко ответственных систем. Однако в силу отмеченных выше недостатков этих подходов их целесообразно применять только для ориентировочных расчетов [10, 11].

Для устранения приведенных недостатков необходим новый, более современный подход к оценке долговечности СФСС в модусах времени «прошлое–настоящее–будущее».

Математической базой такого подхода является теория операторов функционального анализа модели внутреннего времени изделий СФСС. Фундаментальной основой асимметрии времени служат неустойчивые и необратимые процессы. Для описания таких процессов исследователи используют операторы Лиувилля, Гамильтона, энтропии, внутреннего времени и функции Ляпунова.

Целью настоящей статьи является оценка роли оператора энтропии M в решении задач теории долговечности СФСС.

Основная часть

1. Сущность оператора энтропии

Классическая механика оперирует фундаментальным вторым уравнением И. Ньютона, устанавливающим зависимость между ускорением и силой F

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

в котором нет различия между прошлым и будущим: уравнение (1) инвариантно относительно обращения времени $t \rightarrow -t$, т.е. одинаково возможны и движения A «вперед» по времени, и движения B «назад» по времени.

Р. Клаузиус (1835 г.) рассматривал изолированные системы, не обменивающиеся с внешним миром ни энергией, ни веществом. Для таких систем им была введена функция S (энтропия), монотонно возрастающая до тех пор, пока не достигнет своего максимального значения в состоянии термодинамического равновесия:

$$\frac{dS}{dt} \geq 0. \quad (2)$$

Однако оказалось, что выражение (2) справедливо и для систем, обменивающихся с внешним миром и веществом, и энергией.

Согласно второму началу термодинамики производство энтропии внутри системы положительно

$$dS = d_e S + d_i S, \quad d_i S \geq 0, \quad (3)$$

где $d_e S$ – определяет перенос энтропии через границы системы, а $d_i S$ – производство энтропии внутри системы. Вклад в производство энтропии внутри системы дают только необратимые процессы.

Таким образом, сутью второго начала термодинамики является утверждение: необратимые процессы (химические реакции, теплопроводность, диффузия и т.п.) приводят к односторонности времени. Или по-другому, положительное направление времени второе начало термодинамики связывает с возрастанием энтропии [8].

Далее рассмотрим систему, которая обменивается с внешним миром энергией, но не веществом, т.е. замкнутой системой.

Для замкнутой системы производство энтропии определяется теплом Q , получаемым от внешней среды

$$d_e S = dQ / T^0, \quad d_i S = 0, \quad (4)$$

где T^0 – абсолютная температура.

Если соотношение (4) объединить с первым началом термодинамики, то для замкнутой системы имеем

$$dE = dQ - pdV, \quad (5)$$

где E – энергия; p – давление; V – объем, т.е. энергия, которой система обменивается с внешним миром за небольшой промежуток времени dt , состоит из теплоты, полученной системой, и механической работы, произведенной над границей системы. Тогда полный дифференциал энтропии равен

$$dS = \frac{dE}{T^0} + p \frac{dV}{T^0}. \quad (6)$$

Дж. Гиббс обобщил формулу (6) на случай неоднородного по составу тела. Пусть n_1, n_2, n_3, \dots – числа молей различных компонент. Тогда формула Гиббса для энтропии имеет вид

$$dS = \frac{dE}{T^0} + \frac{p}{T^0} dV - \sum \frac{\mu_\gamma}{T^0} dn_\gamma, \quad (7)$$

где μ_γ – химические потенциалы Дж. Гиббса, подробно описаны ниже.

Для случая линейной неравновесной термодинамики формула (6) допускает обобщение следующего вида:

$$\frac{d_i S}{dt} = \sum_j X_j J_j, \quad (8)$$

где J_j – скорости различных необратимых процессов (химических реакций, тепловых потоков, диффузии и т.д.), протекающих в системе; X_j – соответствующие обобщенные силы (градиенты температур, химических потенциалов и т.д.) (табл. 1, 2).

В работах [8, 10] доказано, что выражение (8) является основной формулой макроскопической термодинамики необратимых процессов.

2. Математические модели закономерностей необратимых физико-химических процессов на различных уровнях описания работоспособности элементов структурно и функционально сложных систем

Изучение закономерностей изменения свойств и состояний конструкционных материалов элементов СФСС целесообразно производить на трех уровнях: субмикроскопическом, микроскопическом и макроскопическом. Использование субмикроскопического уровня (строение атомов, молекул, кристаллических решеток) позволило получить представление о дислокациях в кристаллах, их взаимодействиях и движении, о диффузии атомов и электронном состоянии твердых тел и т.д. Эти сведения и легли в основу решения многих задач теории прочности конструкционных материалов [5].

На микроскопическом уровне рассматриваются процессы в небольших объемах (зерна, границы зерен, термические превращения). Макроскопический уровень связан с исследованиями распространения закономерностей, полученных на микроуровне, на весь объем твердого тела. Это потребовало разработки специальных методов инженерных расчетов, например, расчетов сложного напряженного состояния тел, износа, деформаций и т.п.

Основными физико-химическими процессами, которые в литературе по физике отказов считаются ответственными за изменение физических свойств материалов и, как следствие, за изменение функциональных характеристик элементов СФСС, являются следующие: диффузия, химические процессы, адсорбция, распад твердых растворов, изменение механических, электрических и магнитных свойств твердых тел. Эти процессы являются причиной более сложных деградиационных макропроцессов, которые проявляются при эксплуатации оборудования СФСС: коррозии, эрозии, радиационного охрупчивания, износа, теплового старения, высокоцикловой и малоцикловой усталости, ползучести, деформаций. Причем эти процессы развиваются под воздействием комплекса эксплуатационных факторов, таких как: динамические и статические механические нагрузки, термогидравлические и тепловые удары, взаимодействие теплоносителя с конструктивными элементами, перенос и осаждение продуктов коррозии, примесей и т.д.

В качестве примеров в табл. 1–2 приведены модели основных необратимых физико-химических процессов, приводящих в конечном итоге к утрате работоспособности оборудования применительно к ядерным энергетическим установкам атомных станций (ЯЭУ АС) [7]. В табл. 1 по-

казаны модели физико-химических процессов на субмикроскопическом уровне их изучения. Модели процессов, приводящих к отказам объектов на макроскопическом уровне, приведены в табл. 2.

Таблица 1

Модели физико-химических процессов на субмикроскопическом уровне

Физико-химический процесс	Модель процесса
Диффузия	$D(T^{\circ}) = D \exp\left(-\frac{E_a}{R_1 T^{\circ}}\right)$
Химические реакции	$C = C_0 e^{-k_p t^{\circ}}, k_p = k_{p0} \exp\left(-\frac{E_a}{R_1 T^{\circ}}\right)$
Рекристаллизация твердого тела	$\frac{dx}{dt} = k * (1-x) \exp\left(-\frac{E_a}{R_1 T^{\circ}}\right)$
Распад твердых растворов	$\frac{C_1 - C_2}{C_3 - C_2} = \exp(-at^b)$
Фазовые превращения в твердых телах	$n = a_1 e^{-\frac{E_a}{R_1 T^{\circ}}} e^{-\frac{a_2}{T^{\circ}}} \frac{\gamma^3}{(\Delta T^{\circ})}$
Распад мартенситной структуры в закаленных сталях	$V = a_3 V_0 \left\{ 1 - \exp\left[-t e^{-\frac{E_a}{R_1 T^{\circ}}}\right] \right\}$
Удельная электропроводность	$\sigma_{\varnothing} = \sigma_{\varnothing 0} \exp(-\alpha_{T^{\circ}} T^{\circ})$
Удельная электропроводность диэлектриков	$\sigma_{\varnothing} = \sigma_{\varnothing 0} \exp(a_4 E)$
Диэлектрическая проницаемость	$\epsilon_n = \epsilon_{n0} \exp(\alpha_{E_n} T^{\circ})$
Напряженность электрического поля при тепловом пробое	$E_{кр} = E_{кр0} \exp(-\alpha_E T^{\circ})$
Электрическая прочность	$E_{пр} = E_{пр0} - a_5 \sigma_M^h$

Таблица 2

Математические модели процессов, приводящих к отказам объектов на макроскопическом уровне

Наименование процесса	Модель процесса
1	2
Рост трещин в твердых телах	$\frac{dl}{dN} = A \Delta K_I^n, \quad \frac{dl}{dt} = C \Delta K_I^n;$ $b(t) = \exp\left[\ln b_{кр} - \frac{t}{\alpha} \left(\frac{\sigma_{ср}}{R_{\rho 0,2} T^{\circ}}\right)^2\right]$
Деформация твердого тела под напряжением	$\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_0 \exp\left(-\frac{\Delta G}{R_1 T^{\circ}}\right)$
Ползучесть	$\dot{\epsilon} = \alpha \exp\left(-\frac{E_a}{R_1 T^{\circ}}\right)$
Начальная стадия ползучести	$\dot{\epsilon} = \beta t^m$
Изменение относительного удлинения	$\dot{\epsilon} = \frac{\sigma_M}{E_1} + \frac{\sigma_M}{E_2} (1 - e^{-t/\tau}) + \frac{\sigma_M}{\eta_r}$
Вязкость при запаздывающей упругой деформации	$\eta_1 = A_1 \exp\left(\frac{\Delta E_a}{R_1 T^{\circ}}\right)$
Вязкость при течении материала	$\eta_2 = B \exp\left(\frac{\Delta E_a}{R_1 T^{\circ}}\right)$

Окончание табл. 2

1	2
Старение полупроводниковых ферромагнитных материалов	$\Delta\mu(t) = \Delta\mu_{\max} \frac{1 - e^{-\omega t}}{1 - \omega e^{-\omega t}}$
Старение конденсаторов	$I_{\text{ут}}(t) = I_{\text{ут max}} [1 - \exp(-k_1 t^{n_1})]$
Старение терморезисторов	$\Delta R(t) = \Delta R_{\max} [1 - \exp(-k_1 t^{n_1})]$
Старение терморезисторов при одновременном протекании процессов диффузии примесей и химических реакций в рабочем материале	$\Delta R(t) = a + b \exp(-ct);$ $\Delta R(t) = a_1 - \frac{b_1}{(t + d)^{n_1}}$
Скорость коррозии	$\frac{dy}{dt} = C_0 k_p \exp(\alpha_1 T^\circ);$ $\frac{dy}{dt} = \gamma C_0 e^{\alpha_1 T^\circ} t^{\gamma-1}$
Скорость окисления циркониевых сплавов в водяном паре	$k_p = A_2 \exp\left(-\frac{E_a}{R_1 T^\circ}\right)$
Износ	$x(t) = a_2 (e^{k_2 t} - 1), \quad k_2 > 0;$ $x(t) = a_2 (1 - e^{k_2 t}), \quad k_2 < 0$
Износ при вращении (подшипники)	$\frac{dx}{dt} = a_3 \epsilon_3 e^{a_3 t}, \quad a_3 = k_3 m \omega^3$

В табл. 1–2 приняты следующие обозначения: t – время; T° – абсолютная температура; D_0 – коэффициент диффузии при $T^\circ = 0^\circ\text{C}$; E_a – энергия активации; R_1 – универсальная газовая постоянная; C – концентрация вещества; k_p – константа скорости химической реакции; n – число центров кристаллизации; V – объем материала; γ – коэффициент поверхностного натяжения; σ_{30} – удельная электрическая проводимость при $T^\circ = 0^\circ\text{C}$; $\alpha_{T^\circ}, \alpha_{\epsilon_n}, \alpha_E$ – температурные коэффициенты; E – напряженность электрического поля; ϵ_{n0} – начальная диэлектрическая проницаемость при $T^\circ = 0^\circ\text{C}$; $E_{\text{кр}0}$ – напряженность электрического поля при пробое для $T^\circ = 0^\circ\text{C}$; σ_M – механическое напряжение; $E_{\text{пр}0}$ – напряженность электрического поля при пробое для $\sigma_M = 0$; $2l$ – длина трещины; N – число циклов нагружения; ΔK_1 – размах коэффициента интенсивности напряжений; $b_{\text{кр}}$ – критическая глубина трещины; $\sigma_{\text{ср}}$ – среднее напряжение; $R_{p0,2}^{T^\circ}$ – предел текучести; ϵ – деформация; E_1 – модуль упругости; E_2 – модуль упругости при запаздывающей упругой деформации; τ – постоянная времени; μ – магнитная проницаемость; $I_{\text{ут}}$ – ток утечки; ΔR – изменение сопротивления резистора; m – масса; ω – угловая скорость; ϵ_3 – начальный эксцентриситет; a_0 – радиус пятна касания; q_1 – заряд электрона; U – напряжение; E_{a0} – начальная энергия активации процесса разрушения; γ_1 – структурный коэффициент; k_1 – постоянная Больцмана; $a, b, c, d, \gamma, A, B, \alpha, \beta, k, n_1, u, \omega$ – константы.

Анализ приведенных в табл. 1–2 математических моделей позволяет сделать следующие выводы:

а) большинство физико-химических процессов, приводящих к отказам объектом ЯЭУ, может быть описано показательными функциями;

б) в качестве математических моделей для описания вида функции усталости объектов во времени целесообразно использовать зависимости

$$\phi(t) = e^{-kt}; \quad \phi(t) = ae^{bt}; \quad \phi(t) = a + be^{ct}; \quad \phi(t) = ae^{bt^c}; \quad \phi(t) = at^b e^{ct^d}; \quad (9)$$

в) для необратимых процессов утраты элементами СФСС работоспособности характерно одновременное действие химических, механических, тепловых, электрических, радиационных и дру-

гих процессов. Это приводит к сложным физико-химическим процессам изменения начальных свойств материалов элементов СФСС при эксплуатации. Например, интенсивность коррозионно-усталостного процесса разрушения металлов и сплавов выше сумм интенсивностей действия каждого фактора в отдельности. В этом случае простое сложение эффектов коррозии и механического разрушения отличается от суммарного эффекта одновременного их действия, т.е. сказывается эффект взаимодействия процессов.

Следует подчеркнуть, что рассматриваемая в данной статье проблема носит межотраслевой характер. Она чрезвычайно актуальна в авиационной и космической технике, транспорте, нефтяной, химической и газовой промышленности, металлургии, сельскохозяйственном машиностроении, тепловой энергетике и других отраслях народного хозяйства.

3. Связь оператора энтропии с функциями Ляпунова

Известно [8, 9], что для решения задач оценки односторонности (асимметрии) времени в теории долговечности СФСС необходимы оператор энтропии M второго начала термодинамики Клаузиуса (1835 г.), функции времени Ляпунова (1906 г.), а также методов современного функционального анализа и теории случайных процессов [9].

Выдающийся физик XIX в. Л. Больцман обосновал концепцию: необратимость есть проявление в макроскопическом масштабе «стохастичности», существующей в микроскопическом масштабе. Опираясь на эту концепцию, замечательный русский математик А. М. Ляпунов в своих исследованиях (1906 г.) предложил постулат, который формулируется следующим образом: *разбегание траекторий описывается функцией $\exp(t/\tau_c)$, где $1/\tau_c$ – для хаотических систем по определению положительная величина* [9]. Говоря языком конца XX–начала XXI в., этот постулат означает, что для поведения хаотических динамических систем понятие траектории утрачивает смысл через некоторое характерное время (время Ляпунова, рис. 1). Под хаосом будем понимать поведение системы, при котором первоначально близкие траектории экспоненциально разбегаются со временем. При этом режим называется хаотическим, если расстояние между любыми двумя точками первоначально сколь угодно малое экспоненциально возрастает со временем.

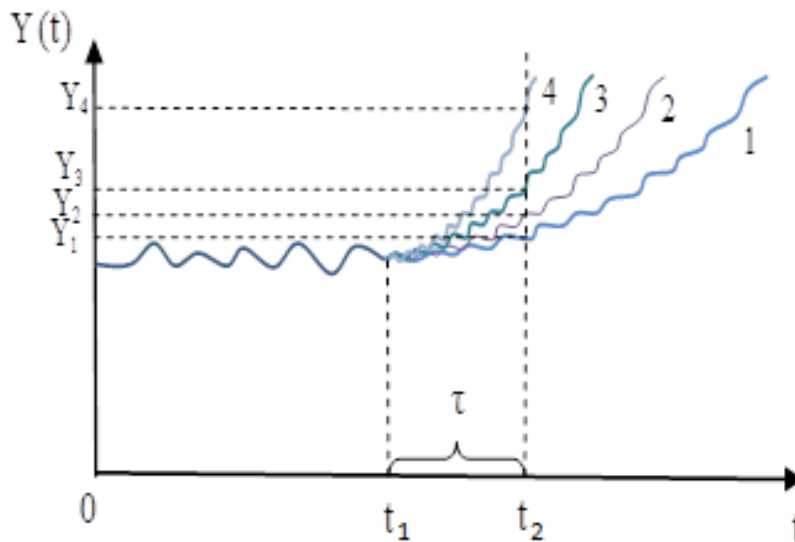


Рис. 1. Разбегание траекторий для хаотических систем $\tau = \tau_c$

3.1. Функции Ляпунова и второе начало термодинамики

Известно, что динамика описывает процессы, в которых направление времени несущественно (1). Совершенно понятно, что в других ситуациях именно направление времени имеет первостепенное значение. В п.1 показано: необратимые процессы (в частности, приведенные в табл. 1 и 2) приводят к односторонности времени или положительное направление времени второе начало термодинамики связывает с возрастанием энтропии, в основе которой преобладают необратимые процессы. Оно также постулирует существование функций с весьма специфическими свойствами, которые в изолированных системах могут возрастать со временем.

В главах 1, 4, 5 книги [8, с. 26–36, 85–122] И. Р. Пригожин приводит убедительные примеры процессов, приводящих к функциям Ляпунова. В частности, рассматривается система, эволюцию которой описывают переменные C_i – концентрации химических веществ. Эволюция во времени такой системы можно задать уравнениями скоростей реакций

$$\frac{dC_i}{dt} = F_i(\{C_i\}), \tag{10}$$

где F_i – суммарная скорость производства («наработки») компоненты C_i . Для каждой компоненты имеется свое уравнение.

Если предположить, что при $C_i = 0$ все скорости реакций обращаются в нуль, тогда точка $C_i = 0$ – точка равновесия рассматриваемой системы.

Что произойдет, если мы начнем с ненулевых значений концентраций C_i ? Будет ли наша система эволюционировать к точке равновесия $C_i = 0$? Если воспользоваться современной терминологией, то тот же вопрос можно сформулировать иначе: является ли состояние $C_i = 0$ аттрактором? Функции Ляпунова позволяют нам ответить на этот вопрос. Пусть функция концентраций $Y = Y(C_1, \dots, C_n)$ положительна во всем интересующем нас диапазоне концентраций и обращается в нуль при $C_i = 0$. В общем случае функция Ляпунова может быть и отрицательно определенной, но ее первая производная должна быть положительно определенной.

Рассмотрим, как изменяется $Y(C_1, \dots, C_n)$ при изменении концентраций C_i . Но эволюцию концентраций C_i со временем описывают уравнения (8), поэтому производную функции Y по времени можно представить в виде

$$\frac{dY}{dt} = \sum_i \frac{\partial Y}{\partial C_i} \frac{dC_i}{dt} = \sum_i \frac{\partial Y}{\partial C_i} F_i(\{C_i\}). \tag{11}$$

Теорема Ляпунова утверждает, что состояние равновесия является аттрактором, если производная dY/dt функции Y по времени имеет знак, противоположный знаку функции Y (в нашем примере производная dY/dt должна быть отрицательной).

Геометрический смысл этого условия очевиден (рис. 2). Второе начало термодинамики позволяет утверждать, что для изолированных систем функция Ляпунова существует и термодинамическое равновесие является аттрактором для неравновесных состояний. Это важное обстоятельство можно проиллюстрировать на примере одной простой задачи, связанной с теплопроводностью. Изменение температуры T^0 со временем описывается классическим уравнением Фурье

$$\frac{\partial T^0}{\partial t} = \kappa \frac{\partial^2 T^0}{\partial c^2}, \tag{12}$$

где κ – теплопроводность ($\kappa > 0$). Функция Ляпунова для этой задачи вычисляется без труда. В качестве нее можно взять, например, функцию

$$\Theta(T^0) = \int \left(\frac{\partial T^0}{\partial c} \right)^2 dc. \tag{13}$$

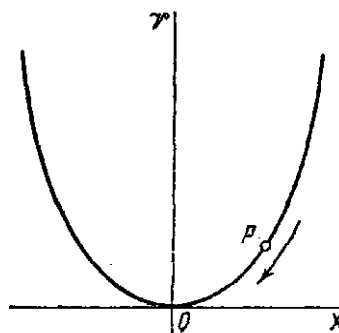


Рис. 2. Понятие асимптотической устойчивости: если возмущение вынуждает систему перейти в точку P , то система, эволюционируя в ответ, возвращается в положение равновесия – точку O

Нетрудно проверить, что при определенным образом заданных граничных условиях

$$\frac{d\Theta}{dt} = -2\kappa \int \left(\frac{\partial^2 T^0}{\partial c^2} \right)^2 dc \leq 0 \quad (14)$$

и что функция Ляпунова $\Theta(T)$ действительно убывает до своего минимального значения, когда достигается тепловое равновесие. В то же время равномерное распределение температуры является аттрактором для начальных неоднородных распределений температуры [8].

3.2. *Функции Ляпунова в теории термодинамической устойчивости систем.* В п. 3.1 рассмотрены случаи состояния систем, близких к равновесию. Для систем, состояния которых далеки от равновесия, необходима еще одна функция Ляпунова. «Как известно, состояния равновесия изолированных систем устойчивы, если соответствуют максимуму производства энтропии. Подействовав возмущением на систему, находящуюся вблизи равновесного значения $S_{\text{равн}}$, получим

$$S = S_{\text{равн}} + \delta S + \frac{1}{2} \delta^2 S. \quad (15)$$

Но $S_{\text{равн}}$ – максимальное значение функции S , поэтому член первого порядка δS обращается в нуль, и, следовательно, устойчивость определяется знаком члена второго порядка $\delta^2 S$.

Элементарная термодинамика позволяет вычислить это важное выражение в явном виде. Рассмотрим сначала возмущение одной независимой переменной – энергии E .

В этом случае $\delta S = \delta E / T$ и

$$\delta^2 S = \frac{\partial^2 S}{\partial E^2} (\delta E)^2 = \frac{\partial(1/T)}{\partial E} (\delta E)^2 = -c_v \frac{(\delta T)^2}{T^2} < 0 \quad (16)$$

(мы воспользовались здесь тем, что удельная теплопроводность при постоянном объеме определяется, как приведено ниже, и положительна):

$$C_v = \left(\frac{\partial E}{\partial T} \right)_v. \quad (17)$$

Обобщая, можно сказать, что, подвергнув все переменные в (7) возмущениям, мы получим квадратичную форму. Приведем лишь результат вычислений (сами вычисления можно найти в [12]):

$$T\delta^2 S = - \left[\frac{c_v}{T} (\delta T)^2 + \frac{\rho}{X} (\delta v)_{N_j}^2 + \sum_{j,j'} \mu_{jj'} \delta N_j \delta N_{j'} \right] < 0, \quad (18)$$

где ρ – плотность, $v = 1/\rho$ – удельный объем (индекс N_j означает, что при вариации N_j состав остается постоянным), X – изотермическая сжимаемость, N_j – мольная доля компоненты j и

$$\mu_{jj'} = \left(\frac{\partial \mu_j}{\partial N_{j'}} \right)_{p,T}. \quad (19)$$

Основные условия устойчивости классической термодинамики подразделяются на следующие:

$$c_v > 0 \text{ (тепловая устойчивость)}, \quad (20)$$

$$X > 0 \text{ (механическая устойчивость)}, \quad (21)$$

$$\sum_{j,j'} \mu_{jj'} \delta N_j \delta N_{j'} > 0 \text{ (устойчивость относительно диффузии)}. \quad (22)$$

Каждое из этих условий имеет простой физический смысл. Например, если бы нарушилось условие (20), то уравнение Фурье приводило бы не к затуханию, а к усилению небольших флуктуаций температуры.

Если условия (20)–(22) выполнены, то $\delta^2 S$ – отрицательно определенная величина. Кроме того, можно показать, что производная от $\delta^2 S$ по времени связана с производством энтропии P соотношением

$$\frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial t} \delta^2 S = \sum_{\rho} J_{\rho} X_{\rho} = P \geq 0, \tag{23}$$

где

$$P \equiv \frac{d_t S}{dt} \geq 0. \tag{24}$$

Из неравенств (18) и (23) следует, что $\delta^2 S$ – функция Ляпунова, и ее существование обеспечивает затухание всех флуктуаций. Именно поэтому для больших систем, находящихся вблизи равновесия, достаточно макроскопического описания. Флуктуации играют второстепенную роль: они появляются как пренебрежимо малые поправки к законам для больших систем...

...Неравенство (18) остается в силе во всех областях применимости макроскопического описания. Однако производная от $\delta^2 S$ по времени оказывается связанной не с полным производством энтропии, как в неравенстве (23), а с производством энтропии, вызванным возмущением, и в этом случае

$$\frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial t} \delta^2 S = \sum_{\rho} \delta J_{\rho} \delta X_{\rho}. \tag{25}$$

Величину в правой части можно назвать избытком производства энтропии. Подчеркнем еще раз, что δJ_{ρ} и δX_{ρ} – отклонения от значений J_{ρ} и X_{ρ} в стационарном состоянии, устойчивость которого мы проверяем с помощью возмущения...

...Если при всех $t \geq t_0$, где t_0 может быть началом возмущения, выполняется неравенство

$$\sum_{\rho} \delta J_{\rho} \delta X_{\rho} \geq 0, \tag{26}$$

то $\delta^2 S$ – функция Ляпунова, и устойчивость обеспечена» [8, с. 96–97].

Далее в работе [8, с. 151–152] предлагается использовать другой подход к выбору вида функции Ляпунова, который содержал бы не только вероятности, но и учитывал бы корреляции между элементами, как это сделано в работах по квантовой механике. При этом постулируется следующее:

$$\Omega = \int \rho^2 dpdq > 0, \tag{27}$$

где интегрирование проводится по фазовому пространству. В квантовой механике эквивалентная величина имела бы следующий вид:

$$\begin{aligned} \Omega = \text{tr} \rho^\dagger \rho &= \sum_{n, n'} \langle n | \rho | n \rangle^\dagger \langle n' | \rho | n \rangle = \sum_n |\langle n | \rho | n \rangle|^2 + \sum_{n \neq n'} |\langle n | \rho | n' \rangle|^2 = \\ &= \Sigma(\text{диагональные члены})^2 + \Sigma(\text{внедиагональные члены})^2, \end{aligned} \tag{28}$$

причем

$$\text{tr} \rho = \sum_n \langle n | \rho | n \rangle = 1. \tag{29}$$

Однако недостатком функций (27) и (28) является отсутствие зависимости от времени. Поэтому в работе [8, с.154] в качестве функции Ляпунова предлагается величина Ω более общего вида

$$\Omega = \int \rho(t) M \rho(t) dpdq \geq 0, \tag{30}$$

где

$$M \geq 0. \tag{31}$$

Принимая (30) за функцию Ляпунова, мы предполагаем, что производная от M по времени D отрицательна (или равна нулю):

$$dM / dt = D \leq 0. \tag{32}$$

Преобразуем (32) к виду

$$\frac{dM}{dt} \equiv iLM . \tag{33}$$

Теперь уже нетрудно показать, что условие (32) может быть удовлетворено только в том случае, если $D = 0$ всюду, но тогда Ω – не функция Ляпунова, если M зависит от координат и импульсов.

Итак, приходим к выводу: микроскопическая энтропия (или функционал Ляпунова) не может быть обычной функцией фазовых переменных. Если она вообще существует, то должна быть оператором, т.е. «это наводит на мысль рассмотреть функционал Ляпунова вида (30), но с величиной M , определяемой как оператор микроскопической энтропии, *не коммутирующий* с оператором Лиувилля L . Коммутатор

$$-i(LM - ML) = D \leq 0 \tag{34}$$

в этом случае задает «производство микроскопической энтропии». Но такой подход приводит к новой форме дополнителности...

...Каков смысл оператора M ? Прежде всего, M означает, что существуют дополнительные свойства, *не включаемые* в динамическое описание. Даже если нам известны собственные функции и собственные значения оператора L , мы не можем приписать M вполне определенное значение. Такие свойства дополнителности могут проистекать только из того или иного типа стохастичности движения... Точный смысл сказанному придаст более тонкая классификация систем на «внутренне случайные», допускающие отображение на цепь Маркова, и «внутренне необратимые», приводящие к внутреннему различию между прошлым и будущим... Можно пойти еще дальше и сопоставить системе новый тип времени – оператор времени T , тесно связанный с оператором M . Так как T – оператор, он имеет собственные значения, каждое из которых задает возможный возраст системы. Любое заданное начальное распределение p обычно может быть разложено в сумму членов, различных по возрасту и типу эволюции» [8, с. 156–158].

4. Предложения к методике последовательности расчетов показателей долговечности с учетом роли оператора энтропии M и функций Ляпунова

Исходя из материала статьи, изложенного в пунктах 1–3, можно резюмировать следующую обобщенную методику анализа оператора энтропии M , показанную в табл. 3.

Таблица 3

Методика расчетов показателей долговечности с учетом оператора энтропии M и функций Ляпунова

1	Постановка задачи
2	Выбор вида необратимых процессов, протекающих в элементах, подсистемах и системе в целом
3	Характеристики изменения показателей необратимых процессов во времени
4	Макроскопические уравнения связи параметров необратимых процессов и показателей долговечности
5	Выбор вида и параметров функций Ляпунова
6	Статистические модели необратимых процессов изделий систем
7	Определение собственных функций и собственных значений операторов M и функций Ляпунова
8	Определение влияния параметров собственных функций и собственных значений на эволюцию возраста изделий системы
9	Расчет ресурса, срока службы и их остаточных значений в модусах времени «прошлое–настоящее–будущее»
10	Рекомендации по выработке ресурса и срок службы в процессе применения системы

Заключение

1. Показано, что для решения задач оценки времени в модусах «прошлое–настоящее–будущее» в теории долговечности СФСС необходим комплексный подход с учетом оператора энтропии M , функций времени Ляпунова, методов и моделей современного функционального анализа и теории случайных процессов.

2. Так как изменчивость скорости времени описывается моделями макроскопической термодинамики необратимых процессов, в статье детально описаны основные математические модели не-

обратимых физико-химических процессов, приводящих к утрате работоспособности оборудования СФСС, на примере изделий ядерных энергетических установок.

3. Показано, что большинство необратимых физико-химических процессов в оборудовании СФСС описывается моделями показательных функций различной сложности.

4. Доказано, что для необратимых процессов динамических систем характерно хаотическое разбегание траекторий, которое описывается функцией $\exp(t/\tau_c)$, где $1/\tau_c$ – для хаотических систем по определению положительная величина. Такой режим носит название хаотического. При этом под хаосом понимается такое поведение системы, при котором первоначально сколь угодно близкие траектории экспоненциально разбегаются со временем. Для хаотических динамических систем понятие траектории утрачивает смысл через некоторое время τ_c – время Ляпунова.

5. Показано, что необратимые процессы в соответствии со вторым началом термодинамики имеют положительное возрастание энтропии и одностороннее направление времени.

6. Микроскопическая энтропия (или функционал Ляпунова) не может быть обычной функцией фазовых переменных, а должна быть оператором. Поэтому оператор энтропии M имеет дополнительные свойства и характерен для так называемых «внутренне случайных» систем, допускающих отображение на цепь Маркова, и «внутренне необратимых», приводящих к внутреннему различию между прошлым и будущим.

7. Предложена в первом варианте методика последовательности расчетов показателей долговечности с учетом роли оператора M и функций Ляпунова.

8. Существуют устойчивые предположения, что оператор энтропии M тесно связан с оператором внутреннего времени T , который имеет собственные значения, каждое из которых задает возможный возраст системы (т.е. ресурс, срок службы и их остаточные значения как показатели долговечности).

Библиографический список

1. Клячкин, В. Н. Статистические методы оценки стабильности функционирования технических систем / В. Н. Клячкин, И. Н. Карпунина // Надежность и качество сложных систем. – 2018. – № 2 (22). – С. 36–42.
2. Михайлов, В. С. Оценка вероятности безотказной работы по результатам испытаний, не давших отказы / В. С. Михайлов // Надежность и качество сложных систем. – 2017. – № 2 (18). – С. 56–60. – DOI 10.21685/2307-4205-2017-2-8.
3. Литвиненко, Р. С. Анализ использования показательного распределения в теории надежности технических систем / Р. С. Литвиненко, Р. Г. Идиятуллин, А. Э. Аухадеев // Надежность и качество сложных систем. – 2016. – № 2 (14). – С. 17–22.
4. Садыхов, Г. С. Интерполяция оценки вероятности безотказного срабатывания объекта при высоких уровнях безотказности / Г. С. Садыхов, А. А. Артохов // Надежность и качество сложных систем. – 2016. – № 1 (13). – С. 15–19.
5. Острейковский, В. А. Математическое моделирование эффекта асимметрии внутреннего времени в теории долговечности структурно и функционально сложных критически важных систем / В. А. Острейковский, Е. Н. Шевченко // Итоги науки. Выпуск 37. Избранные труды Международного симпозиума по фундаментальным и прикладным проблемам науки. – Москва : РАН, 2018. – С. 69–111.
6. Острейковский, В. А. Старение и прогнозирование ресурса оборудования атомных станций / В. А. Острейковский. – Москва : Энергоатомиздат, 1994. – 288 с.
7. Антонов, А. В. Ресурс и срок службы оборудования энергоблоков атомных станций (на примере энергоблоков Смоленской АЭС) / А. В. Антонов, В. А. Острейковский. – Москва : Инновационное машиностроение, 2017. – 536 с.
8. Пригожин, И. От существующего к возникающему: время и сложность в физических науках / И. Пригожин ; под ред. Ю. Л. Климонтовича. – Изд. 2-е, доп. – Москва : Едиториал УРСС, 2002. – 288 с.
9. Острейковский, В. А. Феномен асимметрии времени в теории неустойчивых и необратимых процессов сложных динамических систем : монография / В. А. Острейковский. – Сургут : Печатный мир, 2017. – 268 с. – (Сер. «25 лет СурГУ»)
10. Денисова, Т. Ю. Онтология феномена времени в теории прогнозирования техногенного риска сложных динамических систем : монография / Т. Ю. Денисова, В. А. Острейковский. – Сургут : Печатный мир, 2017. – 253 с. – (Сер. «25 лет СурГУ»)
11. Ляпунов, А. М. Собр. сочинений / А. М. Ляпунов. – Москва ; Ленинград, 1956. – Т. 2. – 263 с.
12. Гленсдорф, П. Термодинамическая теория структуры, устойчивости и флуктуаций / П. Гленсдорф, И. Пригожин. – Москва : Мир, 1973. – 280 с.

13. Муравьев, И. И. Модели оценки фактора времени в теории техногенного риска динамических систем / И. И. Муравьев, В. А. Острейковский, Е. Н. Шевченко // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2015. – Т. I. – С. 24–27.
14. Острейковский, В. А. Феномен «время» в теории прогнозирования техногенного риска сложных динамических систем / В. А. Острейковский, Е. Н. Шевченко // Надежность и качество сложных систем. – 2016. – № 4. – С. 3–12.

References

1. Klyachkin V. N., Karpunina I. N. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system* [Reliability and quality of complex systems]. 2018, no. 2 (22), pp. 36–42. [In Russian]
2. Mikhaylov V. S. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system* [Reliability and quality of complex systems]. 2017, no. 2 (18), pp. 56–60. DOI 10.21685/2307-4205-2017-2-8. [In Russian]
3. Litvinenko R. S., Idiyatullin R. G., Aukhadeev A. E. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system* [Reliability and quality of complex systems]. 2016, no. 2 (14), pp. 17–22. [In Russian]
4. Sadykhov G. S., Artyukhov A. A. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system* [Reliability and quality of complex systems]. 2016, no. 1 (13), pp. 15–19. [In Russian]
5. Ostreykovskiy V. A., Shevchenko E. N. *Itogi nauki. Vypusk 37. Izbrannye trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma po fundamental'nyim i prikladnym problemam nauki* [Results of science. Issue 37. Selected proceedings of the International Symposium on fundamental and applied problems of science]. Moscow: RAN, 2018, pp. 69–111. [In Russian]
6. Ostreykovskiy V. A. *Starenie i prognozirovanie resursa oborudovaniya atomnykh stantsiy* [Aging and forecasting of equipment life of nuclear power plants]. Moscow: Energoatomizdat, 1994, 288 p. [In Russian]
7. Antonov A. V., Ostreykovskiy V. A. *Resurs i srok sluzhby oborudovaniya energoblokov atomnykh stantsiy (na primere energoblokov Smolenskoj AES)* [Resource and service life of nuclear power plant units equipment (on the example of Smolensk NPP units)]. Moscow: Innovatsionnoe mashinostroenie, 2017, 536 p. [In Russian]
8. Prigozhin I. *Ot sushchestvuyushchego k voznikayushchemu: vremya i slozhnost' v fizicheskikh naukakh* [From existing to emerging: time and complexity in the physical Sciences]. 2nd ed, suppl. Moscow: Editorial URSS, 2002, 288 p. [In Russian]
9. Ostreykovskiy V. A. *Fenomen asimmetrii vremeni v teorii neustoychivykh i neobratimyykh protsessov slozhnykh dinamicheskikh sistem: monografiya* [The phenomenon of time asymmetry in the theory of unstable and irreversible processes of complex dynamic systems: monograph]. Surgut: Pechatnyy mir, 2017, 268 p. [In Russian]
10. Denisova T. Yu., Ostreykovskiy V. A. *Ontologiya fenomena vremeni v teorii prognozirovaniya tekhnogennogo riska slozhnykh dinamicheskikh sistem: monografiya* [Ontology of time phenomenon in the theory of technogenic risk prediction of complex dynamic systems: monograph]. Surgut: Pechatnyy mir, 2017, 253 p. [In Russian]
11. Lyapunov A. M. *Sobr. sochineniy* [Coll. compositions]. Moscow; Leningrad, 1956, vol. 2, 263 p. [In Russian]
12. Glensdorf P., Prigozhin I. *Termodinamicheskaya teoriya struktury, ustoychivosti i fluktuatsiy* [Thermodynamic theory of structure, stability and fluctuations]. Moscow: Mir, 1973, 280 p. [In Russian]
13. Murav'ev I. I., Ostreykovskiy V. A., Shevchenko E. N. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality]. 2015, vol. I, pp. 24–27. [In Russian]
14. Ostreykovskiy V. A., Shevchenko E. N. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system* [Reliability and quality of complex systems]. 2016, no. 4, pp. 3–12. [In Russian]

Острейковский Владислав Алексеевич

доктор технических наук, профессор,
кафедра информатики и вычислительной техники,
Сургутский государственный университет
(628412, Россия, г. Сургут, проспект Ленина, 1)
E-mail: ostreykovsky_va@surgu.ru

Шевченко Елена Николаевна

кандидат физико-математических наук, доцент,
кафедра информатики и вычислительной техники,
Сургутский государственный университет
(628412, Россия, г. Сургут, проспект Ленина, 1)
E-mail: elenan_27@mail.ru

Ostreykovsky Vladislav Alekseevich

doctor of technical sciences, professor,
sub-department of informatics and computer science,
Surgut State University
(628412, 1 Lenin avenue, Surgut, Russia)

Shevchenko Elena Nikolaevna

candidate of physical and mathematical sciences,
associate professor,
sub-department of informatics and computer science,
Surgut State University
(628412, 1 Lenin avenue, Surgut, Russia)

Образец цитирования:

Острейковский, В. А. О роли оператора энтропии при оценке и анализе показателей долговечности сложных технических динамических систем / В. А. Острейковский, Е. Н. Шевченко // Надежность и качество сложных систем. – 2019. – № 3 (27). – С. 3–16. – DOI 10.21685/2307-4205-2019-3-1.

В. А. Березнев, А. И. Дивеев

МЕТОД РЕДУКЦИИ ПРОСТРАНСТВА СОСТОЯНИЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ¹

V. A. Bereznev, A. I. Diveev

STATE SPACE REDUCTION METHOD FOR OPTIMAL CONTROL PROBLEM

Аннотация. Рассматривается задача оптимального управления с фазовыми ограничениями. Для решения задачи используется метод редукции пространства состояний. Метод состоит в том, чтобы уменьшить размерность пространства состояний объекта управления. Для этой цели часть компонент вектора состояний заменяется функциями времени из предположения об оптимальном поведении этих компонент и их физических свойствах. В результате получаем модель объекта управления в виде системы обыкновенных дифференциальных уравнений меньшего порядка и кусочно-функциональные уравнения с неизвестными параметрами для остальных компонент вектора состояний. Далее формулируем новую задачу оптимального управления в пространстве состояний меньшей размерности. При решении новой задачи оптимального управления некоторые компоненты вектора управления находим из формы функций исключенной части компонент вектора пространства состояний. В качестве примера рассмотрена задача оптимального управления мобильным роботом, движущимся на плоскости с круговыми фазовыми ограничениями. В результате применения метода редукции пространства состояний было сделано предположение, что угол поворота робота на оптимальной траектории принимает либо постоянные значения, либо является линейной функцией времени. Данное предположение позволило трансформировать задачу оптимального управления роботом к задаче оптимального движения точки на плоскости. Известные формы функции изменения угла поворота робота позволили определить класс управлений для одной из компонент вектора управления. В новой задаче оптимального управления отсутствует угол поворота робота, поэтому оптимальная траектория движения точки должна иметь наименьшую длину. Оптимальная траектория движения состоит из кусков прямых отрезков, касательных к круговым ограничениям, и круговых дуг, расположенных на границах ограничений. Для построения оптимальной траектории в новой задаче необходимо определить порядок ограни-

Abstract. The problem of optimum control with phase restrictions is considered. For the solution of a task originally the dimension of the state space decreases at the expense of a hypothesis of behavior of a part of coordinates of a vector of states. As a result we receive a set of equations of a smaller order and the piece-functional the functions equations with unknown parameters for other components of a vector of states. Further we formulate a new problem of optimum control in the state space of a smaller order for which solution we use a hypothesis of behavior of a part of coordinates of the state space. For an example the problem of optimum control of the mobile robot moving on the plane with circular obstacles is considered. As a result of a application of the method the task is transformed to a problem of a movement of a point on the plane which solution is performed by graph theory and geometrical ratios. The computing experiment showed effectiveness of the offered method on value of the used functional. The optimal control problem with phase restrictions is considered. For the solution of the task a state space reduction method is used. The method consists in reducing dimension of states' space for control object. For this purpose a part the component of a vector of states is replaced function of time from the assumption of optimum behavior of these a component and their physical properties. As a result we receive model of an object of management in the form of the system of the ordinary differential equations of a smaller order and the piecewise and functional equations with unknown parameters for the others a component of a states' vector. Further a new problem of optimum control in space of states smaller dimension is formulated. At the solution of the new optimal control problem some components of a control vector are found from a form of functions for the excluded part of the states' space vector. As an example the optimal control problem of the mobile robot moving on the plane with circular phase restrictions is considered. As a result of application of the state space reduction method the assumption was made that the angle of rotation of the robot on an optimum trajectory accepts or constant values, or is linear function of time. This assumption

¹ Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект 18-29-03061мк).

чений, по границам которых должна пройти оптимальная траектория. Для решения этой подзадачи фазовые ограничения рассматриваются как вершины графа и при этом используется алгоритм Дейкстры поиска кратчайшего пути на графе. В результате используемых методов было получено значение функционала в два раза меньше, чем для решения, полученного эволюционным алгоритмом.

Ключевые слова: задача оптимального управления, теория графов, задача о кратчайшем пути, управление мобильным роботом.

allowed to transform the optimal control problem of the robot to a problem of the optimal movement of a point on the plane. Known forms of function for change of a rotation angle of the robot allowed to define a class of control for a component of a control vector. In a new optimal control problem there is no angle of rotation of the robot therefore the optimal trajectory of the movement of a point has to have the smallest length. The optimal trajectory of the movement consists of pieces of direct pieces, tangents to circular restrictions, and the circular arches located on borders of restrictions. For creation of an optimum trajectory in the new task it is necessary to define an order of restrictions on which borders there has to pass the optimal trajectory. For the solution of this subtask a set of phase restrictions are considered as top of the count and Dijkstra's algorithm of search of the shortest way on the column is used. As a result of the used methods the value of functional twice smaller, than for the solution that was received by an evolutionary algorithm.

Keywords: optimal control problem, graph theory, shortest path problem, control for mobile robot.

Задача оптимального управления [1], несмотря на долгую историю, является одной из сложнейших математических задач, для которой не создано универсального вычислительного метода. Попытки создать вычислительный метод на основе методов нелинейного программирования [2, 3] не увенчались успехом как для прямого подхода, основанного на непосредственном поиске функции оптимального управления, так и для решения краевой задачи или непрямого подхода, использующего принцип максимума Понтрягина [1]. На отсутствие универсального вычислительного метода для задачи оптимального управления указывает хотя бы тот факт, что такого метода нет в известных математических пакетах MatLab [4], Mathematica [5], Maple [6].

В подавляющем большинстве случаев сегодня превалирует тенденция редукции задачи оптимального управления к задаче нелинейного программирования [7] и попытка ее решения каким-либо эффективным численным методом оптимизации. По-видимому, основная причина неудач построения универсального численного метода для решения задачи оптимального управления заключается в том, что функционал задачи не всегда отвечает требованиям унимодальности и выпуклости на пространстве искомых параметров, а большинство классических численных методов нелинейного программирования требует именно таких свойств целевой функции. Строгих методов исследования унимодальности интегрального функционала в задаче оптимального управления пока не создано, но, например, в работе [8] показано, что в задаче оптимального управления с фазовыми ограничениями целевой функционал имеет более одного локального минимума. Следовательно, скорее всего универсальный численный метод решения задачи оптимального управления должен быть построен на основе методов глобальной оптимизации. Здесь следует отметить, что точное решение задачи глобальной оптимизации [9] возможно только для задач небольшой размерности из-за необходимой процедуры перебора областей поиска решения. В задаче оптимального управления, например при прямом подходе, размерность пространства искомых параметров пропорциональна количеству интервалов разбиения оси времени. Чем больше интервалов, тем точнее аппроксимация функции оптимального управления. Следовательно, точные методы решения задач глобальной оптимизации для задачи оптимального управления в большинстве случаев не применимы. Необходимо использовать методы случайного поиска [10] или эволюционные алгоритмы [11]. В работе [12] приведены результаты вычислительного эксперимента по сравнению градиентных численных методов и эволюционных алгоритмов для решения задачи оптимального управления мобильным роботом с фазовыми ограничениями. Результаты работы показывают очевидное преимущество эволюционных алгоритмов при решении этой задачи.

Поскольку решения, найденные эволюционными алгоритмами, не являются в строгом смысле решением задачи оптимального управления и применение их целесообразности определяется лишь значением найденного функционала, то очевидно, что в данном случае возможно использование и

других подходов, направленных на трансформацию исходной задачи к некоторой другой задаче, решение которой также не является строго оптимальным, но может давать приемлимые значения функционала. В настоящей работе представлен один из таких методов, основанный на уменьшении размерности пространства состояний.

Рассмотрим традиционную постановку задачи управления с фазовыми ограничениями. Процесс управления в такой постановке описывается дифференциальным уравнением

$$\dot{x}(t) = f(x, u), \quad (1)$$

где $x(t) \in \mathbb{R}_n$ – вектор состояния; $u(t) \in \mathbb{R}_m$ – вектор управления, причем на управление $u(t)$ заданы естественные ограничения

$$u^- \leq u(t) \leq u^+, \quad (2)$$

где $u^-, u^+ \in \mathbb{R}_m$, а для вектора состояния заданы начальное и конечное (терминальное) состояния

$$x(0) = x^0, \quad x(\hat{t}) = \hat{x}. \quad (3)$$

Задан функционал качества

$$J = \int_0^{\hat{t}} f_0(x, u) dt \rightarrow \min. \quad (4)$$

Заданы фазовые ограничения

$$\phi_i(x) \leq 0, \quad i = \overline{1, s}. \quad (5)$$

Необходимо найти оптимальное управление в виде функции времени

$$u = \tilde{u}(t), \quad (6)$$

которое удовлетворяет ограничениям (2) и позволяет решению системы (1) достичь из начального состояния терминальное (3) с оптимальным значением критерия качества (4).

Пусть известно или возможно из особенностей задачи предположить, что часть компонент вектора состояний представляет собой известные до значений параметров функции времени, тогда можно уменьшить размерность вектора состояний и получить новую задачу оптимального управления меньшей размерности

$$\dot{x}^1(t) = f(x^1, x^2(t, q), u), \quad (7)$$

где $x = [x^1 : x^2]^T$, $x^1 \in R_{n_1}$, $x^2 \in R_{n_2}$, q – вектор постоянных параметров

$$q = [q^1 \dots q^p]^T. \quad (8)$$

Теперь необходимо найти оптимальное управление (6) и вектор постоянных параметров (8), но уже для задачи меньшей размерности $n_1 < n$.

Рассмотрим пример решения задачи оптимального управления мобильным роботом на плоскости [13]. Математическая модель объекта управления имеет следующий вид:

$$\dot{x}_1 = u_1 \cos x_3, \quad \dot{x}_2 = u_1 \sin x_3, \quad \dot{x}_3 = u_2. \quad (9)$$

Для модели заданы начальные и терминальные условия (3).

Заданы круговые фазовые ограничения

$$r_i^2 - (x_{1,i}^* - x_1)^2 - (x_{2,i}^* - x_2)^2 \leq 0, \quad i = \overline{1, s}, \quad (10)$$

где r_i – радиус ограничения i ; $x_{1,i}^*$, $x_{2,i}^*$ – координаты центра ограничения i .

Задан функционал качества управления

$$J = t_f \rightarrow \min. \quad (11)$$

Предположим, что компонента x_3 , угол направления робота на оптимальной траектории либо не меняется, либо меняется линейно во времени:

$$\tilde{x}_3(t) = \begin{cases} q_{4i-3}t, & \text{если } q_{4(i-1)} \leq t < q_{4i-2}, i = \overline{1, L}, \\ q_{4i-1}, & \text{если } q_{4i-2} \leq t < q_{4i} \end{cases} \quad (12)$$

где $q_0 = 0$.

Тогда получаем следующую систему уравнения движения точки на плоскости

$$\dot{x}_1 = u_1 \cos \tilde{x}_3(t), \quad \dot{x}_2 = u_1 \sin \tilde{x}_3(t). \quad (13)$$

Вместе с управлением u_1 необходимо еще найти компоненты вектора параметров

$$q = [q_1 \dots q_{4L}]^T, \quad (14)$$

которые определяют интервалы времени и чередующиеся по интервалам времени скорости изменения компоненты x_3 и ее постоянные значения.

Рассмотрим теперь плоскую задачу, когда $x(t) \in R_2$. В этом случае круговые препятствия задаются координатами в R_2 центров кругов c^j и их радиусами $r_j, j = \overline{1, s}$. Таким образом, фазовые ограничения принимают вид

$$Px(t) - c^j, \quad j = \overline{1, s}. \quad (15)$$

Задача заключается в таком выборе $u(t)$, при котором \hat{t} принимает минимальное значение и выполнено условие

$$Px(t) - \hat{x}P \leq \varepsilon, \quad (16)$$

где $\varepsilon > 0$ – некоторое заданное малое число.

При практическом решении задачи помимо задания конкретных значений $f(x, u)$ и параметров условий (13)–(16) требуется выбрать класс функций, из которого выбирается управление $u(t)$. Решая конкретно задачу управления мобильным роботом, в качестве управления естественно рассматривать линейную скорость движения робота и выбирать ее из класса непрерывных кусочно-линейных функций. Вторым параметром управления обычно принято считать положение руля или колес робота. Мы вернемся к обсуждению этого вопроса позже. Исходя из объективных технических характеристик любого робота, естественно считать производную кусочно-линейной функции управления ограниченной. т.е. $|u'(t)| \leq \delta$ для любого t . Это понятно, так как и ускорение при наборе устройством скорости до некоторой максимально возможной u^+ и отрицательное ускорение (торможение) в естественных условиях ограничены. Мы будем считать их постоянными и обозначать ускорение через ω^+ , а торможение – через ω^- .

Представив задачу в традиционной постановке (13) – (16), попытаемся сформулировать ее в некоторой альтернативной форме. Действительно, задача об оптимальном быстродействии при наличии фазовых ограничений имеет много общего с задачей поиска кратчайшего пути на графе. В связи с этим напомним основные определения теории графов.

Формальное определение графа таково: задано конечное множество X , состоящее из n элементов $X = x^1, \dots, x^n$, называемых *вершинами* графа, и подмножество $V \subset X \times X$, называемое множеством *дуг* или *ребер*. Тогда *графом* G называется совокупность (X, V) . Дугу между вершинами i и j ($i, j \in X$) будем обозначать через v^{ij} , т.е. $V = \{v^{ij}\}$. *Нагруженным графом* $G(X, V)$ называется граф, каждому ребру которого поставлено в соответствие некоторое число, называемое *весом*. Нагруженный граф может быть задан матрицей смежности T , для которой элемент t_{ij} равен весу ребра v^{ij} . Если ребро v^{ij} отсутствует, то полагаем $t_{ij} = \infty$.

Кратчайшим путем $L(x^i, x^j)$ на нагруженном графе называется последовательность вершин с наименьшим суммарным весом соединяющих их ребер. Наша задача заключается в нахождении $L(x^1, x^n)$.

Проиллюстрируем все эти понятия на простом примере, предложенном в [13], сделав предварительное преобразование координат. Расположим ось абсцисс вдоль прямой, соединяющей x^0 и \hat{x} , и поместим начало координат в точку x^0 (рис. 1). В качестве вершин графа возьмем $x^1 = x^0$, $x^n = \hat{x}$, а также точки круговых препятствий с минимальной и максимальной ординатами, как показано на рис 1.

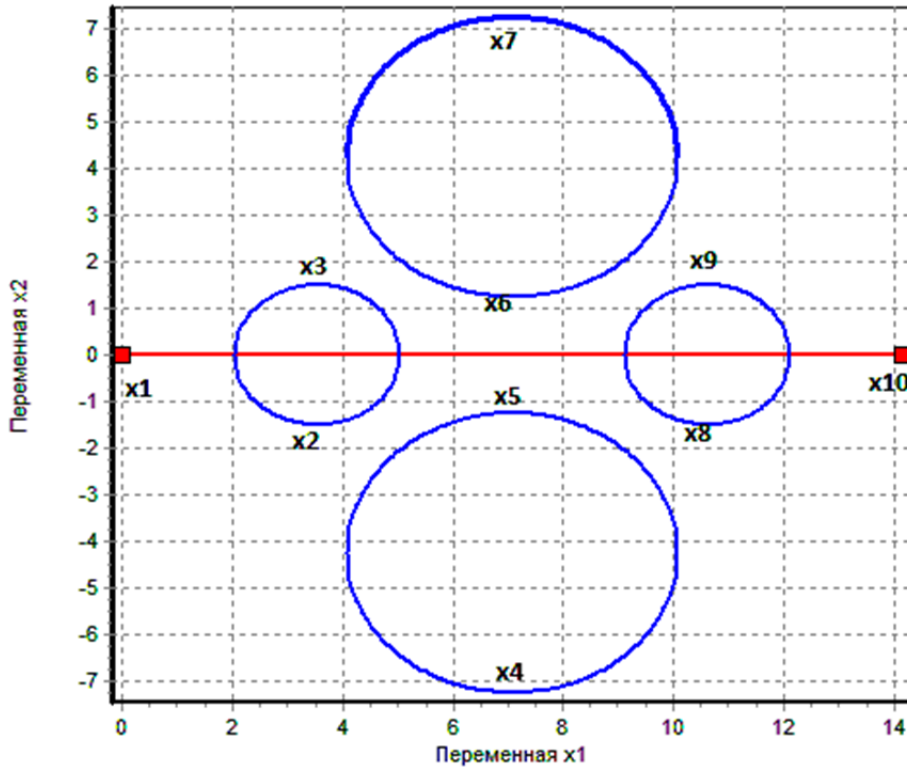


Рис. 1. Вершины графа $G(X, V)$

При построении матрицы смежности будем исходить из следующих ограничений:

- дуга между вершинами x^i и x^j отсутствует, т.е. $t_{ij} = \infty$, если вершины принадлежат одному и тому же круговому препятствию;
- для любой дуги v^{ij} выполняется условие $i < j$, т.е. граф считается ориентированным;
- любая дуга v^{ij} представляет собой гладкую кривую, соединяющую вершины x^i и x^j ;
- дуга v^{ij} считается отсутствующей, если она содержит точки круга, которому не принадлежат вершины x^i и x^j .

В качестве веса $t_{ij} \neq \infty$ дуги v^{ij} принимается минимальное время перемещения робота из x^i в x^j с учетом того, что по криволинейному участку дуги робот может двигаться с минимальной скоростью u^- , а изменение скорости происходит с ускорениями ω^+ и ω^- , представляя собой непрерывную кусочно-линейную функцию. Вычисление t_{ij} при этих условиях не представляет труда.

Действительно, пусть требуется вычислить время t_{ij} перехода от вершины x^i к вершине x^j , причем $i = 1 \quad j \neq n$. Вычислим координаты точки z на окружности с центром c^s и радиусом r_s , которой принадлежит вершина x^j . Из условия гладкости перехода от движения по прямолинейному участку $[x^i, z]$ к движению по дуге окружности $[z, x^j]$ точка z является решением системы уравнений

$$\begin{cases} \langle z - x^j, z - c^s \rangle; \\ Pz - c^s P^2 = r_s^2; \\ \frac{z_1}{z_2} = \frac{c_1^s - z_1}{r_s - |x_2^j - x_2|}. \end{cases} \quad (17)$$

Движение по прямолинейному участку $[x^j, z]$ состоит из двух или трех составляющих в зависимости от длины этого участка $l_1 = Px^j - zP$. Сначала робот разгоняется до максимальной скорости u^+ с ускорением ω^+ , затем движется с постоянной скоростью u^+ и, наконец, c тормозит с ускорением ω^- , начиная с такого момента, чтобы в точке z скорость была равна u^- . Вычислим время, за которое робот разгонится до некоторой скорости \hat{u} в предположении, что ограничение сверху на допустимую скорость u^+ отсутствует. Обозначим его через $\hat{\tau}_1$, а через $\hat{\tau}_2$ – время торможения со скорости \hat{u} до u^- . Легко проверить, что $\hat{\tau}_1$ и $\hat{\tau}_2$ являются решением системы уравнений

$$\begin{cases} \hat{\tau}_1 \omega^+ - \hat{\tau}_2 \omega^- = u^-; \\ \hat{\tau}_1^2 \omega^+ - \hat{\tau}_2^2 \omega^- = 2l_1. \end{cases}$$

Если при этом $\hat{u} = \tau_1 \omega^+ \leq u^+$, то время прохождения роботом прямолинейного участка равно $t_1 = \tau_1 + \tau_2$. В противном случае $t_1 = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3$, где

$$\begin{aligned} \tau_1 &= u^+ / \omega^+, \\ \tau_2 &= (u^+ - u^-) / \omega^-, \\ \tau_3 &= (2l_1 - \tau_1^2 \omega^+ - \tau_2^2 \omega^-) / 2u^+. \end{aligned}$$

Движение по дуге $[z, x^j]$, длина которой равна $l_s = r_s(z_2 / z_1)$, по условию осуществляется с постоянной скоростью u^- . Следовательно, время, затраченное на перемещение по этому участку, равно $t_2 = l_2 / u^-$. Таким образом, $t_{ij} = t_1 + t_2$.

Вычисление t_{ij} , когда $i \neq 1$ и $j = n$, происходит по аналогичным формулам за исключением незначительных нюансов. Если $i \neq 1$ и $j \neq n$, то система, подобная (17), зависит от двух переменных z_1 и z_2 , являющихся точками общей касательной к окружностям, содержащим вершины графа x^i и x^j . Однако решение этой системы также не составляет труда.

Для построения минимального пути $L(x^1, x^n)$ на графе $G(X, V)$ существует ряд алгоритмов. Приведем один из них, обозначив через I множество индексов всех вершин графа, через I^+ – множество индексов помеченных вершин, а через $I^- = I \setminus I^+$ – множество индексов непомеченных вершин.

Алгоритм. (Е. Дейкстра [14])

Шаг 1. Положить $k = 0$, $s = 1$, $\lambda_0(x^s) = 0$, $I^+ = \{1\}$, $\lambda_0(x^s) = \infty$ для $i \in I^-$.

Шаг 2. Положить $k = k + 1$. Если $I^- = \emptyset$, то перейти к шагу 4. В противном случае положить

$$\lambda_k(x^p) = \min\{\lambda_{k-1}(x^p), \lambda_{k-1}(x^s) + t_{sp}\}, t_{sp} < \infty, p \in I^-,$$

$$\lambda_k(x^j) = \lambda_{k-1}(x^j), j \in I^-, j \neq p.$$

Шаг 3. Если $\lambda_k(x^j) = \infty$ для всех $j \in I^-$, то перейти к шагу 4. В противном случае выбрать s из условия $\lambda_k(x^s) = \min_{j \in I^-} \lambda_k(x^j)$. Положить $I^+ = I^+ \cup \{s\}$ и перейти к шагу 2.

Шаг 4. Построить последовательность индексов вершин, отвечающих минимальному пути, при этом вершина x^q , предшествующая вершине x^n , определяется из соотношения

$$\lambda_k(x^q) + t_{qn} = \lambda_k(x^n).$$

Затем определяется вершина, предшествующая вершине x^q , и т.д. до вершины x^1 .

Корректность алгоритма доказывается индукцией по номеру итерации, а вычислительная сложность алгоритма оказывается квадратичной (см. [14, 15]).

На рис. 2 показан минимальный путь, полученный алгоритмом Дейкстры для примера из работы [13] при $u^- = 1,4$, $u^+ = 10,0$, $\omega^+ = 80,0$, $\omega^- = -150,0$.

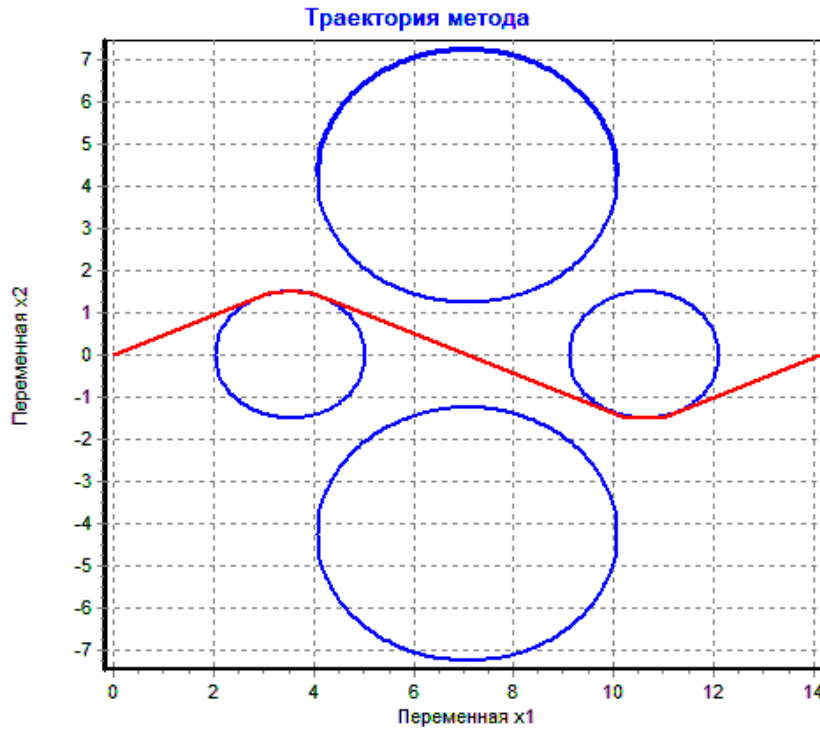


Рис. 2. Траектория метода

Время прохождения роботом пути $L(x^1, x^n)$ составило $\hat{t} = 1,8287$, что более чем в два раза превосходит результаты, приведенные в работе [13].

На рис. 3 приведен график линейной скорости робота на протяжении минимального пути. Очевидно, что положение руля или колес технического устройства должно меняться при переходе от прямолинейного движения к движению по окружности, и наоборот. Важно также отметить, что увеличение скорости прохождения криволинейных участков трассы до значения $u^- = 2,0$ приводит к изменению траектории движения и, что естественно, к уменьшению значения \hat{t} .



Рис. 3. График скорости на трассе

Библиографический список

1. Понтрягин, Л. С. Математическая теория оптимальных процессов / Л. С. Понтрягин, В. Г. Болтянский, Р. В. Гамкрелидзе, Е. Ф. Мищенко. – Москва : Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1983. – 322 с.
2. Федоренко, Р. П. Приближенное решение задач оптимального управления / Р. П. Федоренко. – Москва : Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1978. – 488 с.
3. Грачев, Н. И. Библиотека программ для решения задач оптимального управления / Н. И. Грачев, Ю. Г. Евтушенко // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 1979. – Т. 19, № 2. – С. 367–387.
4. Дьяконов, В. П. MATLAB 6/6.1/6.5 + Simulink 4/5. Основы применения. Полное руководство пользователя / В. П. Дьяконов. – Москва : СОЛОН-Пресс, 2002. – 768 с.
5. Дьяконов, В. П. Mathematica 5/6/7. Полное руководство / В. П. Дьяконов. – Москва : ДМК Пресс, 2009. – 624 с.
6. Дьяконов, В. П. Maple 7 : учеб. курс / В. П. Дьяконов. – Санкт-Петербург : Питер, 2002. – 672 с.
7. Евтушенко, Ю. Г. Оптимизация и быстрое автоматическое дифференцирование / Ю. Г. Евтушенко. – Москва : ВЦ РАН, 2013. – 144 с.
8. Дивеев, А. И. Условия отсутствия свойств унимодальности функционала в задаче оптимального управления с фазовыми ограничениями / А. И. Дивеев // Cloud of Science. – 2018. – Т. 56, № 2. – С. 268–285.
9. Евтушенко, Ю. Г. Метод неравномерных покрытий / Ю. Г. Евтушенко, М. А. Посыпкин // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 2013. – Т. 63, № 2. – С. 144–157.
10. Стронгин, Р. Г. Численные методы в многоэкстремальных задачах (информационно-статистические алгоритмы) / Р. Г. Стронгин. – Москва : Наука, 1978. – 240 с.
11. Карпенко, А. П. Современные алгоритмы поисковой оптимизации. Алгоритмы, вдохновленные природой / А. П. Карпенко. – Москва : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. – 446 с.
12. Дивеев, А. И. Исследование практической сходимости эволюционных алгоритмов оптимального программного управления колесным роботом / А. И. Дивеев, С. В. Константинов // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2018. – № 4. – С. 80–106.
13. Дивеев, А. И. Эволюционные алгоритмы для решения задачи оптимального управления / А. И. Дивеев, С. В. Константинов // Вестник Российского университета дружбы народов. Инженерные исследования. – 2017. – Т. 18, № 2. – С. 254–265.
14. Dijkstra, E. W. A note on two problems in connection with graphs / E. W. Dijkstra // Numer. Math. Springer Science + Business media. – 1959. – Vol. 1, № 1. – P. 269–271.
15. Кормен, Т. Алгоритмы. Построение и анализ / Т. Кормен, Ч. Лейзерсон, Р. Ривест, К. Штайн. – Москва : Вильямс, 2013. – 1328 с.

References

1. Pontryagin L. S., Boltyanskiy V. G., Gamkrelidze R. V., Mishchenko E. F. *Matematicheskaya teoriya optimal'nykh protsessov* [Mathematical theory of optimal processes]. Moscow: Nauka, Glavnaya redaktsiya fiziko-matematicheskoy literatury, 1983, 322 p. [In Russian]
2. Fedorenko R. P. *Priblizhennoe reshenie zadach optimal'nogo upravleniya* [Approximate solution of optimal control problems]. Moscow: Nauka, Glavnaya redaktsiya fiziko-matematicheskoy literatury, 1978, 488 p. [In Russian]
3. Grachev N. I., Evtushenko Yu. G. *Zhurnal vychislitel'noy matematiki i matematicheskoy fiziki* [Journal of computational mathematics and mathematical physics]. 1979, vol. 19, no. 2, pp. 367–387. [In Russian]
4. D'yakonov V. P. *MATLAB 6/6.1/6.5 + Simulink 4/5. Osnovy primeneniya. Polnoe rukovodstvo pol'zovatelya* [MATLAB 6/6.1/6.5 + 4/5 Simulink. Basics of application. Complete user manual]. Moscow: SOLON-Press, 2002, 768 p. [In Russian]
5. D'yakonov V. P. *Mathematica 5/6/7. Polnoe rukovodstvo* [Mathematica 5/6/7. Complete guide]. Moscow: DМК Press, 2009, 624 p. [In Russian]
6. D'yakonov V. P. *Maple 7. Uchebnyy kurs* [Maple 7. Training course]. Saint-Petersburg: Piter, 2002, 672 p. [In Russian]
7. Evtushenko Yu. G. *Optimizatsiya i bystroe avtomaticheskoe differentsirovanie* [Optimization and fast automatic differentiation]. Moscow: VTs RAN, 2013, 144 p. [In Russian]
8. Diveev A. I. *Cloud of Science*. 2018, vol. 56, no. 2, pp. 268–285. [In Russian]
9. Evtushenko Yu. G., Posypkin M. A. *Zhurnal vychislitel'noy matematiki i matematicheskoy fiziki* [Journal of computational mathematics and mathematical physics]. 2013, vol. 63, no. 2, pp. 144–157. [In Russian]
10. Strongin R. G. *Chislennyye metody v mnogoekstremal'nykh zadachakh (informatsionno-statisticheskie algoritmy)* [Numerical methods in multiextremal problems (information and statistical algorithms)]. Moscow: Nauka, 1978, 240 p. [In Russian]

11. Karpenko A. P. *Sovremennye algoritmy poiskovoy optimizatsii. Algoritmy, vdokhnovlennyye prirodoy* [Modern search engine optimization algorithms. Nature-inspired algorithms]. Moscow: Izd-vo MGTU im. N. E. Baumana, 2014, 446 p. [In Russian]
12. Diveev A. I., Konstantinov S. V. *Izvestiya RAN. Teoriya i sistemy upravleniya* [Proceedings of the RAS. Theory and control systems]. 2018, no. 4, pp. 80–106. [In Russian]
13. Diveev A. I., Konstantinov S. V. *Vestnik Rossiyskogo universiteta druzhby narodov, Inzhenernye issledovaniya* [Bulletin of the peoples' friendship University of Russia. Engineering study]. 2017, vol. 18, no. 2, pp. 254–265. [In Russian]
14. Dijkstra E. W. *Numer. Math. Springer Science + Business media*. 1959, vol. 1, no. 1, pp. 269–271.
15. Kormen T., Leyzerson Ch., Rivest R., Shtayn K. *Algoritmy. Postroenie i analiz* [Algorithms. Construction and analysis]. Moscow: Vil'yams, 2013, 1328 p. [In Russian]

Березнев Валентин Александрович

доктор физико-математических наук, профессор,
старший научный сотрудник,
Управление робототехническими устройствами,
Федеральный исследовательский центр
«Информатика и управление»
Российской академии наук
(Вычислительный центр
им. А. А. Дородницына РАН)
(119333, Россия, г. Москва, ул. Вавилова, 40)
E-mail: va_bereznev@mail.ru

Дивеев Асхат Ибрагимович

доктор технических наук,
директор роботцентра
Управления робототехническими устройствами,
Федеральный исследовательский центр
«Информатика и управление»
Российской академии наук
(Вычислительный центр
им. А. А. Дородницына РАН)
(119333, Россия, г. Москва, ул. Вавилова, 40);
профессор департамента механики
и мехатроники Инженерной академии
Российского университета дружбы народов
(115419, Россия, г. Москва, ул. Орджоникидзе, 3)
E-mail: aidiveev@mail.ru

Bereznev Valenty Aleksandrovych

doctor of physical and mathematical sciences, professor,
senior researcher of the robot control center,
Federal research center
«Computer science and control»
of the Russian Academy of Sciences
(Dorodnicyn Computer Center of RAS)
(119333, 40 Vavilov street, Moscow, Russia)

Diveev Askhat Ibragimovich

doctor of technical sciences,
director of the robot control center,
Federal research center
«Computer science and control»
of the Russian Academy of Sciences
(Dorodnicyn Computer Center of RAS)
(119333, 40 Vavilov street, Moscow, Russia);
professor of the department of mechanics
and mechatronics Engineering Academy
Peoples' friendship University of Russia
(115419, 3 Ordzhonikidze street, Moscow, Russia)

Образец цитирования:

Березнев, В. А. Метод редукции пространства состояний для решения задачи оптимального управления / В. А. Березнев, А. И. Дивеев // Надежность и качество сложных систем. – 2019. – № 3 (27). – С. 17–25. – DOI 10.21685/2307-4205-2019-3-2.

В. А. Маклашов, М. Н. Пиганов

МЕТОДИКА УНИФИКАЦИИ СРЕДСТВ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ БОРЬБЫ

V. A. Maklashov, M. N. Piganov

METHOD OF UNIFICATION OF ELECTRONIC WARFARE MEANS

Аннотация. Проведен анализ средств радиоэлектронной борьбы (РЭБ). Рассмотрена архитектура средств РЭБ. Аппаратуру РЭБ предложено разделить на семь функционально законченных частей: приемную, передающую, распределительную, преобразующую, обрабатывающую, формирующую, управляющую. Выполнен анализ статических и динамических связей между составными частями. Рассмотрена аппаратная реализация разных вариантов связей. Приведено пять структурных схем средств РЭБ. Оценено влияние электронной компонентной базы. Предложена унифицированная архитектура средств РЭБ. Показано, что такая архитектура позволяет создавать средства РЭБ различного типа и назначения для любых объектов размещения. Рассмотрены возможности дальнейшей унификации до уровня блока, модуля и узла. Ее следует вести с учетом конкретных требований к аппаратуре. Установлено, что в первую очередь целесообразно подвергнуть унификации те части, которые мало (слабо) зависят от объекта размещения. Предполагается, что использование унифицированной архитектуры и унифицированных модулей позволит разработчикам средств РЭБ уменьшить время проектирования и сконцентрировать свои усилия на разработке наиболее зависимых от объекта размещения частях.

Ключевые слова: архитектура, аппаратура, методика, РЭБ, унификация, модуль, структурная схема, компоненты, функциональная часть.

Abstract. The analysis of electronic warfare (EW) means is made. The architecture of electronic warfare means is considered. EW equipment is proposed to be divided into seven functionally complete parts: receiving, transmitting, distributing, transforming, processing, generating, controlling. The analysis of static and dynamic relations between the components is performed. Hardware implementation of different variants of connections is considered. Five block diagrams of EW means are provided. The influence of the electronic component base is evaluated. The unified architecture of electronic warfare means is proposed. It is shown that this architecture allows the creation of EW means of various types and purposes for any objects of placement. The possibilities of further unification to the level of the block, module and node are considered. It should be carried out taking into account the specific requirements for the equipment. It is proposed that the use of a unified architecture and unified modules will allow developers of electronic warfare means to reduce the design time and concentrate their efforts on the development of the most dependent parts of the object placement.

Keywords: architecture, equipment, technique, EW, unification, module, block diagram, components, functional part.

Введение

Анализ результатов локальных войн и вооруженных конфликтов, в которых участвовали ВС США и ОВС НАТО в последнее десятилетие XX и начале XXI в., в том числе конфликтов в зоне Персидского залива, на Балканах, в Афганистане и Ираке, а также характер направленности оперативной и боевой подготовки коалиционных войск свидетельствуют о том, что радиоэлектронная борьба (РЭБ, или согласно западной терминологии радиоэлектронная война) трансформируется в один из основных элементов современных войн и наиболее значимую силу информационных операций (ИО). РЭБ как основа противоборства с системами боевого управления противника становится неотъемлемой частью вооруженного противостояния любого масштаба [1].

Радиоэлектронная борьба (РЭБ) – разновидность вооруженной борьбы, в ходе которой осуществляется воздействие радиоизлучениями (радиопомехами) на радиоэлектронные средства систем управления, наведения, навигации, связи и разведки противника в целях изменения качества цирку-

лирующей в них военной информации; защита своих систем от аналогичных воздействий, а также изменение условий (свойств среды) распространения радиоволн [2–7].

Помехи воздействуют, главным образом, на приемную часть радиосредств. Для создания радиопомех используются активные и пассивные средства. К активным относятся средства, которые для формирования излучений используют принцип генерирования (например, передатчики, станции помех). Пассивные средства используют принцип отражения (переизлучения) (например, дипольные и уголкового отражатели и др.).

В настоящее время РЭБ представляет собой комплекс согласованных мероприятий и действий войск, которые проводятся в целях снижения эффективности управления войсками и применения оружия противника; обеспечения заданной эффективности управления войсками; применения своих средств поражения.

В ходе РЭБ поражение обеспечивается преднамеренным воздействием различными видами излучений на электронные средства, каналы получения и передачи информации, специальным программно-техническим воздействием на электронно-вычислительные средства противника; свои системы управления, связи и разведки защищаются от аналогичных воздействий противника, а также от непреднамеренных воздействий излучениями, возникающих вследствие совместного применения электронных средств; защита охраняемых сведений осуществляется их скрытием или (и) введением противника в заблуждение относительно их действительного содержания. Объектами РЭБ являются носители информации (поля и волны различной природы, потоки заряженных частиц), среда их распространения и электронные средства и системы. Таким образом, РЭБ является составной частью, технической основой информационной борьбы. Составными частями РЭБ являются радиоэлектронное подавление, защита, разведка и поражение.

Радиоэлектронное подавление – комплекс мероприятий и действий по срыву (нарушению) работы или снижению эффективности боевого применения противником радиоэлектронных систем и средств путем воздействия на их приемные устройства радиоэлектронными помехами. Включает радио-, радиотехническое, оптико-электронное и гидроакустическое подавление. Радиоэлектронное подавление обеспечивается созданием активных и пассивных помех, применением ложных целей, ловушек и другими способами.

Радиоэлектронная защита – составная часть радиоэлектронной борьбы, направленная на обеспечение устойчивой работы радиоэлектронных средств (РЭС) в условиях воздействия преднамеренных радиопомех противника, электромагнитных излучений оружия функционального поражения, электромагнитных и ионизирующих излучений, возникающих при применении ядерного оружия, а также в условиях воздействия непреднамеренных радиопомех. Основу РЭЗ составляют: обеспечение электромагнитной совместимости (ЭМС) РЭС, комплекс организационных и технических мероприятий, направленных на обеспечение помехоустойчивости РЭС в условиях воздействия на них непреднамеренных помех.

Радиоэлектронная разведка – сбор разведывательной информации на основе приема и анализа электромагнитного излучения. Радиоэлектронная разведка использует как перехваченные сигналы из каналов связи между людьми и техническими средствами, так и сигналы работающих РЛС, станций связи, станций радиопомех и иных радиоэлектронных средств.

Электромагнитное воздействие (импульс) выводит из строя электронное, коммуникационное и силовое оборудование противника. Поражающий эффект достигается за счет наведения индукционных токов.

Существенным фактором, определяющим боевую эффективность техники РЭБ, другого вооружения, военной и специальной техники (ВВСТ), имеющей в своем составе радиоэлектронную аппаратуру, является надежность эксплуатационных свойств образцов и их составных частей (приемо-передающей аппаратуры, антенно-фидерных устройств и т. п.) в различных условиях [8].

В работе [9] предложена информационная технология многофакторного обеспечения надежности сложных электронных систем, а в [10] рассмотрены физические основы моделирования катастрофических отказов в этих системах.

Надежность средств РЭБ зависит от их архитектуры и конструктивно-технологических вариантов реализации.

В настоящее время весьма востребованы малогабаритные комплексы РЭБ, выполненные по модульной технологии ВРХ [11].

Цель работы – разработка методики, позволяющей унифицировать архитектуру средств РЭБ с учетом их проектирования и производства по модульной ВРХ технологии.

Варианты построения архитектуры средств РЭБ. Проведенный нами анализ средств РЭБ позволяет сделать вывод о схожести выполняемых ими функций, которые вытекают из общего принципа работы этих средств, заключающегося в приеме сигналов от излучающих радиоэлектронных средств (РЭС), измерении параметров принятых сигналов и формировании помеховых сигналов РЭС на основе анализа их параметров.

Так, излученный сигнал РЭС принимается приемной частью, преобразуется в удобную форму для обработки и далее поступает в обрабатывающую часть, где подвергается измерению. Измеренные параметры сигнала поступают в управляющую часть для анализа и принятия решения о необходимых мерах противодействия. В случае положительного решения выдается команда на формирование ответного помехового сигнала, который после преобразования излучается передающей частью в направлении РЭС.

В общем случае средства РЭБ могут строиться по разным структурным схемам, но в архитектурном плане они мало отличаются, так как все отличия сводятся в основном к комбинации ограниченного набора составных частей и связей между ними.

Таким образом, любую аппаратуру РЭБ можно условно разделить на следующие функционально законченные части:

- 1) приемную;
- 2) передающую;
- 3) распределительную;
- 4) преобразующую;
- 5) обрабатывающую;
- 6) формирующую;
- 7) управляющую.

В общем случае унифицированная архитектура средств РЭБ должна позволять произвольно менять состав и связи между составными частями. Связи между составными частями могут быть как статическими, так и динамическими, т.е. меняться в процессе работы средств РЭБ. Статические связи реализуются с использованием фиксированных каналов связи, выполненных с использованием кабелей и делителей (сумматоров) сигналов. При организации динамических связей используют коммутирующую часть. Один из общих вариантов построения обеспечивает связь всех составных частей через единую коммутирующую часть (рис. 1). Такой вариант позволяет произвольно соединять любую составную часть с любой другой составной частью. Вторым общим вариантом – это когда каждая составная часть соединяется со всеми другими составными частями канала связи (рис. 2). Аппаратная реализация таких вариантов при использовании аналоговых каналов связи сопровождается большими трудностями, так как очень трудно реализовать технические требования к коммутируемым каналам связи, в первом варианте – из-за потерь мощности передаваемых сигналов и наличия перекрестных связей, а во втором варианте – из-за большого их количества. При использовании цифровых каналов связи задача несколько упрощается, но, учитывая полосы рабочих частот РЭС, цифровая реализация связей потребует сверхбыстродействующей электронной элементной базы, что на сегодняшний день пока трудноосуществимо. Компромиссным решением является разделение сигнальных и управляющих каналов, т.е. разделение единой коммутирующей части на сигнальную, аналоговую и управляющую цифровую коммутирующую части (рис. 3). Аналоговая коммутирующая часть, как правило, строится с использованием ключей и делителей (сумматоров) мощности. Практические трудности сопряжения динамических диапазонов приемных и передающих каналов приводят к необходимости разделения аналоговой коммутирующей части на приемную и передающую, при этом преобразующую часть также придется разделить на приемную и передающую. Практически унифицированная архитектура средств РЭБ сводится к структурной схеме на рис. 4.

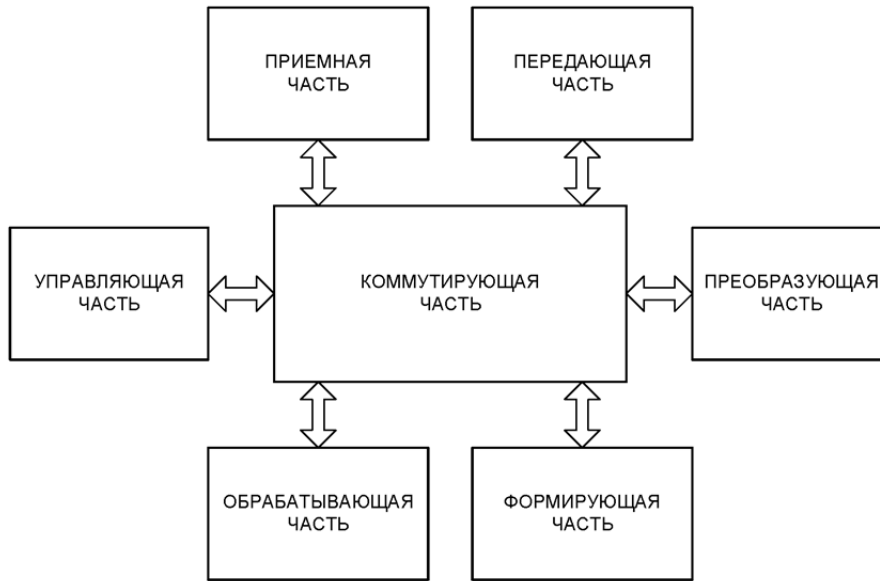


Рис. 1. Общая структурная схема средств РЭБ

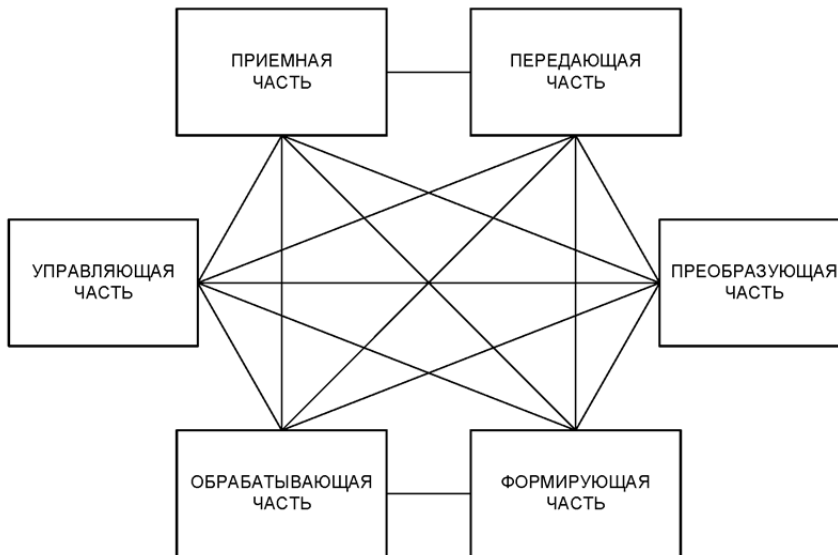


Рис. 2. Общая структурная схема средств РЭБ типа «каждый с каждым»

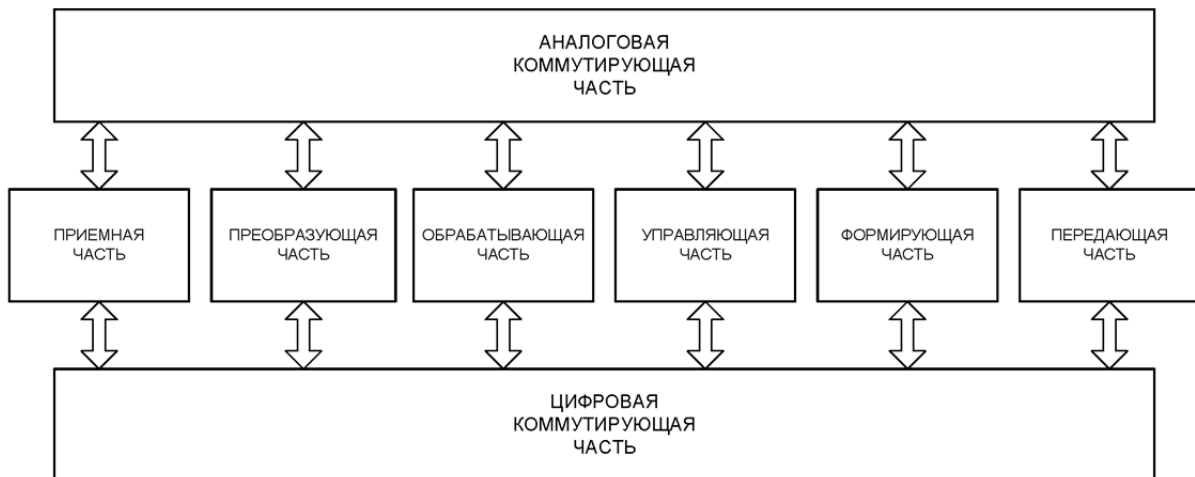


Рис. 3. Структурная схема средств РЭБ с аналоговой и цифровой коммутационной частью

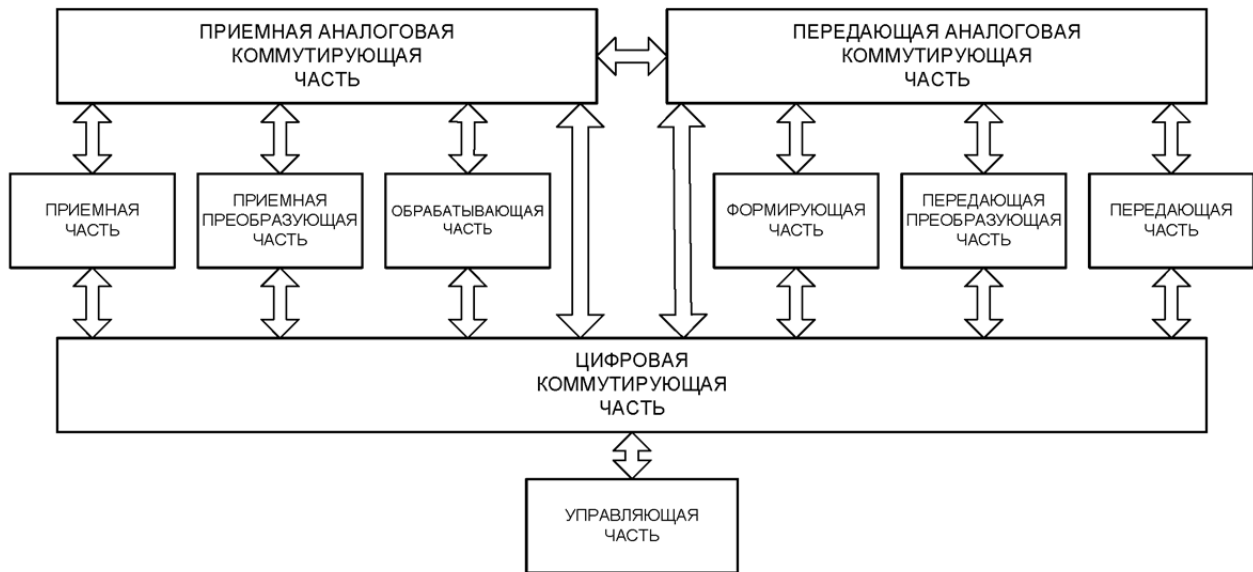


Рис. 4. Структурная схема унифицированной архитектуры средств РЭБ

Унифицированная архитектура позволяет создавать средства РЭБ различного типа и назначения для любых объектов размещения, будь то корабль, танк или самолет. Таким образом, предлагается унифицировать структурную схему построения средств РЭБ. Дальнейшую унификацию до уровня блока, модуля и узла следует вести уже с учетом конкретных требований к аппаратуре РЭБ, которые зависят от объекта размещения и условий ее применения. В первую очередь целесообразно подвергнуть унификации те части, которые мало зависят от объекта размещения, это – управляющая, обрабатывающая, формирующая, преобразующая и цифровая коммутирующая части.

Унифицированные части должны удовлетворять современным требованиям, в первую очередь принципу модульности. Принцип модульности заключается в построении РЭО на основе отдельных модулей. Модули должны быть унифицированными (взаимозаменяемыми), наращиваемыми, легко устанавливаемыми и ремонтпригодными. Это позволит повысить удобство эксплуатации и ремонта, обеспечить открытость архитектуры, а значит – возможность изменения состава оборудования в многоцелевых комплексах различного назначения и относительно простого оснащения новой аппаратурой по мере ее развития.

Учитывая, что между предлагаемыми унифицированными модулями имеется значительное количество связей, целесообразно их расположить рядом для уменьшения длины каналов связи. Конструктивно это лучше реализовать в виде блока с посадочными местами для модулей, объединенных общей высокоскоростной системной шиной стандарта VITA46 (VPX). Количество посадочных мест может быть различно и зависит от технических требований к аппаратуре РЭБ, это в первую очередь масса, габариты, способ охлаждения, пропускная способность и др. Унификация блока нецелесообразна, так как это приведет либо к излишней избыточности, либо к недостатку посадочных мест. Лучшим решением будет создание ограниченного набора блоков, отличающихся количеством посадочных мест и способом охлаждения.

При данном выборе системной шины (VPX) отпадает необходимость разрабатывать управляющие модули, так как они представляют собой встраиваемые одноплатные компьютеры, которые широко представлены на российском рынке.

Что касается каналов связи, то они, как было сказано выше, бывают двух видов: сигнальные аналоговые и управляющие цифровые. Как сигнальные каналы, так и управляющие каналы связи можно реализовывать с использованием печатных проводников, коаксиальных кабелей, оптических линий и витых пар. Выбор определяется техническими, конструктивными и технологическими требованиями к каналу связи. В качестве интерфейса обмена управляющей информацией целесообразно применить широко используемый сетевой интерфейс на основе стандарта Ethernet. Выбор сетевого интерфейса Ethernet освободит разработчиков аппаратуры РЭБ от создания интерфейсного коммутирующего модуля, так как он, как и встраиваемые компьютерные модули, серийно выпускается российскими предприятиями.

В итоге, приходим к модульной унифицированной структуре средств РЭБ, приведенной на рис. 5.

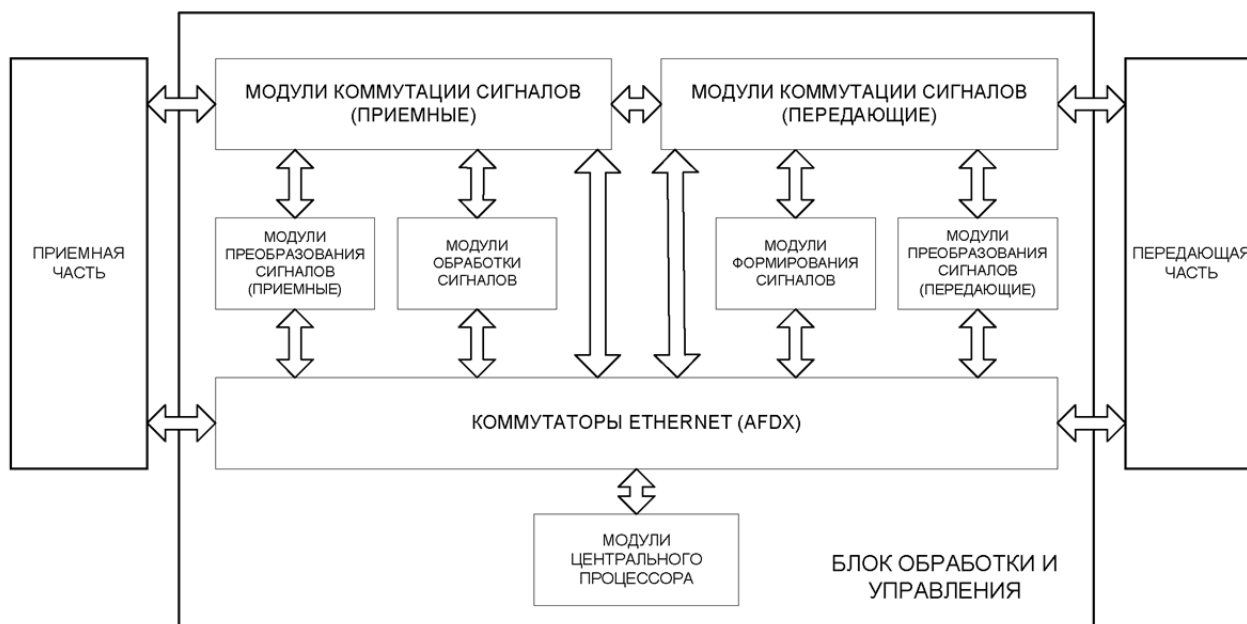


Рис. 5. Структурная схема средств РЭБ с унифицированными модулями

Заключение

Предложена методика унификации средств радиоэлектронной борьбы. Она базируется на выделении основных функционально законченных частей аппаратуры РЭБ, анализе связей и принципа работы, а также конструктивно-технологических вариантов их реализации. Данная методика позволила создать унифицированную архитектуру средств РЭБ, позволяющую использовать наиболее передовую технологию VPRX.

Использование унифицированной архитектуры и унифицированных модулей позволит разработчикам средств РЭБ уменьшить время проектирования и сконцентрировать свои усилия на разработке наиболее зависимых от объекта размещения частях – приемной и передающей, а также на разработке функционального программного обеспечения, от которого в большей степени зависит эффективность средств РЭБ.

Библиографический список

1. Иванов, И. Содержание и роль радиоэлектронной борьбы в операциях XXI века / И. Иванов, И. Чадов // Зарубежное военное обозрение. – 2011. – № 1. – С. 14–20.
2. Шерстнев, Д. В. Малогабаритный модульный комплекс РТР и РЭП индивидуальной защиты летательных аппаратов / Д. В. Шерстнев, В. А. Маклашов, Ю. В. Мазуров, В. К. Тезейкин // Радиоэлектронная борьба в Вооруженных силах Российской Федерации. – 2017. – № 1. – С. 172–173.
3. Добыкин, В. Д. Радиоэлектронная борьба. Силовое поражение радиоэлектронных систем / В. Д. Добыкин, А. И. Куприянов, В. Г. Пономарев, Л. Н. Шустов. – Москва : Вузовская книга, 2007. – 468 с.
4. Цветнов, В. В. Радиоэлектронная борьба. Радиоразведка и радиопротиводействие / В. В. Цветнов, В. П. Демин, А. И. Куприянов. – Москва : МАИ, 1998. – Т. 2. – 248 с.
5. Куприянов, А. И. Теоретические основы радиоэлектронной борьбы / А. И. Куприянов, А. В. Сахаров. – Москва : Вузовская книга, 2007. – С. 59–64.
6. Гуткин, Л. С. Проектирование радиосистем и радиоустройств : учеб. пособие для вузов / Л. С. Гуткин. – Москва : Радио и связь, 1986. – С. 36–37.
7. Денисов, В. П. Фазовые радиопеленгаторы / В. П. Денисов, Д. В. Дубинин. – Томск : Изд-во ТУСУР, 2002. – 251 с.
8. Гулидов, А. А. Новые направления развития экспериментально-испытательной базы НИИИ (РЭБ) / А. А. Гулидов, В. В. Мысив, Э. А. Соломин, А. В. Букреев // Радиоэлектронная борьба в Вооруженных Силах Российской Федерации. – 2018. – № 1. – С. 52–55.

9. Юрков, Н. К. Информационная технология многофакторного обеспечения надежности сложных электронных систем / Н. К. Юрков, А. В. Затылкин, С. Н. Полесский, И. А. Иванов, А. В. Лысенко // Надежность и качество сложных систем. – 2013. – № 4. – С. 74–79.
10. Юрков, Н. К. Физические основы получения катастрофического отказа в электрорадиокомпонентах и системах / Н. К. Юрков, Н. В. Горячев, Е. А. Кузина // Надежность и качество сложных систем. – 2018. – Т. 1. – С. 102–107.
11. Маклашов, В. А. Модульная технология VPX в технике РЭБ / В. А. Маклашов // Радиотехника. – 2016. – № 1. – С. 28–31.

References

1. Ivanov I., Chadov I. *Zarubezhnoe voennoe obozrenie* [Foreign military review]. 2011, no. 1, pp. 14–20. [In Russian]
2. Sherstnev D. V., Maklashov V. A., Mazurov Yu. V., Tezeykin V. K. *Radioelektronnaya bor'ba v Vooruzhennykh silakh Rossiyskoy Federatsii* [Electronic warfare in the Armed forces of the Russian Federation]. 2017, no. 1, pp. 172–173. [In Russian]
3. Dobykin V. D., Kupriyanov A. I., Ponomarev V. G., Shustov L. N. *Radioelektronnaya bor'ba. Silovoe porazhenie radioelektronnykh sistem* [Electronic warfare. Power defeat of radio-electronic systems]. Moscow: Vuzovskaya kniga, 2007, 468 p. [In Russian]
4. Tsvetnov V. V., Demin V. P., Kupriyanov A. I. *Radioelektronnaya bor'ba. Radiorazvedka i radioprotivodeystvie* [Electronic warfare. Radio intelligence and radio operations]. Moscow: MAI, 1998, vol. 2, 248 p. [In Russian]
5. Kupriyanov A. I., Sakharov A. V. *Teoreticheskie osnovy radioelektronnoy bor'by* [Theoretical foundations of electronic warfare]. Moscow: Vuzovskaya kniga, 2007, pp. 59–64. [In Russian]
6. Gutkin L. S. *Proektirovanie radiosistem i radioustroystv: ucheb. posobie dlya vuzov* [Design of radio systems and radio devices: studies. manual for universities]. Moscow: Radio i svyaz', 1986, pp. 36–37. [In Russian]
7. Denisov V. P., Dubinin D. V. *Fazovyye radiopelengatory* [Phase direction finders]. Tomsk: Izd-vo TUSUR, 2002, 251 p. [In Russian]
8. Gulidov A. A., Mysiv V. V., Solomin E. A., Bukreev A. V. *Radioelektronnaya bor'ba v Vooruzhennykh Silakh Rossiyskoy Federatsii* [Electronic warfare in the Armed Forces of the Russian Federation]. 2018, no. 1, pp. 52–55. [In Russian]
9. Yurkov N. K., Zatytkin A. V., Poleskiy S. N., Ivanov I. A., Lysenko A. V. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem* [Reliability and quality of complex systems]. 2013, no. 4, pp. 74–79. [In Russian]
10. Yurkov N. K., Goryachev N. V., Kuzina E. A. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem* [Reliability and quality of complex systems]. 2018, vol. 1, pp. 102–107. [In Russian]
11. Maklashov V. A. *Radiotekhnika* [Radiotechnics]. 2016, no. 1, pp. 28–31. [In Russian]

Маклашов Владимир Анатольевич

аспирант,
Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева (443086, Россия, г. Самара, Московское шоссе, 34)
E-mail: kipres@ssau.ru

Пиганов Михаил Николаевич

доктор технических наук, профессор,
кафедра конструирования и технологии электронных систем и устройств,
Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева (443086, Россия, г. Самара, Московское шоссе, 34)
E-mail: kipres@ssau.ru

Maklashov Vladimir Anatol'evich

postgraduate student,
Samara National Research University
named after academician S. P. Korolev
(443086, 34 Moskovskoye highway, Samara, Russia)

Piganov Mikhail Nikolaevich

doctor of technical sciences, professor,
sub-department of design and technology
electronic systems and devices,
Samara National Research University
named after academician S. P. Korolev
(443086, 34 Moskovskoye highway, Samara, Russia)

Образец цитирования:

Маклашов, В. А. Методика унификации средств радиоэлектронной борьбы / В. А. Маклашов, М. Н. Пиганов // Надежность и качество сложных систем. – 2019. – № 3 (27). – С. 26–32. – DOI 10.21685/2307-4205-2019-3-3.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ

TECHNOLOGICAL BASES OF IMPROVING THE RELIABILITY AND QUALITY OF PRODUCTS

УДК 519.718.2

DOI 10.21685/2307-4205-2019-3-4

О. Б. Бутусов, В. В. Дикусар, Н. И. Редикульцева

НЕЧЕТКИЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В ЭКОЛОГИИ

O. B. Butusov, V. V. Dikusar, N. I. Redikul'tseva

FUZZY DIFFERENTIAL SYSTEMS AND THEIR APPLICATION FOR MATHEMATICAL MODELING IN ECOLOGY

Аннотация. К нечетким дифференциальным системам (НДС) относятся системы, для моделирования которых используются нечеткие дифференциальные уравнения (НДУ). Разработка, развитие и практическое применение математических моделей НДС является важной и актуальной практической задачей, так как обусловлена необходимостью математического описания систем с неизвестными или плохо определенными параметрами. Основная цель работы: развитие и применение теории НДС для решения экологических проблем. Частная цель работы: на основе логистической модели Ферхюльста разработать нечеткую дифференциальную модель динамики лесной биомассы, в которой использовано понятие виртуального отрицательного потока биомассы, с помощью которого можно моделировать процессы деградации лесов под воздействием антропогенных (в том числе техногенных) факторов.

Ключевые слова: нечеткая производная, нечеткие дифференциальные уравнения, модифицированное уравнение Ферхюльста, виртуальный отрицательный поток биомассы, интервальная арифметика, качество природной среды, экологический мониторинг.

Abstract. Fuzzy differential systems (FDS) are systems for which modelling fuzzy differential equations (FDE) are used. The development and practical application of mathematical models of FDS is an important and urgent practical task, since it is caused by the need for mathematical description of systems with unknown or poorly defined parameters. The main goal of the work: the development and application of the theory of FDS to solve environmental problems. Private objective: based on the Verhulst logistic model, develop a fuzzy differential model of forest biomass dynamics using the concept of virtual negative biomass flow, which can be used to model forest degradation processes under the influence of anthropogenic (including technogenic) factors.

Keywords: fuzzy derivative, fuzzy differential equations, modified Verhulst equation, virtual negative biomass flow, interval arithmetic, environmental systems quality, environmental monitoring.

Введение

В разработанной модели в качестве интегрального показателя антропогенного воздействия на природную среду и, в частности, на леса использована величина лесной биомассы, которая уменьшается под воздействием антропогенных факторов [1]. В работе [2] предложена следующая эмпирическая формула для оценки антропогенных изменений лесной биомассы:

$$\frac{dB}{dt} = GBM \left(1 - \frac{B}{M} \right) - E, \tag{1}$$

где B – плотность лесной биомассы ($\text{кг} \cdot \text{м}^{-2}$); t – время (месяц⁻¹); G – коэффициент прироста биомассы ($\text{кг}^{-1} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{месяц}^{-1}$); M – плотность биомассы при нулевом потоке ($\text{кг} \cdot \text{м}^{-2}$); E – отрицательный поток биомассы ($\text{кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{месяц}^{-1}$).

В работе [2] отрицательный поток биомассы – это количество биомассы, изымаемое из лесного массива в единицу времени на нужды отопления. В данной работе предложено использовать поток биомассы, который имеет виртуальный характер. Так, уменьшение биомассы под воздействием выбросов промышленных предприятий можно рассматривать как отрицательный поток. Увеличение биомассы также может быть описано с помощью виртуальных положительных потоков, например, увеличение биомассы, связанное с восстановлением и реабилитацией лесов, происходящее вследствие очистки газовых выбросов промышленных предприятий.

Авторы [2] в качестве единицы измерения времени использовали один месяц, что вполне оправдано для южных широт. В северных широтах для измерения времени лучше использовать другую единицу, например, в наших расчетах использован вегетационный период (ВП). Это обусловлено тем, что реальное уменьшение биомассы за счет газовых выбросов промышленных предприятий может происходить только в течение вегетационного периода.

Модель (1) является трехпараметрической моделью и относится к классу моделей Ферхюльста [3]. В безразмерной форме модель имеет следующий вид:

$$\begin{cases} \frac{db}{d\tau} = b(1-b) - e, \\ b(0) = b_0, \end{cases} \tag{2}$$

где $b = \frac{B}{M}$ – безразмерная плотность биомассы; M – предельная плотность биомассы при нулевом потоке ($\text{кг} \cdot \text{м}^{-2}$); $g = GM$ – удельный коэффициент прироста биомассы (ВП⁻¹); $\tau = gt$ – безразмерное время; T – время релаксации динамической системы (ВП); $T_g = gT$ – безразмерное время релаксации динамической системы; $\tau_n = \frac{\tau}{T_g} = \frac{t}{T}$ – безразмерное нормализованное время; $e = \frac{E}{Mg}$ – безразмерный отрицательный поток биомассы; b_0 – начальная безразмерная плотность биомассы.

Для постоянных потоков биомассы модель (2) имеет аналитическое решение:

$$b(\tau) = \begin{cases} \frac{a_1 - Pa_2}{1 - P}, & e \leq 0,25; \\ \frac{b_0 + ke - kb_0 / 2}{1 - k(b_0 - 0,5)}, & e > 0,25; \\ \frac{b_0 + 0,5\tau(b_0 - 0,5)}{1 + \tau(b_0 - 0,5)}, & e = 0,25, \end{cases} \tag{3}$$

где $a_1 = 0,5 + \sqrt{0,25 - e}$, $a_2 = 0,5 - \sqrt{0,25 - e}$, $P = \frac{b_0 - a_1}{b_0 - a_2} \exp(-(a_1 - a_2)\tau)$, $k = -\frac{1}{r} \text{tg}(r\tau)$, $r = \sqrt{e - 0,25}$.

Следует учитывать, что при $e > 0,25$, т.е. при больших отрицательных потоках, биомасса достаточно быстро уменьшается до нуля и далее становится отрицательной. Поэтому для получения решений, имеющих физический смысл, следует использовать только варианты $e < 0,25$, т.е. рассматривать случаи небольших отрицательных потоков или положительных потоков.

Методика

Рассмотрим модель (2) в приближении нечетких чисел. Обозначим безразмерное время $\tau \rightarrow t$. Тогда нечеткий вариант модели (2) с отрицательным потоком биомассы примет следующий вид:

$$\begin{cases} \frac{d\tilde{b}}{dt} = \tilde{b}(1-\tilde{b}) - \tilde{e}, \\ b(0) = \tilde{b}_0, \end{cases} \quad (4)$$

где знак \sim – «тильда» используется для обозначения НЧ.

Для численного моделирования будем рассматривать приближение положительных треугольных нечетких чисел (ТНЧ) и метод α -сечений функций принадлежности ФП [4]. При этом α -сечение представляет собой четкий интервал, в котором находятся точки x , для которых $f_b(x) > \alpha$, где $f_b(x)$ – функция принадлежности. Таким образом, от нечетких чисел можно перейти к четким интервалам и решать интервальные уравнения вместо нечетких [4]. α -интервал для функции $b(t)$ можно представить в следующем виде: $[b(t)]_\alpha = [\underline{b}_\alpha(t), \bar{b}_\alpha(t)]$.

Введем следующие обозначения: $\underline{b}_\alpha(t) \rightarrow d(t)$, $\bar{b}_\alpha(t) \rightarrow u(t)$ («d – down» and «u – up»). В этих обозначениях $[b(t)]_\alpha \rightarrow [b(t)] = [d(t), u(t)]$, где $[b(t)]$ – интервальная функция. Согласно [5, 6] в расчетах производных в нечетких дифференциальных уравнениях используется разность Хукухары двух нечетких чисел (нечетких интервалов), например, $[A - B]_\alpha = [a_\alpha^- - b_\alpha^-, a_\alpha^+ - b_\alpha^+]$. При этом результат операции вычитания НЧ должен иметь такие же свойства, что и операнды. По определению разность Хукухара двух НЧ определяется как НЧ $C = A -_H B$, такое, что из условия существования C следует, что $A = B + C$. Разность Хукухары называется также H-разность и обозначена как $A -_H B$. В наших расчетах использовались следующие свойства, которым должны удовлетворять НЧ: нормализация, выпуклость, верхняя полунепрерывность, компактность носителя НЧ. Важной особенностью H-разности является то, что $A -_H B \neq B -_H A$, причем возможно, что одна из разностей не имеет перечисленных требуемых свойств и, таким образом, не существует. На рис. 1 представлена разность двух многоугольных НЧ. На рис. 1,а представлен случай, когда H-разность существует, а на рис. 1,б случай, когда H-разность не существует.

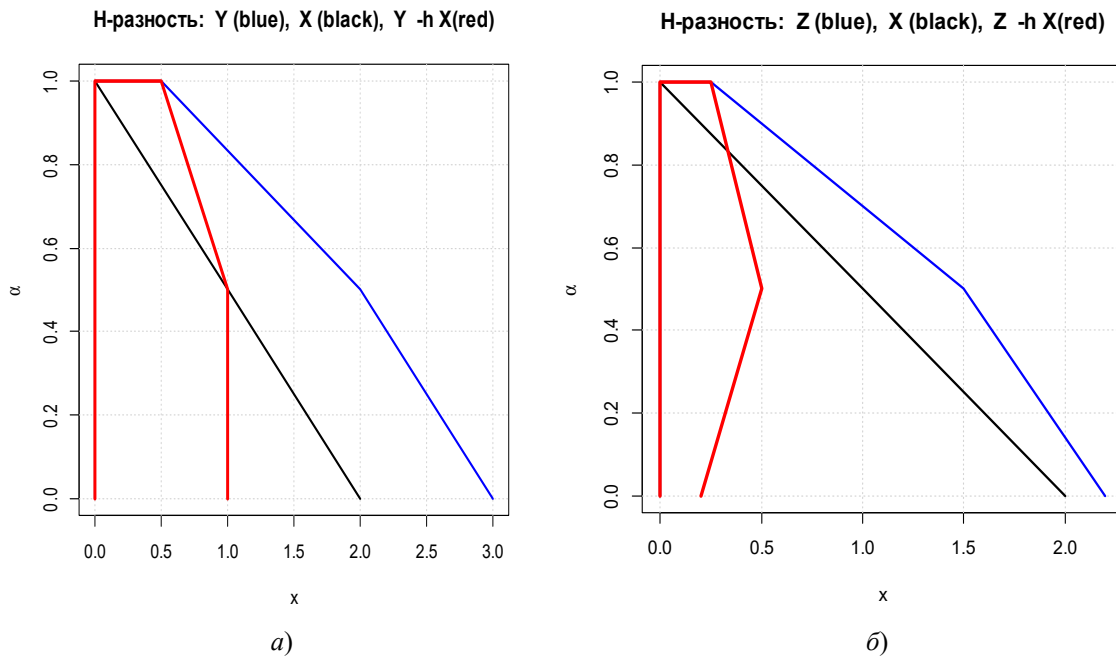


Рис. 1. Иллюстрация двух вариантов H-разности:
 а – H-разность двух НЧ существует; б – H-разность двух НЧ не существует

Применение Н-разностей в НДС приводит к двум математическим моделям

$$[d'(t), u'(t)] = [f(d, u, eu), f(u, d, ed)]; \quad (5)$$

$$[d'(t), u'(t)] = [f(u, d, ed), f(d, u, eu)], \quad (6)$$

где $f(x, y, z) = x - y^2 - z$, $eu = \bar{e}$, $ed = \underline{e}$.

Интервальное уравнение (5) эквивалентно системе следующих двух обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДЕ):

$$\begin{aligned} d'(t) &= f(d, u, eu); \\ u'(t) &= f(u, d, ed). \end{aligned} \quad (7)$$

Интервальное уравнение (6) эквивалентно следующей системе ОДЕ:

$$\begin{aligned} d'(t) &= f(u, d, ed); \\ u'(t) &= f(d, u, eu). \end{aligned} \quad (8)$$

Для численного решения систем ОДЕ (7) и (8) был использован метод конечных разностей и численная схема Рунге – Кутты второго порядка. Численная схема для решения системы ОДЕ (7) имеет следующий вид:

$$d_{i+1} = d_i + \frac{dt}{2} (f(d_i, u_i, eu) + f(D_i, U_i, eu)); \quad (9)$$

$$u_{i+1} = u_i + \frac{dt}{2} (f(u_i, d_i, ed) + f(U_i, D_i, ed)), \quad (10)$$

где $D_i = d_i + dt \cdot f(d_i, u_i, eu)$, $U_i = u_i + dt \cdot f(u_i, d_i, ed)$.

Для системы ОДЕ (8) численная схема имеет вид

$$d_{i+1} = d_i + \frac{dt}{2} (f(u_i, d_i, ed) + f(U_i, D_i, ed)); \quad (11)$$

$$u_{i+1} = u_i + \frac{dt}{2} (f(d_i, u_i, eu) + f(D_i, U_i, eu)), \quad (12)$$

где $D_i = d_i + dt \cdot f(u_i, d_i, ed)$, $U_i = u_i + dt \cdot f(d_i, u_i, eu)$.

Область допустимых решений конечно-разностных уравнений (9)–(12) определяется условиями: $d_i, u_i \geq 0$; $D_i, U_i \geq 0$.

Результаты

В разработанной нечеткой дифференциальной модели антропогенная нагрузка учитывается с помощью нечетких виртуальных отрицательных потоков биомассы. Результаты численных экспериментов представлены на рис. 2. Обозначим нечеткую интервальную модель (9), (10) «IA1» (Interval Arithmetic-1) и модель (11), (12) «IA2» (Interval Arithmetic-2). Объемы лесной биомассы могут регулироваться в модели с помощью двух управляющих параметров: коэффициента прироста биомассы и величиной отрицательных виртуальных потоков биомассы. Как отмечено выше, величина этих параметров неизвестна и поэтому эти параметры были описаны с помощью нечетких чисел. Результаты моделирования с помощью нечеткой модели IA1 показаны на рис. 2,а. Как следует из рис. 2,а, границы интервала нечеткости не имеют асимптот и расходятся в разные стороны, в результате чего ширина интервала неопределенности катастрофически возрастает.

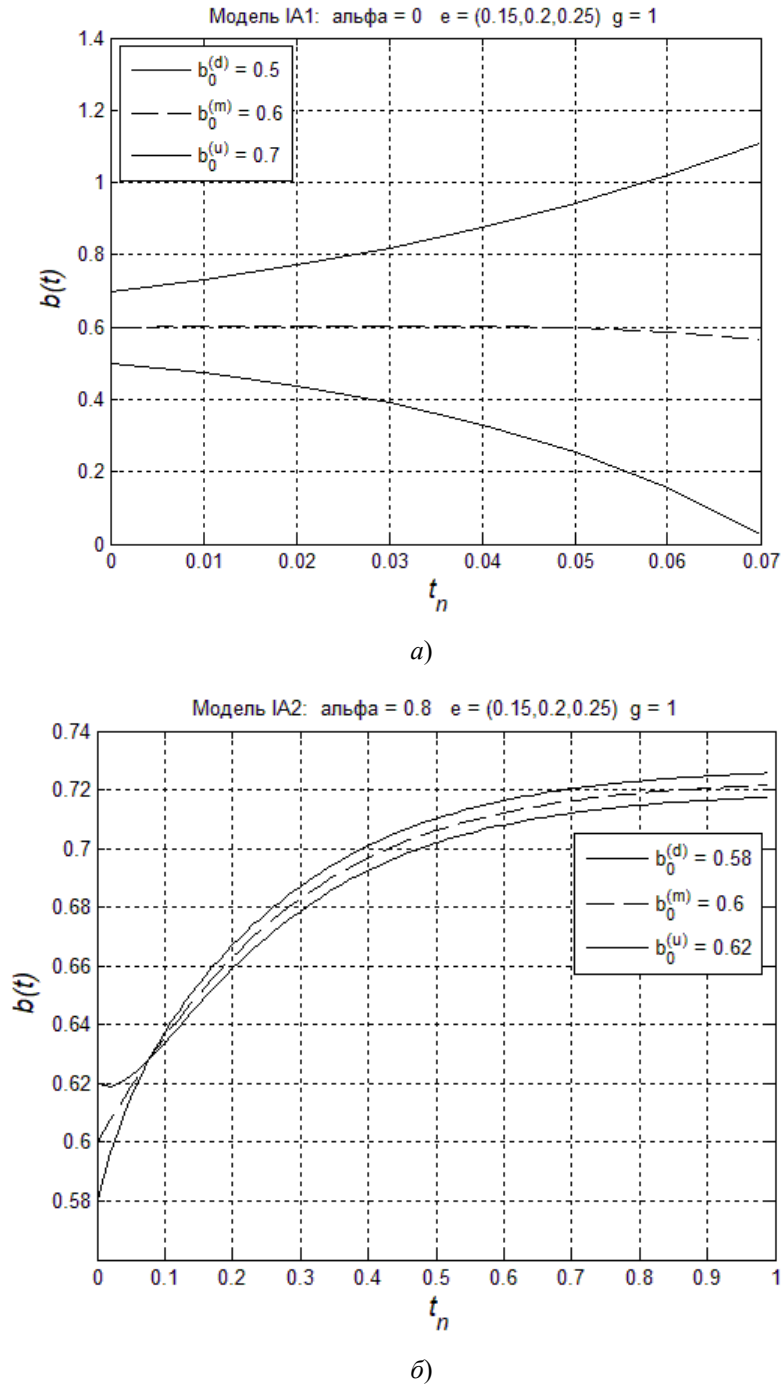


Рис. 2. Динамика границ интервалов нечеткости:
 а – модель «IA1»; б – модель «IA2»

Результаты моделирования с помощью нечеткой модели IA2 показаны на рис. 2,б. Очевидно, что границы интервала асимптотически приближаются к своим пределам. Ширина интервала стабилизируется и постепенно приближается к постоянному значению, а сама плотность биомассы приближается к стационарному пределу, который и определяет предельное значение плотности биомассы. При этом следует отметить, что воздействие атмосферных промышленных загрязнений на качество лесных экосистем проявляется различным образом в зависимости от величины концентрации промышленных загрязнений в атмосферном воздухе. В книге Вильяма Смита [7] взаимодействие атмосферных загрязнений и лесных экосистем разделяется на три класса: слабое взаимодействие при малых концентрациях промышленных загрязнителей, при котором лесные массивы выступают в роли эффективного очистителя атмосферы от загрязнителей; средний уровень воздей-

ствия загрязнений на леса, при котором происходят физиологические нарушения, имеющие физиономический характер, и уменьшение таких важных показателей экологического состояния лесов, как биомасса, проективное покрытие, видовое разнообразие и прочее, при этом в результате ослабления защитных функций возможны заболевания отдельных групп деревьев и инвазия насекомых вредителей; высокий уровень характеризуется заболеванием и смертностью деревьев, в результате чего происходит изреживание древостоя, обезлесивание территорий и значительное уменьшение плотности биомассы.

Заключение

Введено понятие виртуальных отрицательных потоков биомассы, с помощью которых предложено описывать воздействие газовых выбросов промышленных предприятий на природные экосистемы.

Для моделирования динамических процессов в природной среде предложено использовать нечеткую модификацию дифференциальной модели Ферхюльста с учетом виртуальных отрицательных потоков биомассы.

В численных экспериментах использованы два варианта разработанной модели, к которым приводит использование при расчетах производных различных форм h -разности:

$$\lim_{h \rightarrow 0+0} \frac{F(t_0 + h) - {}_{gH}F(t_0)}{h} = \lim_{h \rightarrow 0+0} \frac{F(t_0) - {}_{gH}F(t_0 - h)}{h} = f'(t_0); \quad (13)$$

$$\lim_{h \rightarrow 0+0} \frac{F(t_0) - {}_{gH}F(t_0 + h)}{(-h)} = \lim_{h \rightarrow 0+0} \frac{F(t_0 - h) - {}_{gH}F(t_0)}{(-h)} = f'(t_0). \quad (14)$$

Установлено, что модель IA1 не имеет асимптот и границы интервалов расходятся, в результате чего ширина интервалов неопределенности катастрофически возрастает. Модель IA2 имеет асимптоты, ширина интервала достаточно быстро приближается к стационарному пределу, после которого сохраняет постоянную ширину.

Библиографический список

1. Бутусов, О. Б. Новая модель доза-эффект динамики лесных экосистем в районе металлургических предприятий / О. Б. Бутусов, А. М. Степанов // Экология и промышленность России. – 2001. – № 6. – С. 37–40.
2. Salerno, F. Energy, Forest, and Indoor Air Pollution Models for Sagarmatha National Park and Buffer Zone, Nepal / F. Salerno, G. Viviano, S. Thakuri // Mountain Research and Development (MRD) (An international, peer-reviewed open access journal published by the International Mountain Society (IMS)). – 2010. – Vol. 30, № 2. – P. 113–126. – URL: <http://dx.doi.org/10.1659/MRD-JOURNAL-D-10-00027.1>
3. Малинецкий, Г. Г. Хаос. Структуры. Вычислительный эксперимент: введение в нелинейную динамику / Г. Г. Малинецкий. – Москва : Наука, 1997. – 255 с.
4. Lee Kwang H. First Course on Fuzzy Theory and Applications / Lee Kwang H. – Berlin ; Heidelberg ; New York : Springer, 2005. – 341p.
5. Lakshmikantham, V. Theory of fuzzy differential equations and inclusions / V. Lakshmikantham, R. N. Mohapatra. – London , New York : Taylor & Francis Group, 2003. – 182 p.
6. Kanagarajan, K. Numerical solution of fuzzy differential equations under generalized differentiability by Modified Euler method / K. Kanagarajan, R. Suresh // International Journal of Mathematical Engineering and Science. – 2013. – Vol. 2, № 11. – P. 5–15.
7. Smith, W. H. Air Pollution and Forests. Interactions between Air Contaminants and Forest Ecosystems / W. H. Smith. – New York : Springer-Verlag, 1981. – 388 p.

References

1. Butusov O. B., Stepanov A. M. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii* [Ecology and industry of Russia]. 2001, no. 6, pp. 37–40. [In Russian]
2. Salerno F., Viviano G., Thakuri S. et. al. *Mountain Research and Development (MRD) (An international, peer-reviewed open access journal published by the International Mountain Society (IMS))*. 2010, vol. 30, no. 2, pp. 113–126. Available at: <http://dx.doi.org/10.1659/MRD-JOURNAL-D-10-00027.1>
3. Malinetskiy G. G. *Khaos. Struktury. Vychislitel'nyy eksperiment: Vvedenie v nelineynuyu dinamiku* [Chaos. Structures. Computational experiment: Introduction to nonlinear dynamics]. Moscow: Nauka, 1997, 255 p. [In Russian]

4. Lee Kwang H. *First Course on Fuzzy Theory and Applications*. Berlin; Heidelberg; New York: Springer, 2005, 341 p.
5. Lakshmikantham V., Mohapatra R. N. *Theory of fuzzy differential equations and inclusions*. London, New York: Taylor & Francis Group, 2003, 182 p.
6. Kanagarajan K., Suresh R. *International Journal of Mathematical Engineering and Science*. 2013, vol. 2, no. 11, pp. 5–15.
7. Smith W. H. *Air Pollution and Forests. Interactions between Air Contaminants and Forest Ecosystems*. New York: Springer-Verlag, 1981, 388 p.

Бутусов Олег Борисович

доктор физико-математических наук, профессор,
кафедра математики,
Московский политехнический университет
(107023, Россия, г. Москва, ул. Б. Семеновская, 38)
E-mail: butusov-1@mail.ru

Дикусар Василий Васильевич

доктор физико-математических наук, профессор,
кафедра высшей математики,
Московский физико-технический институт
(141701, Россия, г. Долгопрудный,
Институтский пер., 9)
E-mail: dikussar@yandex.ru

Редикутьцева Нина Ивановна

кандидат технических наук, доцент,
кафедра прикладной математики,
Московский гуманитарный университет
(111395, Россия, г. Москва, ул. Юности, 5)
E-mail: redik_ni@mail.ru

Butusov Oleg Borisovich

doctor of physical and mathematical sciences, professor,
sub-department of mathematics,
Moscow Polytechnic University
(107023, 38 B. Semenovskaya street, Moscow, Russia)

Dikusar Vasily Vasilevich

doctor of physical and mathematical sciences,
professor,
sub-department of higher mathematics,
Moscow Institute of Physics and Technology
(141701, 9 Institutsky lane, Dolgoprudny, Russia)

Redikul'tseva Nina Ivanovna

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of applied mathematics,
Moscow Humanitarian University
(111395, 5 Yunosty street, Moscow, Russia)

Образец цитирования:

Бутусов, О. Б. Нечеткие дифференциальные системы и их применение для математического моделирования в экологии / О. Б. Бутусов, В. В. Дикусар, Н. И. Редикутьцева // Надежность и качество сложных систем. – 2019. – № 3 (27). – С. 33–39. – DOI 10.21685/2307-4205-2019-3-4.

А. С. Боков, В. Г. Важенин, А. А. Иофин, В. В. Мухин

РЕТРАНСЛЯЦИОННЫЙ ИМИТАТОР СИГНАЛОВ ДЛЯ ПРОВЕРКИ ХАРАКТЕРИСТИК БОРТОВЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИСТЕМ И УСТРОЙСТВ¹

A. S. Bokov, V. G. Vazhenin, A. A. Iofin, V. V. Mukhin

RETRANSMITTING SIMULATOR FOR TESTING OF AIRBORNE RADAR SYSTEMS AND DEVICES PERFORMANCE

Аннотация. *Актуальность и цели.* Современные стандарты разработки и выпуска сложных систем требуют выполнения испытаний и подтверждения тактико-технических характеристик на ранних этапах жизненного цикла изделия. Актуальность оценки работы имитатора в составе комплекса полунатурного моделирования подтверждается возможностью учета всех основных параметров фоноцелевой обстановки для функциональной проверки алгоритмов поиска, захвата, наведения и сопровождения целей. В основе программной части комплексов полунатурного моделирования используется модель представления фоноцелевой обстановки с учетом характеристик отражения радиолокационных сигналов от заданного набора типов целей, объектов и подстилающих поверхностей. *Материалы и методы.* Сложный механизм отражения (обратного рассеяния) электромагнитного поля упрощается путем замены пространственно-электрических характеристик поверхностей целей, земли, воды на соответствующие характеристики отраженного сигнала, известные для выбранных диапазонов несущих частот из результатов анализа и обобщения данных натуральных экспериментов. В аппаратной реализации модели пространство распространения прямого и отраженного сигналов между антеннами радиолокационной станции и всей отражающей поверхностью представлено в виде многоканальной модели, что значительно упрощает анализ. *Выводы.* Показано, что для формирования радиолокационных эхо-сигналов типовых радиолокаторов с переменными параметрами необходима реализация суммирования (микширования) копий зондирующего сигнала с разными задержками, амплитудами, частотными сдвигами. Проведен расчет параметров заданного количества каналов формирования, а также их передача в имитатор сигнала на базе модулей в реальном мас-

Abstract. *Background.* Modern standards of development and production of complex systems require you to perform testing and confirmation of the tactical-technical characteristics in the early stages of the product life cycle. The relevance evaluation of the work of the Simulator as a part of a complex of semi-natural simulation confirmed the possibility of taking into account all basic parameters of training Simulator provides possibility of environment for functional verification of algorithms of search, seizure, guidance and accompaniment goals. The basis behind complexes of semi-natural simulation uses the presentation model training Simulator provides possibility of the situation taking into account the characteristics of the reflection of radar signals from a given set of types, objects and purposes underlying surfaces. *Materials and methods.* Complex reflection (backscatter) electromagnetic fields are simplified by replacing the spatial-electrical characteristics of surface targets, Earth, water on the relevant characteristics of the reflected signal, known for the selected carrier frequencies ranges from analysis and synthesis of data field experiments. In a hardware implementation model of space distribution of direct and indirect signals between radar and antennas throughout the reflective surface is presented in the form of a multi-channel model, which greatly simplifies the analysis. *Conclusions.* It is shown that for the formation of the radar echoes model with variable parameters radar implementations of summation (mixing) copies of probing signal with different delays, amplitudes, frequency shifts. Calculation of parameters for the specified number of channels forming, as well as their transfer signal simulator based on modules in real time, allowing the grouping of reflectors on the basis of the simulation of the system taking into account the angle evolutions and speed of aircraft directional aeriels and chart settings properties of the underlying surface.

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (проект № 8.2538.2017/4.6).

штабе времени, что позволяет осуществить группировку отражателей на основе моделирования системы с учетом угловых эволюций и скорости летательного аппарата, параметров диаграмм направленности антенн и свойств подстилающей поверхности.

Ключевые слова: полунатурное моделирование, цифровая обработка сигналов, радиолокатор, радиовысотомер, радиолокационная цель, линейная частотная модуляция.

Keywords: HIL, digital signal processing, radar, altimeter, radar target, linear frequency modulation.

Введение

Летные и натурные испытания различных бортовых РЛС, радиовысотомеров (РВ), радиодальномеров (РВД) традиционно используются на заключительных стадиях опытно-конструкторских работ при наличии готовых образцов РЛС и ее носителя. Современные стандарты разработки и выпуска сложных систем требуют выполнения испытаний и подтверждения тактико-технических характеристик еще в стационарных условиях производства или исследовательской лаборатории. Для тестирования таких приемопередающих радиосистем необходима имитация частотно-временной структуры радиолокационных сигналов, отраженных от подстилающей поверхности, от одной или нескольких целей, находящихся или движущихся в пределах диаграмм направленности антенн (ДНА).

Формирование эквивалентных отраженных эхо-сигналов с возможностью сквозных испытаний и контроля параметров СВЧ и НЧ-трактов излучения и обработки сигналов выполняют с помощью специальных устройств – имитаторов. При работе имитатора в составе комплекса полунатурного моделирования (ПНМ) возможен учет всех основных параметров возможной фоноцелевой обстановки для функциональной проверки алгоритмов поиска, захвата, наведения и сопровождения целей в РЛС в условиях, близких к реальным, к критическим и даже запредельным (в том числе по траектории, вибрации, температуре и др.), т.е. невозможным в реальных натурных испытаниях.

Постановка задачи и методы ее решения

Помимо физического моделирования, известны и популярны два основных способа получения сигнала имитирующего радиолокационное отражение: с генератора с заданными характеристиками сигнала, и с ретранслятора-повторителя, с возможными изменениями параметров сигнала [1, 2]. Выполнение преобразования сигнала вместо генерирования позволяет учесть неидеальности всех блоков и СВЧ тракта конкретного образца РЛС, сохраняется возможность последующей когерентной обработки сигнала в РЛС.

В основе программной части комплексов ПНМ должна использоваться модель представления фоноцелевой обстановки с учетом характеристик отражения радиолокационных эхо-сигналов от заданного набора типов целей, объектов и поверхностей [3, 4]. Моделирование принимаемого сигнала, очевидно, должно основываться в том числе и на геометрических параметрах facets и летательного аппарата (ЛА). Поэтому в общем случае геометрия трехмерной модели поверхности при движении ЛА на высоте H со скоростью $V_{\text{ЛА}}$ и точечной цели со скоростью $V_{\text{Ц}}$ на дальности $R_{\text{Ц}}$ может быть представлена в пределах пятна облучения лепестками ДНА и максимальной дальности x_{max} (рис. 1).

Согласно феноменологическому подходу [3, 4], типовые протяженные радиолокационные объекты (подстилающая поверхность, протяженная цель) могут быть представлены в виде набора точечных отражателей или facets с индивидуальными геометрической площадью и ориентацией. Реальные радиолокационные цели не являются точечными, особенно для РЛС высокого разрешения, поэтому считается более корректным представить все цели аналогичными геометрическими facetными моделями [5], дающими при моделировании соответствующую экспериментам эффективную площадь рассеяния (ЭПР) для нужных ракурсов целей.

Тогда для общего случая все facets в дополнение к геометрическим параметрам (относительным координатам, скорости, пространственной ориентации, площади) должны иметь свои «характерные для типа отражателя» значения удельной ЭПР и диаграммы обратного рассеяния (ДОР). Таким

образом, сложный механизм отражения (обратного рассеяния) электромагнитного поля упрощается путем замены пространственно-электрических характеристик поверхностей целей, земли, воды на соответствующие характеристики отраженного сигнала, известные для выбранных диапазонов несущих частот из результатов анализа и обобщения данных натурных экспериментов [6, 7].

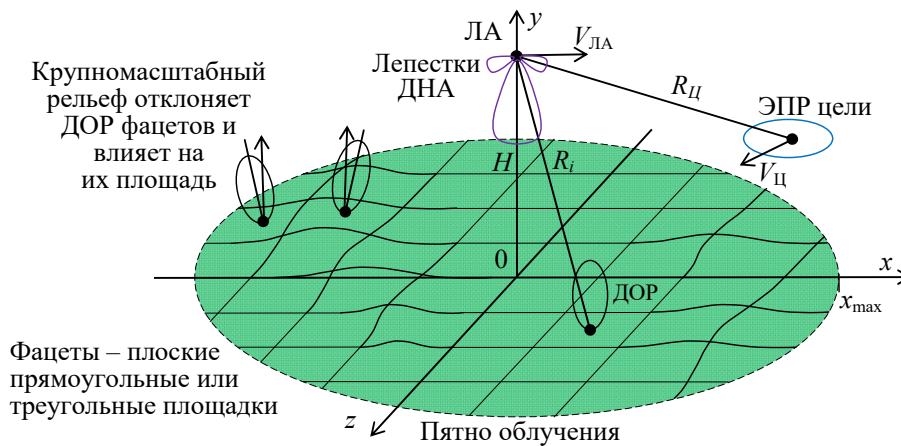


Рис. 1. Геометрия трехмерной модели с фацетной поверхностью и точечной целью

С точки зрения аппаратной реализации модели такое пространство распространения прямого и отраженного сигналов между антеннами РЛС и всей отражающей поверхностью можно представить в виде многоканальной модели (рис. 2), состоящей из n элементарных каналов передачи сигнала с параметрами: задержкой τ_i , затуханием при распространении и отражении сигнала E_i , доплеровским сдвигом частоты Δf_i .

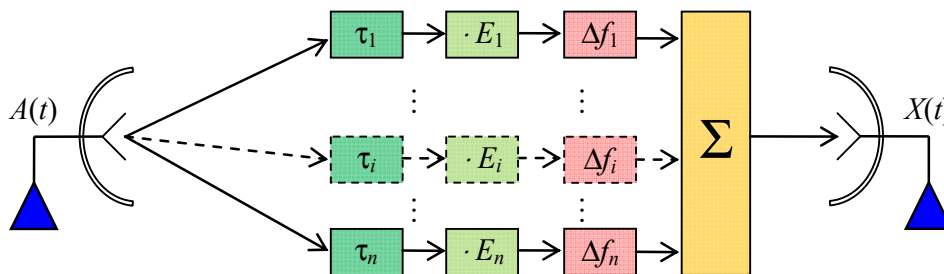


Рис. 2. Многоканальная модель радиолокационного канала распространения сигнала «передающая антенна – отражающая поверхность (цель) – приемная антенна»

Сдвиг частоты Δf_i пропорционален относительной скорости сближения V_i с i -й блестящей точкой и обратно пропорционален длине радиоволны λ :

$$\Delta f_i = 2V_i/\lambda. \tag{1}$$

Все параметры могут меняться во времени. Поэтому зондирующий сигнал $A(t)$ после прохождения канала приобретает в каждый момент времени каждого периода модуляции свою амплитуду, фазу, доплеровский сдвиг частоты, а суммарный отраженный сигнал $X(t)$ будет иметь соответствующие флуктуации амплитуды и фазы, эквивалентные реальной ситуации.

Возможность когерентной обработки сохраняется, так как фаза формируемого сигнала определяется дальностью (задержкой) и исходной фазой зондирующего сигнала, т.е. так же, как и при работе РЛС в обычных условиях.

Качественная реализация имитатора с возможностью смены параметров во времени в аналоговой форме невозможна. В случае использования цифровой обработки сигналов (ЦОС) понадобится организация быстрой последовательной связки высокоскоростных аналого-цифровых преобразователей (АЦП), цифровой линии задержки (ЛЗ), модулей преобразования сигнала по частоте и

амплитуде, цифроаналоговых преобразователей (ЦАП). На рис. 3 приведен такой вариант реализации имитатора протяженной цели.

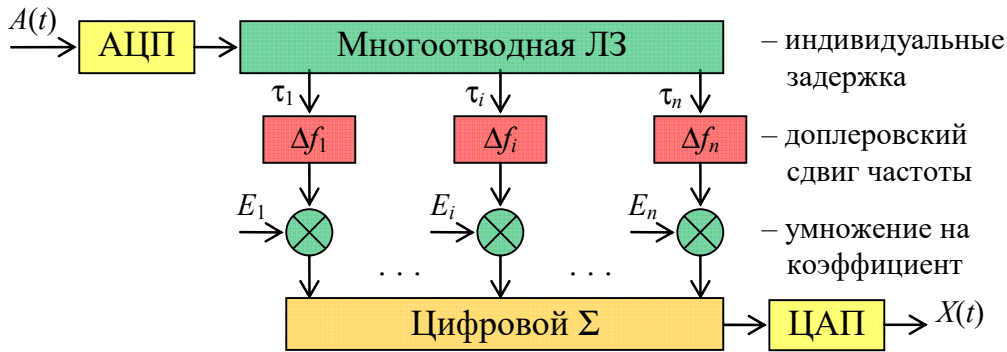


Рис. 3. Формирование отраженного сигнала на базе блоков ЦОС

Непосредственная реализация на СВЧ при современном развитии техники нереализуема, поэтому обработка и формирование сигналов выполняются на низкой частоте в рабочей области частот блоков ЦОС.

Быстродействующий многоходовый цифровой сумматор, набор умножителей и модуляторов Δf для сдвига частоты дорожки для реализации, поэтому в работе [8] предложена конструкция имитатора радиолокационной цели, в которой вместо сумматора и умножителей применены более простые синхронизатор, коммутатор (рис. 4).

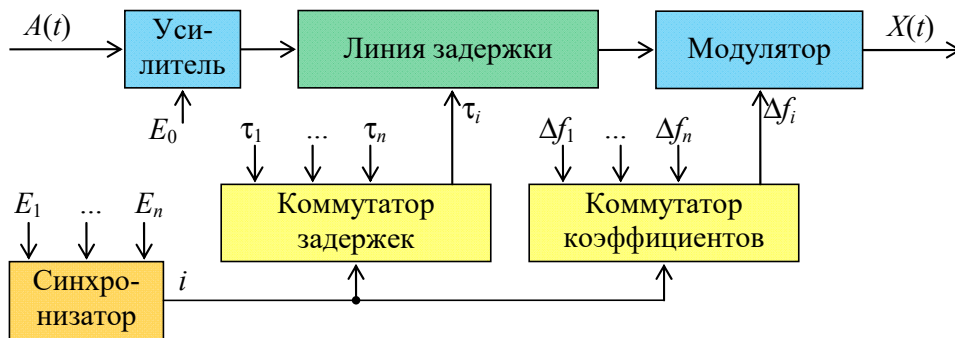


Рис. 4. Схема формирования эквивалентного эхо-сигнала

Здесь коммутаторы подключают к управляющим входам ЛЗ и ЦАП один i -й параметр: τ_i и Δf_i . Возможный принцип работы синхронизатора заключается в последовательном и циклическом наращивании на «+1» его выходного значения i , в диапазоне от 1 до n , причем длительность присутствия значения i пропорциональна соответствующему значению E_i на входе синхронизатора. Поэтому общий амплитудный коэффициент E_0 можно сделать постоянным, но при этом управлять «яркостью» каждой блестящей точки задавая соответствующие значения коэффициентов микширования $E_1 - E_n$. Общее преобразование может быть описано выражением

$$X(t) = K(A(t - \tau_i), \Delta f_i), \quad i = 1 + \sum_{j=1}^n \text{if} \left(\text{cnt}(t) > \sum_{k=1}^j E_k \right), \quad (2)$$

где E_i – относительная амплитуда, соответствующая мощности i -го сигнала; $K(f(t), \Delta f)$ – результат доплеровского сдвига функции $f(t)$ на величину Δf ; τ_i – задержка i -го сигнала; Δf_i – доплеровский сдвиг i -го сигнала; $\text{cnt}(t)$ – значение цифрового счетчика во время t на общем периоде микширования всех сигналов [8]; $\text{if}(\text{условие})$ – функция выдает 1 если «условие» истинно, иначе выдает 0.

При этом выходной сигнал $X(t)$ будет содержать переменные по длительности «кусочки» различных участков входного сигнала $A(t)$, что в частотной области приведет к тому, что к исходным гармоникам сигналов добавятся гармоники, соответствующие сумме и разности частот «полезных»

сигналов и частоты микширования, умноженной на целое число. При выборе базовой частоты работы синхронизатора в несколько раз выше рабочей полосы частот приемника (с учетом фактического наличия во всех РЛС полосового или низкочастотного фильтра сигнала, получаемого после смешивания с гетеродинным сигналом), результирующий сигнал в низкочастотной области будет эквивалентен сигналу, образованному обычным суммированием сигналов.

Допустимое число микшируемых сигналов для примера типового следящего РВ с ЛЧМ зависит и от параметров РВ и от быстродействия цифрового преобразования сигналов:

$$N_{\max} = 1/(\Delta t \cdot (F_{\max} + k_{\text{зап}} \cdot F_{\text{в.б}})), \tag{3}$$

где Δt – средняя длительность интервала микширования; F_{\max} – максимальная частота сигнала в спектре биений РВ; $F_{\text{в.б}}$ – верхняя частота пропускания фильтра сигнала биений; $k_{\text{зап}} \geq 1$ – коэффициент запаса, учитывающий неточное знание параметров РВ.

Существующие на сегодняшний день аппаратные средства не позволяют реализовать имитатор, непосредственно оперирующий с большим числом каналов распространения в режиме реального времени, поэтому для упрощения модели целесообразно сгруппировать отражатели с близкими параметрами: число каналов будет равно числу элементов разбиения на участки близких частот/задержек. При этом эквивалентность основных характеристик и зависимостей моделирования и формирования отраженного сигнала будет определяться аппаратными и программными возможностями выбранной реализации модели.

Возможно сокращение числа блестящих точек путем отбрасывания точек с низкой ЭПР, отстоящих далеко по положению/частоте от основной цели, объединения некоторых близких по параметрам точек и т.п. Например, в [8, 9] приведены способы расчета параметров имитации с сокращением числа имитируемых блестящих точек за счет объединения близких по параметрам отражателей, в том числе близких по дальности и доплеровской частоте.

При короткоимпульсном методе работы радиолокатора или большом числе имитируемых точек микширование (коммутация) параметров основного сигнала в имитаторе приведет к мерцанию (флуктуации по амплитуде) отдельных точек цели. Поэтому для учета особенностей построения, функционирования и применения радиолокатора имитатору желательно определять и подстраиваться под момент начала импульса или смены типа модуляции в зависимости от ассортимента видов сигналов радиолокатора.

На рис. 5 приведена упрощенная схема ретрансляционного имитатора для формирования отраженного сигнала радиодальномера или РВ.

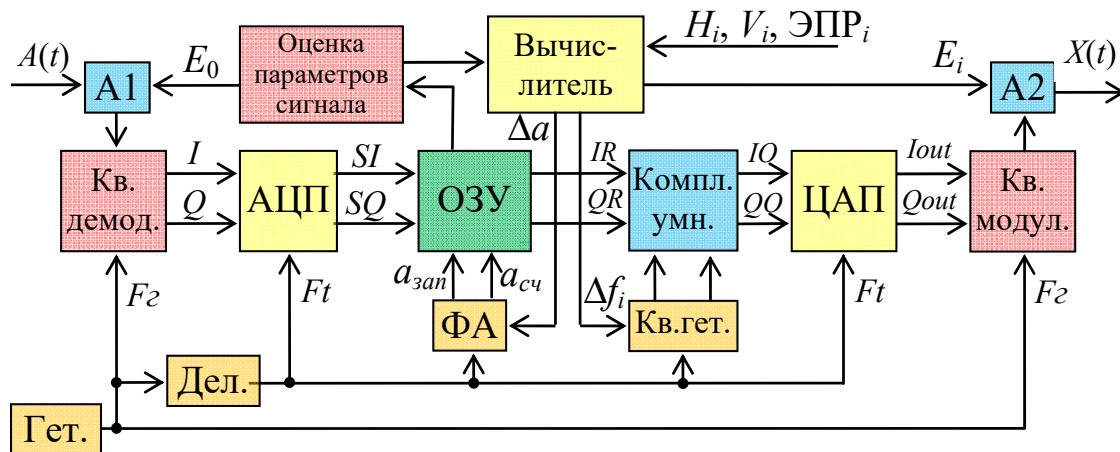


Рис. 5. Схема ретрансляционного имитатора для формирования отраженного сигнала

Зондирующий радиосигнал $A(t)$, поступающий с выхода передатчика, предварительно ослабляется в аттенуаторе А1, затем в квадратурном демодуляторе (Кв. демод.) с использованием сигнала гетеродина (Гет.) частотой F_T переносится с несущей (или промежуточной) частоты на нулевую с разложением на квадратурные составляющие I и Q , оцифровывается в двухканальном АЦП с частотой дискретизации $F_t = F_T/n$, где n – коэффициент деления делителя (Дел.). Далее квадратурные со-

ставляющие сигнала SI и SQ запоминаются в ОЗУ, реализующем функцию линии задержки, затем считываются с индивидуальной задержкой τ_i :

$$\tau_i = 2 H_i / c. \tag{4}$$

Для формирования этой задержки в вычислителе и формирователе адресов (ФА) рассчитывается соответствующая требуемая разность циклических адресов записи $a_{\text{зап}}$ и считывания $a_{\text{сч}}$:

$$\Delta a = (a_{\text{зап}} - a_{\text{сч}}) = \tau_i \cdot Ft. \tag{5}$$

Для учета необходимого доплеровского сдвига частоты сигнала в цифровом умножителе происходит смещение сигнала по частоте путем комплексного умножения квадратурных составляющих сигнала на квадратурный гармонический сигнал с частотой Δf_i от блока «Кв.гет.». Этот сигнал может формироваться, например, типовым для ЦОС блоком – прямого цифрового синтеза (DDS), частота которого рассчитывается в вычислителе (1).

Сформированный сигнал, соответствующий отраженному сигналу от подвижной по дальности цели (высоте ЛА над поверхностью), в квадратурном модуляторе переносится на радиочастоту, ослабляется в аттенюаторе А2 на величину E_i (для имитации затухания, соответствующего дальности и ЭПР,) и излучается либо подается непосредственно на вход радиоприемника РВ/РЛС при лабораторном тестировании.

Цифровая часть схемы (см. рис. 5), от АЦП до ЦАП включительно, может быть реализована с использованием отдельных микросхем либо с использованием комплексных решений – «систем на кристалле», например СБИС 1879ВМ3(DSM) [10], разработанная для использования в устройствах с цифровой радиочастотной памятью (DRFM). В указанной специализированной СБИС имеются восемь параллельных «сигнальных каналов» для выполнения базовых функций ЦОС. Поэтому один сигнальный канал программируется на запись в ОЗУ и от 1 до 7 каналов работают на считывание для нескольких имитируемых блестящих точек или сгруппированных по дальности отражателей [8, 11].

Очевидно, что значения адресов $a_{\text{зап}}$ и $a_{\text{сч}}$ – целые числа, что является причиной дискретности такого способа изменения задержки сигнала. Для примера, для СБИС 1879ВМ3 с учетом блочной потоковой обработки сигнальных отсчетов (дискрет умножается на размер блока равный 8 отсчетов в блоке) дискрет $\Delta H = 2$ м при тактовой частоте АЦП, ЦАП $Ft = 600$ МГц.

Исключение этой погрешности имитации возможно путем варьирования тактовой частоты ЦОС (в рассмотренной схеме при изменении частоты гетеродина F_2 пропорционально меняется и дискрет установки имитируемой дальности) либо при использовании двух независимых ФА, работающих от разных гетеродинов (рис. 6): плавное изменение частоты будет сопровождаться плавным «вариативным» изменением имитируемой дальности [12].

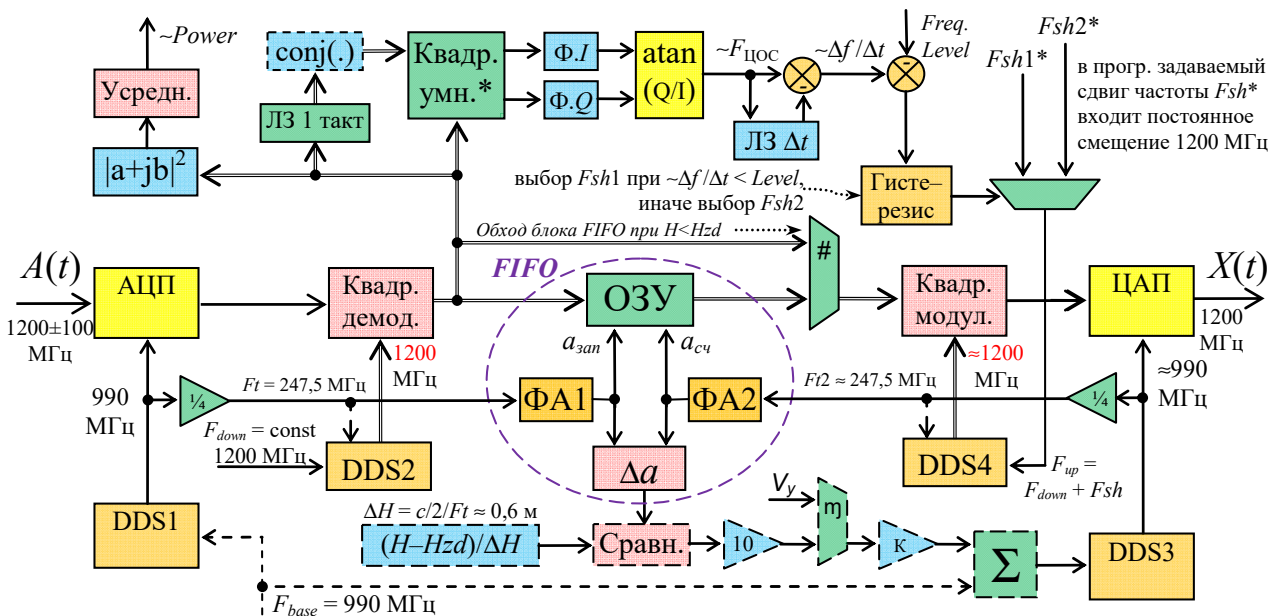


Рис. 6. Схема имитатора с вариативным принципом формирования эхо-сигнала

Здесь блок « Δa » выполняет контроль работы буферной памяти типа *FIFO*, работающий в соответствии с (5). Так как здесь используются два различных формирователя адресов, то дискретная ошибка устраняется, несмотря на целочисленное значение разницы адресов записи $a_{\text{зап}}$ и считывания $a_{\text{сч}}$. Если в блоке сравнения $\Delta a = (a_{\text{зап}} - a_{\text{сч}})$ не соответствует заданной задержке $nDelay = \text{round}((H - H_{zd})/\Delta H)$, где $\Delta H = c/2Ft \approx 0,6$ м, H – заданная высота, H_{zd} – минимальная задержка в имитаторе, то блок прямого цифрового синтеза DDS3 изменяет тактовую частоту работы квадратурного модулятора и ЦАП.

Реализация такого имитатора выполнена на модуле «Деталь-ЦОС-В1», содержащего систему на кристалле XC7Z045 семейства *Zynq-7000 All-Programmable System on Chip (AP SoC)*, включающую двухядерный процессор *ARM CORTEX A9* 1 ГГц и ПЛИС семейства *Kintex-7*. Блоки, выделенные на рис. 6 штриховой линией, реализуются программно в процессоре. Более подробное описание схемы и алгоритма ЦОС, а также преимущества работы имитатора с различными ЛЧМ зондирующими сигналами приведены в работе [12].

На рис. 7 приведена схема измерений при полунатурном моделировании работы радиодальномеров с ЛЧМ, позволяющая получать показания РВ по цифровому интерфейсу, исследовать сигнал биений РВ во временной и частотной области. При исследованиях применялся цифровой осциллограф Актакон АСК-4106. С помощью ПО анализа сигналов во временной и частотной областях оценивались параметры спектра сигнала биений, период модуляции и измеренная высота.

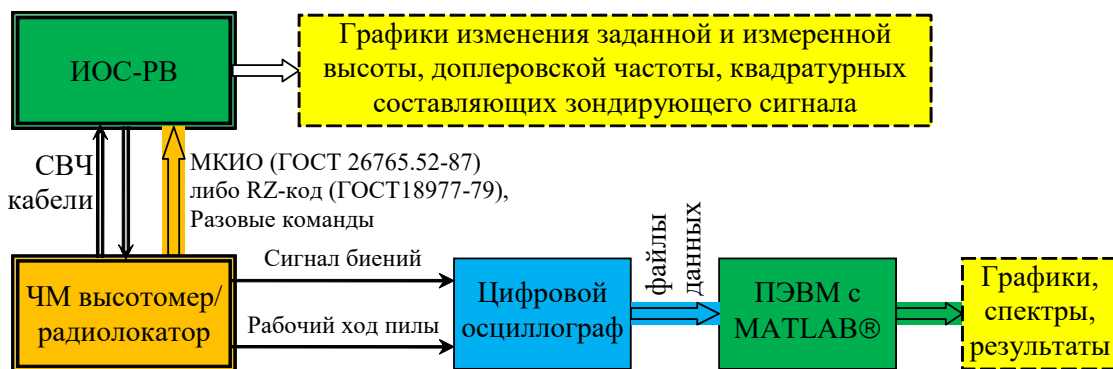


Рис. 7. Схема измерений при полунатурном моделировании с помощью ИОС-РВ

По результатам экспериментов для типового следящего РВ с ЛЧМ возможно формирование «сплошных» спектров с шириной до 10 КГц, т.е. 30 % (при анализе одного периода модуляции при средней частоте биений 30 КГц), которых достаточно для имитации протяженных поверхностей при наличии скорости и эволюций ЛА. Пример показан на рис. 8: семь отражателей с дальностями от 500 до 555 м с шагом 9,2 м получены путем чередования семи сигнальных каналов.

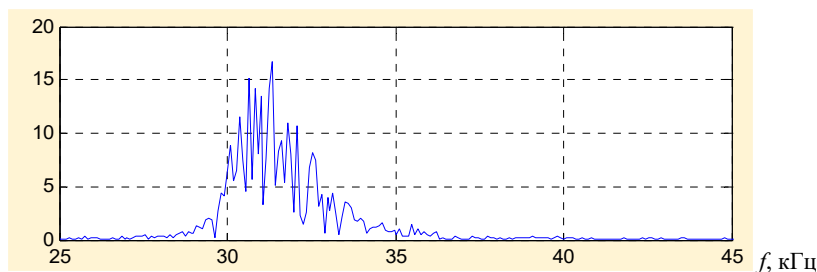


Рис. 8. Спектр сигнала биений при микшировании семи сигнальных каналов

Соответствующий вид сигнала биений показан на рис. 9 (внизу тот же график в увеличенном масштабе). Максимальная амплитуда сигнала биений через каждые 11 мс (длительностью около 0,3 мс) соответствует «обратному ходу» пилы ЧМ и при оценке характеристик РВ не используется. Амплитудная модуляция сигнала носит периодический характер, свидетельствующий о наличии всего нескольких сильных гармоник.

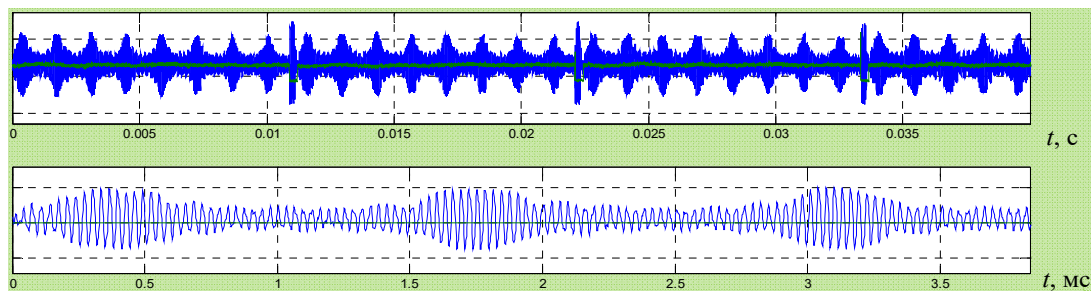


Рис. 9. Вид сигнала биений типового РВ при наличии семи отражателей

Заключение

Показано, что для формирования радиолокационных эхо-сигналов типовых радиолокаторов с переменными параметрами необходима реализация суммирования либо микширования копий зондирующего сигнала с разными задержками, амплитудами, частотными сдвигами. На базе модели и с одновременным учетом угловых эволюций и скорости ЛА, параметров ДНА и ДОР возможна группировка отражателей, расчет параметров заданного количества каналов формирования и передача их в имитатор сигнала на базе модулей ЦОС в реальном масштабе времени.

Использование микширования работы сигнальных каналов показало возможностькратно увеличить число имитируемых блестящих точек либо существенно упростить построение цифровой части имитатора. Возможность когерентной обработки сохраняется, так как фаза формируемого (имитирующего отражение от каждой точки цели) сигнала определяется дальностью (задержкой) и исходной фазой зондирующего сигнала, а возможная флуктуация амплитуд усредняется на нескольких периодах модуляции и сканирования.

Для полной компенсации дискрета по задержке распространения в имитаторе предложено гибко управлять тактовыми частотами блоков ЦОС. Рассмотренный метод относительно прост в реализации для имитации как точечных, так и распределенных целей.

Комплекс ПНМ позволяет многократно воссоздавать и повторять все моделируемые условия, что дает возможности усовершенствования алгоритмов работы и взаимодействия бортовых систем ЛА, выполнения сквозной проверки всей аппаратуры во всех летных режимах для типовых, граничных, а также для «запредельных» сочетаний параметров траектории и фоноцелевой обстановки.

Библиографический список

1. Пат. 2177160 Российская Федерация, МПК G01S7/38. Станция ретрансляционного типа однократных имитирующих помех доплеровским радиолокационным станциям / Блохин В. П., Жмуров Е. А., Быков Ф. М., Артюх В. В., Осыко М. В. – Заявл. 09.01.2001 ; опубл. 20.12.2001.
2. Технология полунатурного моделирования // Сайт ФГУП «ГосНИИАС». – URL: <http://www.gosniias.ru/pages/tpm.html> (проверен 19.03.2019).
3. Применение фацетной модели для имитации радиолокационного сигнала, отраженного от подстилающей поверхности / А. С. Боков, В. Г. Важенин // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. – 2012. – Т. 7. – С. 55–61.
4. Зубкович, С. Г. Статистические характеристики радиосигналов, отраженных от земной поверхности / С. Г. Зубкович. – Москва : Сов. радио, 1968. – 224 с.
5. Борзов, А. Б. Математическое моделирование входных сигналов бортовых систем ближней радиолокации от подстилающих поверхностей на основе их многоточечных моделей / А. Б. Борзов, К. П. Лихоеденко, Ю. В. Каракулин, В. Б. Сучков // Успехи современной радиоэлектроники. – 2017. – № 4. – С. 48–57.
6. Ulaby, F. T. Handbook of Radar Scattering Statistics for Terrain / F. T. Ulaby, M. C. Dobson. – Artech House, Inc., Dedham, Mass., 1989. – 362 p.
7. Баскаков, А. И. Локационные методы исследования объектов и сред : учебник для студ. учреждений высш. проф. образования / А. И. Баскаков, Т. С. Жутяева, Ю. И. Лукашенко ; под ред. А. И. Баскакова. – Москва : Академия, 2011. – 384 с.
8. Пат. 2568899 Российская Федерация. Имитатор радиолокационной цели при зондировании преимущественно длительными сигналами / Боков А. С., Дядьков Н. А., Важенин В. Г., Мухин В. В., Щербатов Д. Е., Пономарев Л. И. – Опубл. 20.09.2015, Бюл. № 26.
9. Пат. 2386143 Российская Федерация. Способ имитации радиосигнала, отраженного от пространственно распределенной динамической радиофизической сцены, в реальном времени / Герасимов А. Б., Киселева Ю. В., Кренев А. Н. – Опубл. 10.04.2010, Бюл. № 10.
10. Процессор 1879BM3. – URL: <http://module.ru/upload/files/vm3.pdf> (проверен 19.03.2019).

11. Возможности исследования точностных характеристик бортовых радиовысотометрических систем на базе имитатора отраженных сигналов / А. С. Боков, В. Г. Важенин, Н. А. Дядьков, А. А. Иофин, В. В. Мухин // Надежность и качество сложных систем. – 2016. – № 1 (13). – С. 86–93.
12. Учет переменных параметров линейной частотной модуляции в имитаторе отраженных сигналов для радиовысотометров / А. С. Боков, В. Г. Важенин, А. В. Гусев, Д. Ж. Нагашибаев, А. А. Иофин // Надежность и качество сложных систем. – 2017. – № 3 (19). – С. 60–67.

References

1. Pat. 2177160 Russian Federation, МПК G01S7/38. *Stantsiya retranslyatsionnogo tipa odnokratnykh imitiruyushchikh pomekh doplerovskim radiolokatsionnym stantsiyam* [Pat. 2177160 Russian Federation, IPC G01S7/38. Station a relay type single-simulating interference Doppler radar stations]. Blokhin V. P., Zhmurov E. A., Bykov F. M., Artyukh V. V., Osyko M. V. Appl. 09.01.2001; publ. 20.12.2001. [In Russian]
2. *Tekhnologiya polunaturalnogo modelirovaniya* [Technology of semi-natural modeling]. Sayt FGUP «GosNIAS». Available at: <http://www.gosnias.ru/pages/tpm.html> (accessed 19.03.2019). [In Russian]
3. Bokov A. S., Vazhenin V. G. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy Rossii. Radioelektronika* [Proceedings of higher educational institutions of Russia. Radionics]. 2012, vol. 7, pp. 55–61. [In Russian]
4. Zubkovich S. G. *Statisticheskie kharakteristiki radiosignalov, otrazhennykh ot zemnoy poverkhnosti* [Statistical characteristics of radio signals reflected from the earth's surface]. Moscow: Sov. radio, 1968, 224 p. [In Russian]
5. Borzov A. B., Likhoedenko K. P., Karakulin Yu. V., Suchkov V. B. *Uspekhi sovr. Radioelektroniki* [Advances in modern electronics]. 2017, no. 4, pp. 48–57. [In Russian]
6. Ulaby F. T., Dobson M. C. *Handbook of Radar Scattering Statistics for Terrain*. Artech House, Inc., Dedham, Mass., 1989, 362 p.
7. Baskakov A. I., Zhutyayeva T. S., Lukashenko Yu. I. *Lokatsionnye metody issledovaniya ob"ektov i sred: uchebnik dlya stud. uchrezhdeniy vyssh. prof. obrazovaniya* [Location methods of objects and media research: a textbook for students. institutions of higher education. Professor of education]. Moscow: Akademiya, 2011, 384 p. [In Russian]
8. Pat. 2568899 Russian Federation. *Imitator radiolokatsionnoy tseli pri zondirovanii preimushchestvenno dlitel'nymi signalami* [Pat. 2568899 Russian Federation. Radar target simulator when probing mainly with long-term signals]. Bokov A. S., Dyad'kov N. A., Vazhenin V. G., Mukhin V. V., Shcherbakov D. E., Ponomarev L. I. Publ. 20.09.2015, bull. no. 26. [In Russian]
9. Pat. 2386143 Russian Federation. *Sposob imitatsii radiosignala, otrazhennogo ot prostranstvenno raspredelennoy dinamicheskoy radiofizicheskoy stseny, v real'nom vremeni* [Pat. 2386143 Russian Federation. A method for real-time simulation of a radio signal reflected from a spatially distributed dynamic radiophysical scene]. Gerasimov A. B., Kiseleva Yu. V., Krenev A. N. Publ. 10.04.2010, bull. no. 10. [In Russian]
10. *Protessor 1879VM3*. Available at: <http://module.ru/upload/files/vm3.pdf> (accessed 19.03.2019).
11. Bokov A. S., Vazhenin V. G., Dyad'kov N. A., Iofin A. A., Mukhin V. V. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem* [Reliability and quality of complex systems]. 2016, no.1 (13), pp. 86–93. [In Russian]
12. Bokov A. S., Vazhenin V. G., Gusev A. V., Nagashibaev D. Zh., Iofin A. A. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem* [Reliability and quality of complex systems]. 2017, no. 3 (19), pp. 60–67. [In Russian]

Боков Александр Сергеевич

кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
департамент радиоэлектроники и связи,
Институт радиоэлектроники
и информационных технологий,
Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина
(620002, Россия, г. Екатеринбург, ул. Мира, 32)
E-mail: a.s.bokov@urfu.ru

Важенин Владимир Григорьевич

кандидат технических наук, доцент,
департамент радиоэлектроники и связи,
Институт радиоэлектроники
и информационных технологий,
Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина
(620002, Россия, г. Екатеринбург, ул. Мира, 32)
E-mail: v.g.vazhenin@urfu.ru

Bokov Aleksandr Sergeevich

candidate of technical sciences,
senior scientist researcher,
department of radioelectronics and communications,
Institute of Radioelectronics
and Information Technologies,
Ural Federal University
named after the first President of Russia B. N. Yeltsin
(620002, 32 Mira street, Ekaterinburg, Russia)

Vazhenin Vladimir Grigor'evich

candidate of technical sciences, associate professor,
department of radioelectronics and communications,
Institute of Radioelectronics
and Information Technologies,
Ural Federal University
named after the first President of Russia B. N. Yeltsin
(620002, 32 Mira street, Ekaterinburg, Russia)

Иофин Александр Аронович

кандидат технических наук,
заместитель главного конструктора,
Уральское проектно-конструкторское бюро «Деталь»
(623409, Россия, Свердловская обл.,
г. Каменск-Уральский, ул. Пионерская, 8)
E-mail: upkb@nexcom.ru

Мухин Владимир Витальевич

кандидат технических наук,
заместитель генерального директора-
главного конструктора по НИОКР,
Уральское проектно-конструкторское бюро «Деталь»
(623409, Россия, Свердловская обл.,
г. Каменск-Уральский, ул. Пионерская, 8)
E-mail: upkb@nexcom.ru

Iofin Aleksandr Aronovich

candidate of technical sciences, deputy chief designer,
Ural design bureau "Detal"
(623409, 8 Pionerskaya street, Kamensk-Uralsky,
Sverdlovsk Region, Russia)

Mukhin Vladimir Vital'evich

candidate of technical sciences,
deputy general director-chief designer
for reseach and development,
Ural design bureau "Detal"
(623409, 8 Pionerskaya street, Kamensk-Uralsky,
Sverdlovsk Region, Russia)

Образец цитирования:

Боков, А. С. Ретрансляционный имитатор сигналов для проверки характеристик бортовых радиолокационных систем и устройств / А. С. Боков, В. Г. Важенин, А. А. Иофин, В. В. Мухин // Надежность и качество сложных систем. – 2019. – № 3 (27). – С. 40–49. – DOI 10.21685/2307-4205-2019-3-5.

ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

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

УДК 62.192

DOI 10.21685/2307-4205-2019-3-6

Г. С. Садыхов, С. С. Кудрявцева, В. С. Калашников

РАСЧЕТ И ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ РЕСУРСА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ПРИНУДИТЕЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЙ НА ОТКАЗ НЕВОССТАНАВЛИВАЕМЫХ ОБЪЕКТОВ¹

G. S. Sadykhov, S. S. Kudryavtseva, V. S. Kalashnikov

CALCULATION AND ESTIMATION OF USEFUL OPERATION TIME BASED ON FORCED FAILURE TESTS OF IRREPARABLE ITEMS

Аннотация. *Актуальность и цели.* Актуальная проблема оценки показателей остаточного ресурса занимает главенствующее положение в теории надежности. Однако расчет ресурса по результатам принудительных испытаний на отказ невосстанавливаемых объектов исследован в неполной мере. *Материалы и методы.* Для невосстанавливаемых в результате принудительных испытаний на отказ технических объектов выведены непараметрические формулы расчета показателей ресурса. Доказана теорема для оценки среднего ресурса для равномерного закона распределения. Показано, что полученное утверждение справедливо при оценке среднего ресурса и для других параметрических законов, например, что для экспоненциального закона распределения безотказных наработок существуют только два значения гамма-процентных ресурсов, среднее арифметическое значение которых равно среднему ресурсу. Представлена графическая интерпретация гамма-процентных ресурсов, статистическая (точечная) оценка гамма-

Abstract. *Background.* The actual problem in measuring residual resource takes a leading position in reliability theory. However, the calculation of the resource based on the results of the forced tests on the refusal of the unrecoverable objects researched in not sufficiently. *Materials and methods.* For non-restorable by forced tests on the refusal of technical objects withdrawn non-parametric formulas for calculating resource. A theorem for estimating the average resource for equitable distribution law. It is shown that the resulting statement is true when evaluating the secondary resource for other parametric laws that, for example, for exponential distribution law of tailor-made developments there are only two values of gamma-interest resources the arithmetic mean is equal to the average resource. Represented by a graphical interpretation of gamma-interest resources, statistical (dot) evaluation of gamma per cent resource, as well as the lower limit of the trust. *Conclusions.* Proposed non-parametric calculation formula and resource estimates for non-restorable by forced endurance tests on failure of technical objects.

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 07-08-00574-а, № 10-08-00607-а).

процентного ресурса, а также нижняя доверительная граница показателя. *Выводы.* Предложены непараметрические формулы расчета и оценок показателей ресурса для невозстанавливаемых в результате принудительных ресурсных испытаний на отказ технических объектов.

Ключевые слова: вероятность безотказной работы, средний ресурс, гамма-процентный ресурс, принудительные испытания на отказ.

Keywords: reliability function, mean life, gamma-percentile life, forced failure tests.

Постановка задачи

Пусть γ – заданная доля единицы ($0 < \gamma < 1$) и $P(t)$ – вероятность безотказной работы невозстанавливаемого в результате отказа технического объекта в течение времени t . Тогда показатель гамма-процентный ресурс t_γ определяется из уравнения [1]

$$P(t) = \gamma \tag{1}$$

как решение относительно времени t , ($t = t_\gamma$).

Помимо этого показателя также используется другой показатель – средний ресурс r , который рассчитывается по формуле [2]

$$r = \int_0^{\infty} P(t) dt. \tag{2}$$

Из уравнений (1) и (2) видно, что эти показатели можно определить, если задана вероятность безотказной работы как функции времени t на всей временной оси. Например, если

$$P(t) = \exp(-\lambda t),$$

на всей временной оси $t > 0$, где $\lambda > 0$ – постоянная, то эти показатели соответственно равны [3]

$$t_\gamma = \frac{-\ln \gamma}{\lambda}, \tag{3}$$

$$r = \frac{1}{\lambda}. \tag{4}$$

Однако в инженерных задачах вероятность безотказной работы как функция времени t , как правило, неизвестна. Тогда возникает задача: как рассчитать и оценить эти показатели в этом непараметрическом случае?

Решению этой задачи посвящена настоящая работа.

Расчет среднего ресурса

Найдем связь между показателями ресурса. Для этого докажем следующее утверждение.

Теорема. Для среднего ресурса r справедлива следующая формула:

$$r = \frac{1}{2} \int_0^1 (t_\gamma + t_{1-\gamma}) d\gamma, \tag{5}$$

где t_γ и $t_{1-\gamma}$ – гамма-процентные ресурсы при уровнях соответственно γ и $1-\gamma$, ($0 < \gamma < 1$).

Доказательство. Используя формулы (2) и (1), имеем

$$r = \int_1^0 \gamma dt_\gamma.$$

Отсюда интегрируя по частям, получим

$$r = \gamma t_{\gamma} \Big|_1^0 - \int_1^0 t_{\gamma} d\gamma.$$

Так как проинтегрированная часть равна нулю, то, поменяв местами пределы интегрирования, имеем

$$r = \int_0^1 t_{\gamma} d\gamma. \tag{6}$$

Далее, сделав замену переменных в интеграле (6), получим

$$r = - \int_1^0 t_{1-\gamma} d\gamma.$$

Откуда, поменяв местами пределы интегрирования, имеем

$$r = \int_0^1 t_{1-\gamma} d\gamma. \tag{7}$$

Сложив формулы (6) и (7), получим

$$2r = \int_0^1 (t_{\gamma} + t_{1-\gamma}) d\gamma.$$

Далее, разделив обе части на 2, найдем искомую формулу (5), что доказывает теорему. Например, для равномерно распределенного ресурса на отрезке времени l имеем [4]

$$P(t) = 1 - \frac{t}{l}, \quad (0 < t < l),$$

откуда, используя определение (1), получим гамма-процентные ресурсы, равные

$$t_{\gamma} = l(1 - \gamma), \quad t_{1-\gamma} = l\gamma. \tag{8}$$

Подставляя полученные выражения (8) в формулу (5), найдем средний ресурс r , равный

$$r = \frac{l}{2}. \tag{9}$$

Точно так же можно найти средний ресурс для других параметрических законов [5–20].

Формула (9) имеет физическую интерпретацию, а именно: центр тяжести однородного стержня длиной l лежит в середине этого стержня.

Из теоремы вытекает следующее утверждение.

Следствие. Существует, по крайней мере, два значения гамма-процентных ресурсов t_{γ_0} и $t_{1-\gamma_0}$, среднее арифметическое значение которых равно среднему ресурсу, т.е.

$$r = \frac{t_{\gamma_0} + t_{1-\gamma_0}}{2}. \tag{10}$$

Найдем эти значения гамма-процентных ресурсов для известных законов безотказных наработок.

Рассмотрим вначале экспоненциальный закон распределения ресурса. Согласно (10) с учетом формул (3) и (4) имеем

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{-\ln \gamma_0 - \ln(1 - \gamma_0)}{2\lambda},$$

откуда получим

$$\ln(\gamma_0(1-\gamma_0)) = -2,$$

или, упрощая, найдем

$$\gamma_0^2 - \gamma_0 + e^{-2} = 0.$$

Решая полученное квадратное уравнение, имеем следующие корни:

$$\gamma_0^{(1)} = 0,84; \quad \gamma_0^{(2)} = 0,16.$$

Следовательно, только два значения гамма-процентных ресурсов $t_{0,84}$ и $t_{0,16}$ удовлетворяют формуле (10).

Это означает, что для экспоненциального закона распределения безотказных наработок существуют только два значения гамма-процентных ресурсов $t_{0,84}$ и $t_{0,16}$, среднее арифметическое значение которых равно среднему ресурсу.

Рассмотрим теперь равномерный закон распределения ресурса на временном отрезке l .

Согласно формуле (10) с учетом формул (8) и (9) имеем

$$\frac{l}{2} = \frac{l(1-\gamma) + l\gamma}{2}.$$

Видно, что это равенство справедливо при любом значении γ , ($0 < \gamma < 1$). Следовательно, для равномерного закона распределения ресурса существует бесконечное множество значений гамма-процентных ресурсов, удовлетворяющих условию (10).

Графическая интерпретация гамма-процентных ресурсов

Построим график функции t_γ в зависимости от значений, принимаемых переменной γ , ($0 < \gamma < 1$).

Так как согласно (1)

$$P(t_\gamma) = \gamma,$$

то

$$P'(t_\gamma) \frac{dt_\gamma}{d\gamma} = 1.$$

Откуда находим

$$\frac{dt_\gamma}{d\gamma} = \frac{1}{P'(t_\gamma)}. \quad (11)$$

Поскольку функция $P(t)$ монотонно убывает, то правая часть (11) отрицательна. Значит, функция t_γ , как функция переменной γ , так же монотонно убывает.

Взяв вторую производную от соотношения (11), найдем

$$\frac{d^2 t_\gamma}{d\gamma^2} = \frac{-P''(t_\gamma)}{(P'(t_\gamma))^2} \cdot \frac{dt_\gamma}{d\gamma}.$$

Так как

$$P''(t_\gamma) \geq 0,$$

то с учетом (11) получим

$$\frac{d^2 t_\gamma}{d\gamma^2} \geq 0.$$

Следовательно, функция t_γ выпукла вниз и ось ординат $\gamma=0$ является вертикальной асимптотой. Примерный график этой функции изображен на рис. 1 для всех законов распределения ресурса, за исключением равномерного.

Заметим, что равномерный закон распределения ресурса является исключением из общего правила, поскольку согласно (8) графиком функции t_γ служит отрезок прямой. Примерный график этой функции для этого закона изображен на рис. 2.

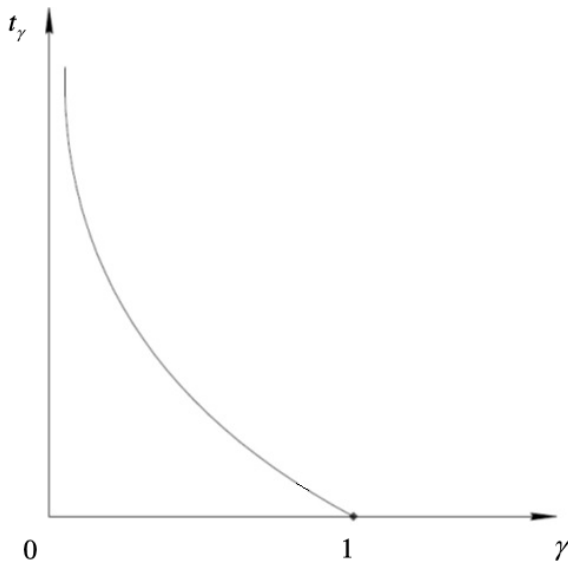


Рис. 1. Общий график функции t_γ

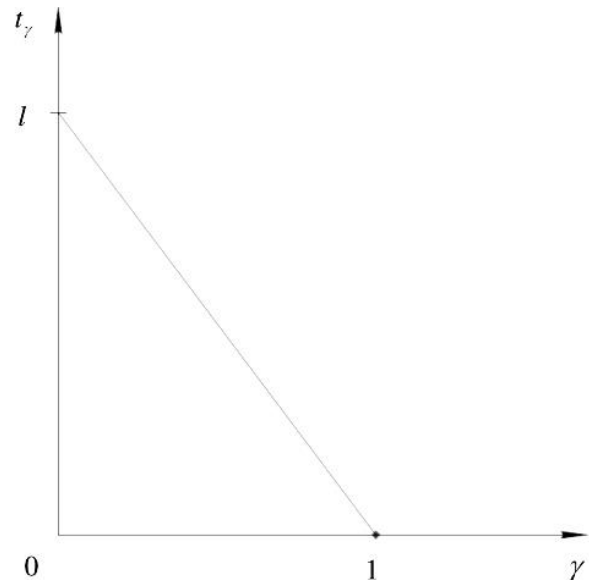


Рис. 2. График функции t_γ для равномерного закона распределения ресурса

В заключение отметим, что площадь под кривой t_γ согласно (6) равна среднему ресурсу. Это наглядно демонстрирует треугольник на рис. 2, площадь которого равна $l/2$.

Статистическая (точечная) оценка гамма-процентного ресурса

Пусть R – объем выборки однотипных невосстанавливаемых объектов для проведения ресурсных испытаний. И пусть испытания проводят до появления, например, второго отказавшего объекта. Такие испытания называют принудительными [20]. Для определенности положим, что z_2 – наработка до отказа этого объекта, где $z_2 > z_1$; здесь z_1 – безотказная наработка первого отказавшего объекта. Тогда докажем следующую формулу для расчета статистической (точечной) оценки гамма-процентного ресурса:

$$\hat{t}_\gamma = z_1 + \alpha_1 (z_2 - z_1), \tag{12}$$

здесь значение γ должно удовлетворять условию

$$\hat{P}(z_2) \leq \gamma < \hat{P}(z_1), \tag{13}$$

где

$$\alpha_1 = R(1-\gamma) - 1; \tag{14}$$

$$\hat{P}(z_1) = 1 - \frac{1}{R}, \quad \hat{P}(z_2) = 1 - \frac{2}{R} - \tag{15}$$

статистические (точечные) оценки вероятности безотказной работы объекта в течение времени z_1 и z_2 соответственно.

Для доказательства воспользуемся рис. 3, где сплошной линией изображен график функции $P(t)$, а на оси абсцисс – истинное значение показателя t_γ , его точечная (статистическая) оценка \hat{t}_γ ; z_1 – наработка до отказа первого отказавшего объекта; z_2 – наработка до отказа второго объекта. На отрезке времени (z_1, z_2) вероятность безотказной работы объекта $P(t)$ аппроксимируется отрезком прямой оценочной вероятности безотказной работы $\hat{P}(t)$. При этом

$$P(z_1) = \hat{P}(z_1), P(z_2) = \hat{P}(z_2).$$

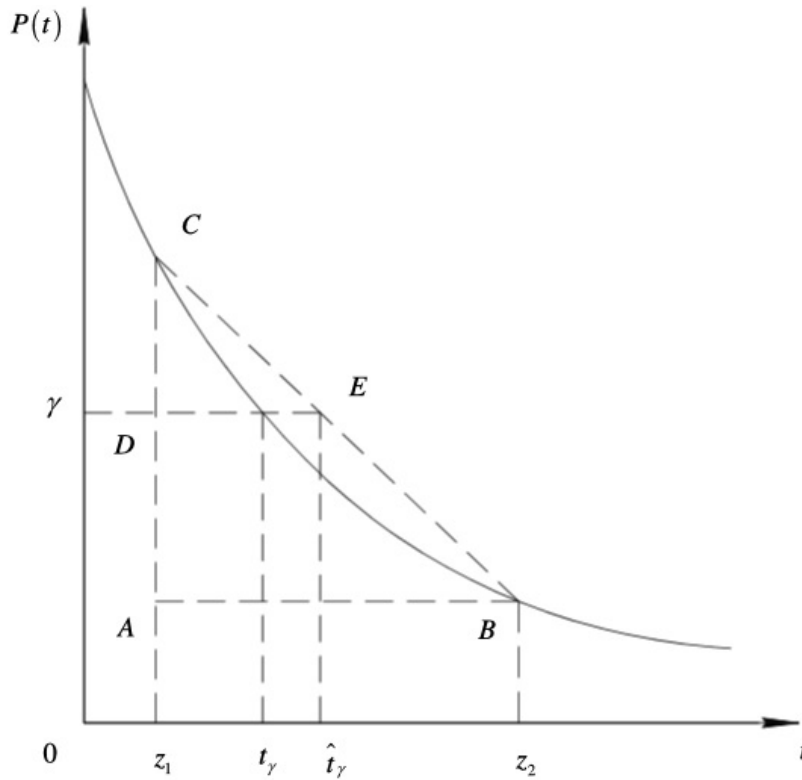


Рис. 3. Статистическая (точечная) оценка показателя t_γ

На рис. 3 видно, что треугольник ABC подобен треугольнику DEC . Следовательно, соответствующие катеты прямоугольных треугольников пропорциональны, т.е.

$$\frac{DE}{AB} = \frac{DC}{AC}. \tag{16}$$

Так как

$$DE = \hat{t}_\gamma - z_1,$$

$$AB = z_2 - z_1,$$

$$DC = \hat{P}(z_1) - \gamma,$$

$$AC = \hat{P}(z_1) - \hat{P}(z_2),$$

то согласно формуле (16) имеем

$$\frac{\hat{t}_\gamma - z_1}{z_2 - z_1} = \frac{\hat{P}(z_1) - \gamma}{\hat{P}(z_1) - \hat{P}(z_2)}.$$

Правая часть полученного соотношения согласно выражению (15) равна выражению (14). Следовательно, получим

$$\frac{\hat{t}_\gamma - z_1}{z_2 - z_1} = \alpha_1,$$

откуда найдем

$$\hat{t}_\gamma - z_1 = \alpha_1(z_2 - z_1),$$

что доказывает формула (12).

Заметим, что коэффициент (14) удовлетворяет условию

$$0 < \alpha_1 \leq 1. \tag{17}$$

В самом деле, используя уравнение (13), получим

$$R(1 - \hat{P}(z_1)) < R(1 - \gamma) \leq R(1 - \hat{P}(z_2)),$$

откуда согласно формуле (15) найдем

$$0 < R(1 - \gamma) - 1 \leq 1,$$

что доказывает формула (17).

Пример. Десять однотипных объектов поставлены на принудительные ресурсные испытания до обнаружения двух отказавших объектов. Пусть z_1, z_2 – наработки до отказа первого и второго отказавших объектов соответственно. Рассчитать статистическую (точечную) оценку показателя $\hat{t}_{0,85}$.

Решение. Согласно условиям примера имеем $R = 10, \gamma = 0,85$. Так как уровень $\gamma = 0,85$ удовлетворяет условию (13), где

$$\hat{P}(z_1) = 1 - \frac{1}{10} = 0,9; \quad \hat{P}(z_2) = 1 - \frac{2}{10} = 0,8,$$

то по формуле (14) находим

$$\alpha_1 = 10(1 - 0,85) - 1 = 0,5.$$

Следовательно, искомая оценка согласно формуле (12) будет равна

$$\hat{t}_{0,85} = z_1 + 0,5(z_2 - z_1) = 0,5(z_1 + z_2).$$

Возникает вопрос: достижима ли оценка (12)? Другими словами, существует ли такой пример, когда фактическое значение показателя совпадает с расчетной оценкой?

Покажем, что такой пример, демонстрирующий достижимость оценки (12), существует.

Пусть в этом примере объем выборки R равен 5 и $\gamma = 0,6$. Очевидно, что в этом случае фактическое значение показателя согласно его определению равно

$$t_{0,6} = z_2, \tag{18}$$

так как

$$P(z_2) = 1 - \frac{2}{5} = 0,6,$$

где z_2 – наработка до отказа второго отказавшего объекта.

Поскольку уровень $\gamma=0,6$ удовлетворяет условию (13), где $\hat{P}(z_1)=1-\frac{1}{5}=0,8$, $\hat{P}(z_2)=1-\frac{2}{5}=0,6$, то по формуле (14) имеем

$$\alpha_1 = 5(1 - 0,6) - 1 = 1.$$

Тогда расчетное значение статистической (точечной) оценки согласно формуле (12) равно

$$\hat{t}_{0,6} = z_1 + (z_2 - z_1) = z_2,$$

что совпадает с фактическим значением (18). Следовательно, оценка (12) достижима.

Заметим, что если принудительные ресурсные испытания провести для выборки объектов объемом R до появления первого отказавшего объекта, то можно доказать, что статистической оценкой гамма-процентного ресурса служит величина

$$\hat{t}_\gamma = \alpha_0 z_1. \tag{19}$$

Здесь значение γ должно удовлетворять условию

$$\hat{P}(z_1) \leq \gamma < 1, \tag{20}$$

где

$$\alpha_0 = R(1 - \gamma). \tag{21}$$

Используя формулу (20) в (21), найдем

$$0 < \alpha_0 \leq 1.$$

Очевидно, что принудительные ресурсные испытания можно проводить до количества появления отказавших объектов в количестве $i+1$, где $i=0,1,2,\dots,R-1$. В этом случае можно доказать следующую формулу для расчета статистической (точечной) оценки гамма-процентного ресурса:

$$\hat{t}_\gamma = z_i + \alpha_i (z_{i+1} - z_i), \tag{22}$$

где

$$\alpha_i = R(1 - \gamma) - i, \tag{23}$$

при этом значение γ должно удовлетворять условию

$$\hat{P}(z_{i+1}) \leq \gamma < P(z_i), \tag{24}$$

где

$$\hat{P}(z_i) = 1 - \frac{i}{R}; \quad \hat{P}(z_{i+1}) = 1 - \frac{i+1}{R} \tag{25}$$

точечные оценки вероятности безотказной работы объекта в течение времени z_i и z_{i+1} соответственно.

Легко заметить, что при $i=0$ из уравнения (22) получим формулу (19), где $z_0=0$; а при $i=1$ формулу (12). Другими словами, формула (22) обобщает ранее доказанные формулы (19) и (12) для любого целого числа $i=0,1,2,\dots,R-1$, где $z_i < z_{i+1}$ – наработки до отказа в результате принудительных испытаний однотипных объектов, объем выборки которых равен R .

Покажем, что коэффициент (23) удовлетворяет соотношению

$$0 < \alpha_i \leq 1, (i=0, 1, 2, \dots, R-1). \tag{26}$$

В самом деле, используя оценку (24) и формулы (25) в (23), найдем (26).

Нижняя доверительная граница показателя t_γ

Из формулы (12) вытекает следующая оценка:

$$\hat{t}_\gamma \geq z_1 \tag{27}$$

для значений γ , удовлетворяющих условию (13). Степень доверия к оценке (27) будет крайне низка, если объем выборки R мал. Поэтому увеличим объем выборки R до такого уровня, чтобы степень доверия к оценке (27) увеличилась.

Другими словами, определим доверительную вероятность, значение которой будет определяться объемом выборки R . Для этой цели установим следующую формулу:

$$P_r(t_\gamma \geq z_1) = 1 - \gamma^R, \tag{28}$$

правая часть которой будет определять объем выборки при заданной доверительной вероятности P_3 , т.е.

$$1 - \gamma^R = P_3. \tag{29}$$

Из формулы (29) видно, что при больших значениях объемов выборки R доверительная вероятность P_3 стремится к единице и, следовательно, степень доверия к нижней доверительной границе, равной z_1 , повышается.

Например, при

$$\gamma = 0,8; R = 5$$

доверительная вероятность согласно формуле (29) равна

$$P_3 = 1 - 0,8^5 = 0,67.$$

Если же объем выборки увеличить в два раза, то согласно формуле (29) найдем

$$P_3 = 1 - 0,8^{10} = 0,89.$$

Докажем формулу (28). Для этого воспользуемся следующей формулой из теории порядковых статистик [4]:

$$P_r(t_\gamma \geq z_m) = \frac{\int_0^{1-\gamma} x^{m-1} (1-x)^{R-m} dx}{\int_0^1 x^{m-1} (1-x)^{R-m} dx},$$

где z_m – безотказная наработка отказавшего m -го объекта из выборки однотипных объектов объемом R .

Полагая в этой формуле $m = 1$, получим

$$P_r(t_\gamma \geq z_1) = \frac{\int_0^{1-\gamma} (1-x)^{R-1} dx}{\int_0^1 (1-x)^{R-1} dx} \tag{30}$$

Так как

$$\int_0^{1-\gamma} (1-x)^{R-1} dx = \frac{1}{R} (1 - \gamma^R),$$

$$\int_0^1 (1-x)^{R-1} dx = \frac{1}{R},$$

то согласно формуле (30) найдем искомую формулу (28).

Заключение

Таким образом, для невозстанавливаемых в результате принудительных ресурсных испытаний на отказ технических объектов выведены непараметрические формулы расчета и оценок показателей ресурса.

Библиографический список

1. Гнеденко, Б. В. Математические методы теории надежности и их статистический анализ / Б. В. Гнеденко, Ю. К. Беляев, А. Д. Соловьев. – Москва : URSS, 2013. – 584 с.
2. ГОСТ 27.002-2015. Надежность в технике. Термины и определения. – Москва : Стандартинформ, 2016. – 23 с.
3. Садыхов, Г. С. Гамма-процентные показатели эксплуатационной надежности и их свойства / Г. С. Садыхов // Известия АН СССР. Сер.: Техническая кибернетика. – 1983. – № 6. – С. 185–187.
4. Садыхов, Г. С. Модели и методы оценки остаточного ресурса изделий радиоэлектроники / Г. С. Садыхов, В. П. Савченко, Н. И. Сидняев. – Москва : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015. – 382 с.
5. Герасимов, О. Н. Способы организации производственного контроля и диагностики РЭС с заданным уровнем остаточного ресурса / О. Н. Герасимов, А. В. Затылкин, Н. К. Юрков // Надежность и качество сложных систем. – 2016. – № 1 (13). – С. 94–98.
6. Димитриенко, Ю. И. Прогнозирование долговечности и надежности элементов конструкций высокого давления / Ю. И. Димитриенко, Ю. В. Юрин, С. В. Европин // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2013. – № 11. – С. 3–11.
7. Садыхов, Г. С. Непараметрические методы расчета необходимого количества объектов и продолжительности проведения ресурсных испытаний / Г. С. Садыхов // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2019. – № 3. – С. 66–73.
8. Sadykhov, G. S. Non-parametric Assessment and Limiting Probability Values of the Hazardous and Safe States of a Technogenic-Hazardous Object / G. S. Sadykhov, I. A. Babaev // Journal of Machinery Manufactures and Reliability. – 2015. – Vol. 44. – № 3. – P. 298–304.
9. Гласко, А. В. Определение минимального объема выборки респондентов для проведения социологического исследования / А. В. Гласко, Л. Г. Садыхова // Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Сер.: Естественные науки. – 2012. – № 7. – С. 116–124.
10. Sadykhov, G. S. Technical Condition Control Calculation for Hazardous Industrial Facilities / G. S. Sadykhov // Journal of Machinery Manufactures and Reliability. – 2014. – Vol. 43. – P. 327–332.
11. Нетес, В. А. Двусторонние оценки коэффициента сохранения эффективности систем с выходным эффектом, зависящим от числа исполнительных элементов / В. А. Нетес // Автоматика и телемеханика. – 2018. – № 11. – С. 99–105.
12. Садыхов, Г. С. Планирование ресурсных испытаний / Г. С. Садыхов // Надежность и качество сложных систем. – 2018. – № 2 (22). – С. 80–88.
13. Садыхов, Г. С. Оптимальное планирование ресурсных испытаний / Г. С. Садыхов, В. П. Савченко // Наукоемкие технологии. – 2018. – Т. 19, № 6. – С. 10–17.
14. Михайлов, В. С. Оценки показателей надежности для безотказных испытаний, проводимых по биномиальному плану / В. С. Михайлов, Н. К. Юрков // Надежность и качество сложных систем. – 2018. – № 4 – С. 29–39.
15. Махутов, Н. А. Конструкционная прочность, ресурс и техногенная безопасность. Обоснование ресурса и безопасности / Н. А. Махутов. – Новосибирск : Наука, 2015. – Ч. 2. – 610 с.
16. Басов, В. Н. Экспериментальное исследование характеристик статической прочности, усталостной долговечности и циклической трещиностойкости листов из алюминивно-литиевых сплавов / В. Н. Басов, Г. И. Нестеренко // Труды Центрального аэрогидродинамического института. – 2007. – Вып. 2675. – С. 181–185.
17. Артюхов, А. А. Оценка средней наработки до отказа при частых срабатываниях / А. А. Артюхов // Труды Института прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН. – Москва, 2015. – С. 295–297.
18. Sadykhov, G. S. Computation of the Least Number of Objects Necessary for the Cyclical Reliability Testing / G. S. Sadykhov, I. A. Babaev // Journal of Machinery Manufactures and Reliability. – 2016. – Vol. 45, № 3. – P. 239–246.
19. Садыхов, Г. С. Расчетные формулы, оценки и предельные значения функций готовности и простоя восстанавливаемых технических объектов / Г. С. Садыхов, И. А. Бабаев // Надежность и качество сложных систем. – 2016. – № 1 (13). – С. 3–14.
20. Sadykhov, G. S. Dependence of the Recovery Parameters of Objects on the Characteristics of the Recovery Process / G. S. Sadykhov, I. A. Babaev // Journal of Machinery Manufactures and Reliability. – 2017. – Vol. 46, № 3. – P. 265–272.

References

1. Gnedenko B. V., Belyaev Yu. K., Solov'ev A. D. *Matematicheskie metody teorii nadezhnosti i ikh statisticheskoy analiz* [Mathematical methods of reliability theory and their statistical analysis]. Moscow: URSS, 2013, 584 p. [In Russian]
2. GOST 27.002-2015. *Nadezhnost' v tekhnike. Terminy i opredeleniya* [GOST 27.002-2015. Reliability in technology. Terms and definitions]. Moscow: Standartinform, 2016, 23 p. [In Russian]
3. Sadykhov G. S. *Izvestiya AN SSSR. Ser.: Tekhnicheskaya kibernetika* [Izvestiya an SSSR. Ser.: Technical cybernetics]. 1983, no. 6, pp. 185–187. [In Russian]
4. Sadykhov G. S., Savchenko V. P., Sidnyaev N. I. *Modeli i metody otsenki ostatochnogo resursa izdeliy radioelektroniki* [Models and methods for estimating the residual life of electronics products]. Moscow: Izd-vo MGTU im. N.E. Baumana, 2015, 382 p. [In Russian]
5. Gerasimov O. N., Zatylnik A. V., Yurkov N. K. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system* [Reliability and quality of complex systems]. 2016, no. 1 (13), pp. 94–98. [In Russian]
6. Dimitrienko Yu. I., Yurin Yu. V., Evropin S. V. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie* [Proceedings of higher educational institutions. Engineering]. 2013, no. 11, pp. 3–11. [In Russian]
7. Sadykhov G. S. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin* [Problems of mechanical engineering and machine reliability]. 2019, no. 3, pp. 66–73. [In Russian]
8. Sadykhov G. S., Babaev I. A. *Journal of Machinery Manufactures and Reliability*. 2015, vol. 44, no. 3, pp. 298–304.
9. Glasko A. V., Sadykhova L. G. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N. E. Baumana. Ser. Estestvennye nauki* [Bulletin of the Moscow state technical University. N. E. Bauman. Ser. Natural science]. 2012, no. 7, pp. 116–124. [In Russian]
10. Sadykhov G. S. *Journal of Machinery Manufactures and Reliability*. 2014, vol. 43, pp. 327–332.
11. Netes V. A. *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and telemechanics]. 2018, no. 11, pp. 99–105. [In Russian]
12. Sadykhov G. S. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system* [Reliability and quality of complex systems]. 2018, no. 2 (22), pp. 80–88. [In Russian]
13. Sadykhov G. S., Savchenko V. P. *Naukoemkie tekhnologii* [High technology]. 2018, vol. 19, no. 6, pp. 10–17. [In Russian]
14. Mikhaylov V. S., Yurkov N. K. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system* [Reliability and quality of complex systems]. 2018, no. 4, pp. 29–39. [In Russian]
15. Makhutov N. A. *Konstruksionnaya prochnost', resurs i tekhnogennaya bezopasnost'. Obosnovanie resursa i bezopasnosti* []. Novosibirsk: Nauka, 2015, part 2, 610 p. [In Russian]
16. Basov V. N., Nesterenko G. I. *Trudy Tsentral'nogo aerogidrodinamicheskogo instituta* [Proceedings of the Central Aerohydrodynamic Institute]. 2007, iss. 2675, pp. 181–185. [In Russian]
17. Artyukhov A. A. *Trudy Instituta prikladnoy matematiki im. M. V. Keldysha RAN* [Proceedings of the Institute of applied mathematics. M. V. Keldysh RAS]. Moscow, 2015, pp. 295–297. [In Russian]
18. Sadykhov G. S., Babaev I. A. *Journal of Machinery Manufactures and Reliability*. 2016, vol. 45, no. 3, pp. 239–246.
19. Sadykhov G. S., Babaev I. A. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system* [Reliability and quality of complex systems]. 2016, no. 1 (13), pp. 3–14. [In Russian]
20. Sadykhov G. S., Babaev I. A. *Journal of Machinery Manufactures and Reliability*. 2017, vol. 46, no. 3, pp. 265–272.

Садыхов Гулам Садырович

доктор технических наук, профессор,
главный научный сотрудник,
действительный член
Академии проблем качества РФ,
Московский государственный технический
университет им. Н. Э. Баумана
(105005, Россия, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр. 1)
E-mail: gsadykhov@gmail.com

Кудрявцева Светлана Сергеевна

ассистент,
Московский государственный технический
университет им. Н. Э. Баумана
(105005, Россия, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр. 1)
E-mail: kudryavtva@bmsu.ru

Sadykhov Goulam Sadykhovich

doctor of technical sciences, professor,
chief research scientist,
Fellow of Russian Academy of Quality Issues,
Bauman Moscow State Technical University
(105005, 5/1, 2-ya Baumanskaya street,
Moscow, Russia)

Kudryavtseva Svetlana Sergeevna

assistant,
Bauman Moscow State Technical University
(105005, 5/1, 2-ya Baumanskaya street,
Moscow, Russia)

Калашников Владимир Сергеевич

преподаватель,
кафедра эксплуатации радиоэлектронного
оборудования,
Военный институт Сил воздушной обороны
Республики Казахстан им. Т. Я. Бегельдинова
(030012, Казахстан, г. Актобе,
проспект А. Молдагуловой, 16)
E-mail: kalashnikov_vs@mail.ru

Kalashnikov Vladimir Sergeevich

lecturer,
sub-department of operation electronic equipment,
Military Institute of air defence Forces of the Republic
of Kazakhstan named T. Y. Begeldinov
(030012, 16 A. Moldagulova avenue,
Aktobe, Kazakhstan)

Образец цитирования:

Садыхов, Г. С. Расчет и оценка показателей ресурса по результатам принудительных испытаний на отказ невосстанавливаемых объектов / Г. С. Садыхов, С. С. Кудрявцева, В. С. Калашников // Надежность и качество сложных систем. – 2019. – № 3 (27). – С. 50–61. – DOI 10.21685/2307-4205-2019-3-6.

Н. К. Юрков, В. С. Михайлов, В. А. Трусов

ОЦЕНКА И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ БИНОМИАЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЙ, НЕ ДАВШИХ ОТКАЗЫ

N. K. Yurkov, V. S. Mihailov, V. A. Trusov

ESTIMATION AND PREDICTION OF THE RESIDUAL RESOURCE BASED ON THE RESULTS OF BINOMIAL TESTS THAT DID NOT GIVE UP

Аннотация. Актуальность и цели. Для невосстанавливаемых сложных изделий гамма-процентный ресурс не превышает минимальную наработку любого ЭРИ, составляющих это сложное изделие, а вероятность γ обычно выбирают в пределах от 0,95 до 0,999. Такой выбор значений вероятности разграничивает временной промежуток использования изделия на интервалы, где начальный интервал ограничен величиной гамма-процентного ресурса ($\gamma \geq 0,95$).

Такое разграничение позволяет считать, что в пределах этого начального интервала (15–25 лет) модель надежности невосстанавливаемых сложных изделий находится в рамках влияния экспоненциального закона. Этот факт позволяет делать прогнозы величины остаточного гамма-процентного ресурса невосстанавливаемых сложных изделий в пределах установленных ограничений (≤ 25 лет). Целью работы является нахождение оценки остаточного гамма-процентного ресурса – в рамках заложенных ограничений на использование ресурса, которая будет простой и более эффективной по сравнению с традиционной и уступающей незначительно эффективной оценке остаточного гамма-процентного ресурса, в случае ее существования, с точки зрения близости к истинному значению при использовании биномиального плана испытаний. А также по результатам продленной эксплуатации на основании полученной эффективной оценки остаточного гамма-процентного ресурса получить формулу оценки величин прогнозируемых значений остаточного гамма-процентного ресурса, в рамках заложенных ограничений. **Материалы и методы.** В основе исследования эффективных оценок лежит интегральный подход, в основе которого лежит построение правила выбора (критерий) эффективной оценки остаточного гамма-процентного ресурса, заданного на сумме значений абсолютных смещений оценок, выбранных из некоторого множества. **Выводы.** Полученная оценка остаточного гамма-процентного ресурса является простой и более эффективной по сравнению с традиционной и уступает незначительно эффективной оценке, в случае ее су-

Abstract. Background. For unrecoverable complex products, the GPR does not exceed the minimum operating time of any EREs that make up this complex product, and the probability γ is usually chosen in the range from 0.95 to 0.999. Such a choice of probability values distinguishes the time period of use of the product into intervals, where the initial interval is limited by the value of the gamma-percentage resource ($\gamma \geq 0.95$). This distinction suggests that within this initial interval (15–25 years), the reliability model of unrecoverable complex products is within the influence of an exponential law. This fact allows making predictions of the residual gamma-percentage resource of unrecoverable complex products within the established limits (≤ 25 years). The aim of the work is to find an estimate of the residual gamma-percentage resource – within the constraints imposed on the use of the resource, which will be simpler and more efficient than the traditional and inferior to a slightly effective estimate of the residual gamma-percentage resource, if it exists, from the point of view proximity to the true value when using the binomial test plan. And also, based on the results of the extended operation, on the basis of the obtained effective estimate of the residual gamma-percentage resource, obtain a formula for estimating the values of the predicted values of the residual gamma-percentage resource, within the limits of the constraints. **Materials and methods.** The study of effective estimates is based on an integral approach, which is based on the construction of a selection rule (criterion) for an effective estimate of the residual gamma-percentage resource given on the sum of the values of the absolute displacements of estimates selected from a certain set. **Conclusions.** The obtained estimate of the residual gamma-percentage resource is simpler and more effective than the traditional one and is inferior to the slightly effective estimate, if it exists, using the binomial test plan. The resulting estimate of the residual gamma-percentage resource has significant advantages, namely: the estimate is effective on a fairly wide class of biased estimates; assessment allows to obtain the value of the residual gamma-percentage resource from the results of tests that did not give failures. The proposed method of forecasting and

ществования, при использовании биномиального плана испытаний. Полученная оценка остаточного гамма-процентного ресурса имеет существенные преимущества, а именно: оценка является эффективной на достаточно широком классе смещенных оценок; оценка позволяет получать значение остаточного гамма-процентного ресурса по результатам испытаний, не давших отказы. Предлагаемый метод прогнозирования и полученная эффективная оценка остаточного гамма-процентного ресурса имеют направленность практического применения при безотказной эксплуатации изделий.

Ключевые слова: гамма-процентный ресурс, экспоненциальное распределение, план испытаний, точечная оценка, остаточный гамма-процентный ресурс.

the resulting effective assessment of the residual gamma-percent resource have practical application direction in trouble-free operation of products.

Keywords: gamma-percent life, exponential distribution, test plan, point estimation, residual gamma-percentile operating life.

Введение

В современном производстве высоконадежных, уникальных, сложных изделий стала обычной ситуация, в которой необходимо получить оценку остаточного ресурса на основе испытаний, не давших отказов. Как правило план испытаний относят к плану типа NBT (биномиальные испытания) или NBT , где N – число испытываемых однотипных изделий; T – наработка (одинаковая для каждого изделия); B (B) – характеристика плана, означающая, что работоспособность изделия после каждого отказа в течение срока испытаний не восстанавливается (восстанавливается) [1]. Под остаточным ресурсом понимается: суммарная наработка объекта от момента контроля его технического состояния до момента достижения его предельного состояния [2], т.е. остаточный ресурс – ресурс, исчисляется от значения наработки t_n в текущий момент времени. В основе понимания долговечности изделия (его ресурса) лежит модель надежности [2], которая описывает закон распределения отказов. Внезапные отказы, носящие случайный характер, обычно довольно хорошо описываются экспоненциальным законом. Напротив, отказы, носящие название постепенных, во многих случаях довольно хорошо описываются нормальным законом [1]. У реального изделия часто совмещаются оба типа отказов. Изделие находится в работоспособном состоянии до первого из этих отказов. Пусть $P_1(t)$ – вероятность того, что за время t не произойдет внезапный отказ, а $P_2(t)$ – вероятность того, что за время t не произойдет постепенный отказ. В предположении, что отказы возникают независимо, вероятность безотказной работы (далее – ВБР) будет равна $P_0(t) = P_1(t)P_2(t)$. ВБР $P_0(t)$ имеет сложное аналитическое выражение [1], что значительно затрудняет проведение расчетов. Однако на практике для большинства случаев составляющей $P_2(t)$ можно пренебречь, поэтому ВБР $P_0(t) = P_1(t)$ имеет экспоненциальный характер.

Чаще всего в качестве показателя долговечности используется гамма-процентный ресурс (ГПР) и совсем редко – средний ресурс. Это объясняется тем, что за время, равное среднему ресурсу, откажет половина изделий, что с точки зрения безопасности и экономичности такая эксплуатация является неоправданной. В соответствии с работой [2] ГПР – суммарная наработка, в течение которой объект не достигнет предельного состояния с вероятностью γ , выраженной в процентах. Аналогично определяется остаточный гамма-процентный ресурс (ОГПР), а именно: ОГПР – суммарная наработка объекта, исчисляемая от момента контроля его технического состояния, в течение которой объект не достигнет предельного состояния с вероятностью γ , выраженной в процентах.

Изделия электронной техники (ЭРИ) характеризуются минимальной наработкой (далее – t_{\min}), величина которой находится в пределах 15–25 годов. Минимальной наработке t_{\min} соответствует ГПР ЭРИ при $\gamma = 0,999$, т.е. вероятность отказа ЭРИ на временном участке равном минимальной наработке близка к нулю, что соответствует пологому участку нормального закона распределения (з.р.). Поэтому интенсивность отказов на начальном пологом участке нормального з.р. приближенно можно выразить формулой $\lambda_2(t) \cong \varepsilon$, следовательно, $P_2(t) \cong \exp(-\varepsilon t)$, где ε – приближение константой

интенсивности отказов на пологом участке кривой нормального закона распределения. Причем на этом пологом участке $P_2(t) > 0,95$ (определяет критерий соответствия выбранной экспоненциальной модели). С другой стороны, для экспоненциального закона распределения вероятность отказа высоконадежного изделия выражается формулой $P_1(t) = \exp(-\lambda_1 t)$. Исходя из полученных приближений и равенства $P_0(t) = P_1(t)P_2(t) = \exp(-(\lambda_1 + \varepsilon)t)$ получаем, что на пологом временном участке ВБР определяется с хорошим приближением экспоненциальным законом. В этом случае гамма-процентная наработка до отказа совпадает с гамма-процентным ресурсом.

То же самое относится и к сложному изделию, состоящему из большого количества ЭРИ.

Для невосстанавливаемых сложных изделий ГПР не превышает минимальную наработку любого ЭРИ, составляющих это сложное изделие, а вероятность γ обычно выбирают в пределах от 0,95 до 0,999. Такой выбор значений вероятности разграничивает временной промежуток использования изделия на интервалы, где начальный интервал ограничен величиной ГПР ($\gamma \geq 0,95$). Такое разграничение позволяет считать, что в пределах этого начального интервала (15–25 лет) модель надежности невосстанавливаемых сложных изделий $P_0(t) = P_1(t)$ находится в рамках влияния экспоненциального закона. Этот факт позволяет делать прогнозы величины ГПР (ОГПР) невосстанавливаемых сложных изделий в пределах установленных ограничений (≤ 25 лет, $\gamma > 0,95$).

Модель надежности

На интервале $[0; 25]$ лет, ограниченном величиной минимальной наработки ЭРИ t_{\min} , наработка до отказа невосстанавливаемых сложных изделий подчиняется экспоненциальному закону распределения с параметром T_0 (средняя наработка до отказа). Расчетное значение ВБР (далее – $P_0(t)$) за заданное время (далее – $t, t \leq t_{\min}$) будет определяться равенством

$$P_0(t) = e^{-\left(\frac{t}{T_0}\right)}. \tag{1}$$

Из формулы (1) легко выводится расчетная формула для ГПР ($\gamma_n = P_0(t_n)$):

$$t_n = -T_0 \ln(\gamma_n). \tag{2}$$

Начальную (нормированную) величину ГПР t_n устанавливают по факту (в техническом задании).

Устанавливая величину критерия предельного состояния изделия (γ_n) для продленного ресурса (далее – $t_n, \gamma_n(t_n) < \gamma_n(t_n)$), легко рассчитать ОГПР изделия (далее – $t_{\text{ост.}\gamma}$):

$$t_{\text{ост.}\gamma} = t_n - t_n = -T_0 \ln(\gamma_n(t_n)) - (-T_0 \ln(\gamma_n(t_n))) = T_0 \ln(\gamma_n) - T_0 \ln(\gamma_n). \tag{3}$$

Из формул (1)–(3) легко рассчитать критерий предельного состояния изделия для ОГПР $t_{\text{ост.}\gamma}$,

а именно: $\gamma = e^{-\left(\frac{t_{\text{ост.}\gamma}}{T_0}\right)}$.

Устанавливая величину критерия предельного состояния изделия γ_n для продленного ресурса $t_{\text{прогноз}}$: $\gamma_n(t_n) = 0,95 = \gamma_{\text{прогноз}}(t_{\text{прогноз}})$, можно прогнозировать ОГПР изделия в соответствии с формулой (3), а именно:

$$t_{\text{прогноз.ост.}\gamma} = T_0 \ln(\gamma_n) - T_0 \ln(\gamma_{\text{прогноз}} = 0,95).$$

Рассмотрим случай проведения испытаний в соответствии с планом *НБТ*.

С целью построения оценки ОГПР (далее – $\hat{t}_{\text{ост.}\gamma}$) вполне естественным будет, если в качестве оценки параметра T_0 воспользоваться традиционной точечной оценкой средней наработки до отказа, построенную для экспоненциального распределения [1, 3]:

$$\hat{m} = \frac{T^*}{r}, \text{ при } r > 0,$$

где T^* – суммарная наработка; r – количество отказов.

Однако полученная таким образом оценка имеет существенные недостатки, а именно:

- оценка является смещенной;
- оценка является не эффективной;
- оценка не позволяет получать значение $t_{\text{ост.}\gamma}$ по результатам испытаний, не давших отказы.

Для решения упомянутой выше задачи достаточно найти несмещенную эффективную оценку ($\hat{t}_{\text{ост.}\gamma\text{эф}}$), если такая существует в классе состоятельных смещенных оценок. (Класс состоятельных оценок, в который входят и все оценки, полученные методом подстановки, включая и метод максимального правдоподобия, содержит в себе оценки с любым смещением, в том числе и с фиксированным – в виде функции от параметра или константы [4]). В ряде случаев найденные несмещенные эффективные оценки имеют весьма громоздкий вид со сложным алгоритмом вычисления [5]. Они также не всегда являются достаточно эффективными в классе всех смещенных оценок и не всегда имеют значительное преимущество перед простыми, но смещенными оценками, с точки зрения близости к оцениваемому показателю.

Цель работы

Целью работы является нахождение оценки ОГПР $\hat{t}_{\text{ост.}\gamma}$ – в рамках заложенных ограничений на использование экспоненциального закона, которая будет простой и более эффективной по сравнению с традиционной и уступающей незначительно эффективной оценке ОГПР $\hat{t}_{\text{ост.}\gamma}$, в случае ее существования с точки зрения близости к истинному значению при использовании биномиального плана испытаний. И по результатам продленной эксплуатации на основании построенной эффективной оценки ОГПР получить величины прогнозируемых значений ОГПР в рамках заложенных ограничений.

Методы и решения

В качестве инструмента для нахождения эффективной оценки будем использовать интегральные характеристики [6–9]. Аналогично работам [6–9] построим критерий выбора эффективной оценки на множестве оценок $\hat{t}_{\text{ост.}\gamma}(R, N, t)$, основанном на суммарном квадрате относительных смещений математического ожидания оценок $E\hat{t}_{\text{ост.}\gamma}(R, N, t)$ от $t_{\text{ост.}\gamma} = T_0(\ln(\gamma_n) - \ln(\gamma_n))$ для всех возможных значений параметров биномиальных испытаний $p(T_0, t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{T_0}\right)}$ и N . Поэтому в качестве критерия получения эффективной оценки строится функционал (далее – $A(\hat{t}_{\text{ост.}\gamma}(R, N, t))$) [6–9]:

$$A(\hat{t}_{\text{ост.}\gamma}(R, N, t)) = \frac{1}{3} \sum_{t=1}^{t_j=1E+5} \frac{1}{10} \sum_{N=1}^{10} \int_0^{\infty} \left(\frac{1}{T_0}\right)^2 \{E\hat{t}_{\text{ост.}\gamma}(R, N, t_j) - t_{\text{ост.}\gamma}\}^2 \partial T_0. \quad (4)$$

Воспользовавшись свойствами биномиального распределения с параметром p [1], найдем

$$E\hat{t}_{\text{ост.}\gamma} = \sum_{k=0}^{\infty} \left(\widehat{T}_0 (\ln(\gamma_n(t_H)) - \ln(\gamma_n(t_{II}))) \right) C_{Np}^k (1-p)^{N-k}.$$

Эффективная оценка ОГПР $t_{\text{ост.}\gamma}$ должна обладать минимальной величиной функционала $A(\hat{t}_{\text{ост.}\gamma})$.

Вынесем из-под знака интеграла $\ln(\gamma_n(t_H)) - \ln(\gamma_n(t_{II}))$, тогда формула (4) с учетом (3) примет вид

$$A(\hat{t}_{\text{ост.}\gamma}) = (\ln(\gamma_n(t_H)) - \ln(\gamma_n(t_{\Pi})))^2 V(\tilde{T}_0), \tag{5}$$

где $V(\tilde{T}_0) = \frac{1}{3} \sum_{t=1E+3}^{t_j=1E+5} \frac{1}{10} \sum_{N=10}^{\infty} \left(\frac{1}{T_0}\right)^2 \{E\tilde{T}_0(R, N, t_j) - T_0\}^2 \partial T_0$; \tilde{T}_0 – некоторая оценка параметра T_0 .

В соответствии с [9] $V(\tilde{T}_0)$ в формуле (5) принимает минимальное значение (а вместе с ним и функционал $A(\hat{t}_{\text{ост.}\gamma})$), если в качестве оценки параметра T_0 подставить его эффективную оценку, построенную на достаточно широком классе смещенных оценок. В этом случае для биномиального плана испытаний в качестве оценки параметра T_0 (СНДО) следует использовать неявно заданную и эффективную оценку \hat{T}_1 из [9]:

$$\hat{T}_1 = \frac{t}{-\ln(1 - \tilde{v}(R, N, \gamma = 0, 6))}, \tag{6}$$

где оценка вероятности отказа $\tilde{v}(R, N, \gamma = 0, 6)$ получается решением уравнения [9]

$$F_r(r, N, \hat{p}) = \sum_{k=0}^r C_N^k \tilde{v}^k (1 - \tilde{v})^{N-k} = 0,6.$$

Тогда эффективная оценка ОГПР $\hat{t}_{\text{ост.}\gamma}$, построенная на достаточно широком классе смещенных оценок [6, 9], примет вид

$$\hat{t}_{\text{ост.}\gamma} = \frac{t(\ln(\gamma_n(t_H)) - \ln(\pi(t_{\Pi})))}{-\ln(1 - \tilde{v}(R, N, \gamma = 0, 6))}. \tag{7}$$

Полученная таким образом оценка $\hat{t}_{\text{ост.}\gamma}$ доставляет минимум функционалу $A(\hat{t}_{\text{ост.}\gamma})$ на достаточно широком классе смещенных оценок [6, 9] и по определению является эффективной оценкой ОГПР на этом классе оценок. Оценка $\hat{t}_{\text{ост.}\gamma}$ имеет существенные преимущества в сравнении с традиционными оценками ОГПР, а именно:

- оценка является эффективной на достаточно широком классе смещенных оценок [6, 9];
- оценка позволяет делать оценку ОГПР t_{γ} по результатам испытаний, не давших отказы.

Пример 1. По результатам безотказной эксплуатации 15 изделий в течение 15000 ч было принято решение продолжить эксплуатацию этих изделий еще в течение 5000 ч с целью определения прогнозного значения ОГПР $\hat{t}_{\text{прогноз.ост.}\gamma}$ при $\gamma_{\text{прогноз}} = 95\%$. По результатам проведенной эксплуатации отказы обнаружены не были.

Требуется сделать оценку продленного остаточного ресурса $\hat{t}_{\text{п.ост.}\gamma} = 5000$ ч (рассчитать соответствующую вероятность γ) и распространить сделанную оценку на выпущенную партию изделий, чьи наработки в эксплуатации не превышают 15000 ч. В рамках допущенных ограничений на вероятность прогнозируемого ГПР $\gamma_{\text{прогноз}} = 95\%$ определить прогнозное значение ОГПР $\hat{t}_{\text{прогноз.ост.}\gamma}$.

В соответствии с формулами (1) и (6) делаем оценку ВБР за первичную наработку, равную 15 000 ч, по результатам безотказных испытаний, проводимых в течение 20 000 ч, по формулам

$$\tilde{T}_0(R = 0, N = 15) = \frac{t}{-\ln(1 - \tilde{v}(R = 0, N = 15, \gamma = 0, 6))} = \frac{20000}{-\ln(1 - 0,0335)} = 588235 \text{ ч};$$

$$\gamma_n(t_H) = F(t_n = 15000) = e^{-\left(\frac{15000}{\tilde{T}_0}\right)} = 0,974822,$$

т.е. наработка, равная 15 000 ч, соответствует ГПР при $\gamma = 97,4822\%$.

Заметим, что общее время эксплуатации каждого из 15 изделий составило $t_{\Pi} = 20\ 000$ ч. Нарботке равной 20 000 ч соответствует ГПР при $\gamma = 96,6\%$, так как

$$\gamma_{\Pi}(t_{\Pi}) = F(t_{\Pi} = 20000) = e^{-\frac{20000}{\tilde{T}_0}} = 0,966571.$$

Непосредственно из формулы (7) следует, что оценка величины продленного ОГПР составит

$$\hat{t}_{\Pi, \text{ост.}\gamma} = (\ln(\gamma_{\Pi}(t_{\Pi})) - \ln(\gamma_{\Pi}(t_{\Pi}))) \tilde{T}_0 (R=0, N=15) = (\ln(0,974822) - \ln(0,966571)) 588\ 235 = 5000 \text{ ч};$$

$$\gamma(\hat{t}_{\Pi, \text{ост.}\gamma}) = F(t = 5000) = e^{-5000/588235} = 0,991,$$

т.е. изделия, чьи сроки эксплуатации достигнут 15 000 ч, смогут безотказно проработать еще 5000 ч с высокой вероятностью равной 0,991 до достижения наработки равной продленной эксплуатации $t_{\Pi} = 20\ 000$ ч.

Непосредственно из формулы (7) следует, что в соответствии с критерием $\gamma_{\text{прогноз}} = 0,95$ величина прогнозного ОГПР составит

$$\hat{t}_{\text{прогноз.ост.}\gamma} = (\ln(\gamma_{\Pi}(t_{\Pi})) - \ln(\gamma_{\text{прогноз}} = 0,95)) \tilde{T}_0 (R=0, N=15) = (\ln(0,975) - \ln(0,95)) 588\ 235 = 15\ 280 \text{ ч};$$

$$\gamma(\hat{t}_{\text{прогноз.ост.}\gamma}) = F(t = 15\ 280) = e^{-15280/588235} = 0,974.$$

Нарботке равной $t = t_{\Pi} + \hat{t}_{\text{ост.}\gamma} = 15\ 000 + 15\ 280 = 30\ 280$ соответствует ГПР при $\gamma(t = t_{\Pi} + \hat{t}_{\text{ост.}\gamma}) = F(t = 30\ 280) = e^{-30280/588235} = 0,9498 \approx 0,95$. Этот факт означает, что расчет произведен в рамках установленных ограничений на наработку $t = 30\ 280 \leq t_{\min} = 10 \cdot 365 \cdot 24 = 87\ 600$ ч (10 лет).

По результатам прогноза $\hat{t}_{\text{прогноз.ост.}\gamma}$ можно сделать вывод, что прогнозируемый ОГПР составил 15 280 ч при $\gamma = 97,4\%$, т.е. по результатам прогноза ОГПР изделий, чьи сроки эксплуатации достигнут 15 000 ч, смогут безотказно проработать еще 15 280 ч с высокой вероятностью равной 0,974.

Приведем для сравнения традиционное решение примера 1.

Традиционно для безотказных испытаний оценку ВБР $F(t_{\Pi})$ за первичную наработку, равную 15 000 ч, оценивают параметр T_0 (вместо точечной оценки) по нижней доверительной границе (далее – НДГ) средней наработки до отказа с доверительной вероятностью $\gamma = 0,9$ (не путать с вероятностью «гамма»), то результат в соответствии с работой [3] составит

$$T_{01\text{н}} = \frac{2t_{\Sigma}}{x^2(1-\infty; 2r+1)} = \frac{2 \cdot 15 \cdot 20\ 000}{2,71} = 221\ 402 \text{ ч},$$

где $x^2(1-\infty; 2r+1)$ – квантиль x^2 – распределения с $2r+1$ степенью свободы (для плана испытаний NBT), ($\alpha = 1 - \gamma = 1 - 0,9 = 0,1$) – уровень значимости согласно ГОСТ Р 50779.26–2007:

$$\gamma_{\Pi}(t_{\Pi}) = F(t_{\Pi} = 15000) = e^{(-t_{\Pi}/T_{01\text{н}})} = e^{(-15000/221402)} = 0,934\ 494,$$

т.е. первичная наработка равная 15000 ч соответствует ГПР группы изделий при $\gamma = 93,4\%$.

Вероятность для ГПР группы изделий равного 20 000 ч составит

$$\gamma_{\Pi}(t_{\Pi}) = F(t_{\Pi} = 20\ 000) = e^{(-20000/221402)} = 0,913627,$$

т.е. суммарная наработка любого из изделий равная 20000 ч соответствует ГПР группы изделий при $\gamma = 91,3\%$.

Для безотказных испытаний традиционная оценка ГПР выражается формулой

$$\bar{t}_{\gamma} = -\ln(\gamma(t_{\Pi})) T_{01\text{н}}.$$

Тогда традиционная оценка величины продленного ОГПР для группы изделий $\tilde{t}_{\text{ост.}\gamma}$ составит

$$\tilde{t}_{\text{ост.}\gamma} = (\ln(\gamma_n) - \ln(\gamma_n)) T_{01n} = (\ln(0,934494) - \ln(0,913627)) 221\,402 = 5000 \text{ ч};$$

$$\gamma(\tilde{t}_{\text{ост.}\gamma}) = F(t = 5034) = e^{(-5000/T_{01n})} = 0,945.$$

По результатам традиционной оценки ОГПР $\tilde{t}_{\text{ост.}\gamma}$ можно сделать вывод, что ОГПР группы изделий составил 5000 ч при $\gamma = 94,5\%$ (ГПР группы изделий составил 20 000 ч при γ равной 91,3%), т.е. изделия, чьи сроки эксплуатации достигнут 15000 ч, смогут безотказно проработать еще 5000 ч с вероятностью равной 0,945, что ниже требуемых 0,95, поэтому следует продолжить эксплуатацию. Осуществлять прогнозирование в рамках заложенных ограничений невозможно.

Из сравнения традиционной $\tilde{t}_{\text{ост.}\gamma} = 5000(\gamma = 94,5\%)$ и предлагаемой $\hat{t}_{\text{ост.}\gamma} = 5000(\gamma = 97,4\%)$ оценок ОГПР следует, что для безотказных испытаний традиционное оценивание ОГПР с использованием нижних доверительных оценок, как и следовало ожидать, существенно занижает остаточный ресурс ($94,5\% < 97,4\%$) в сравнении с предлагаемой оценкой $\hat{t}_{\text{ост.}\gamma}$.

Заключение

Полученная оценка \hat{t}_γ (см. формулу (7)) ОГПР t_γ является простой и более эффективной по сравнению с традиционной и уступает незначительно оценке $\hat{t}_{\gamma\text{эф}}$ в случае ее существования с точки зрения близости к t_γ при использовании биномиального плана испытаний.

Полученная оценка \hat{t}_γ ОГПР t_γ имеет существенные преимущества, а именно:

- оценка является эффективной на достаточно широком классе смещенных оценок [6–9];
- оценка позволяет получать значение t_γ по результатам испытаний, не давших отказы.

Предлагаемый метод прогнозирования и полученная эффективная оценка \hat{t}_γ ОГПР t_γ имеют направленность практического применения при безотказной эксплуатации изделий.

Библиографический список

1. Вопросы математической теории надежности / Е. Ю. Барзилович, Ю. К. Беляев, В. А. Каштанов, И. А. Ушаков, И. Н. Коваленко, А. Д. Соловьев ; под ред. Б. В. Гнеденко. – Москва : Радио и связь, 1983. – 376 с.
2. ГОСТ Р 27.002–2009 Надежность в технике. Термины и определения. – Москва : Стандартинформ, 2011. – 27 с.
3. ГОСТ Р 50779.26–2007 Статистические методы. Точечные оценки, доверительные, предикционные и толерантные интервалы для экспоненциального распределения. – Москва : Стандартинформ, 2008. – 27 с.
4. Боровков, А. А. Математическая статистика / А. А. Боровков. – Москва : Наука, 1984. – 472 с.
5. Воинов, В. Г. Несмещенные оценки и их применение / В. Г. Воинов, М. С. Никулин. – Москва : Наука, 1989. – 440 с.
6. Михайлов, В. С. Неявные оценки для плана испытаний типа НБт / В. С. Михайлов // Надежность и качество сложных систем. – 2018. – № 1 (21). – С. 64–71.
7. Михайлов, В. С. Исследование интегральных оценок потока отказов / В. С. Михайлов // Надежность и качество сложных систем. – 2018. – № 2 (22). – С. 3–10.
8. Юрков, Н. К. Оценки показателей надежности для безотказных испытаний, проводимых по биномиальному плану / Н. К. Юрков, В. С. Михайлов // Надежность и качество сложных систем. – 2018. – № 4 (24). – С. 29–39.
9. Михайлов, В. С. Частный случай нахождения эффективных оценок / В. С. Михайлов, Н. К. Юрков // Надежность и качество сложных систем. – 2019. – № 2 (26). – С. 103–113.

References

1. Barzilovich E. Yu., Belyaev Yu. K., Kashtanov V. A., Ushakov I. A., Kovalenko I. N., Solov'ev A. D. *Voprosy matematicheskoy teorii nadezhnosti* [Questions of mathematical theory of reliability]. Moscow: Radio i svyaz, 1983, 376 p. [In Russian]

2. GOST R 27.002–2009 *Nadezhnost' v tekhnike. Terminy i opredeleniya* [GOST R 27.002–2009 Reliability in technology. Terms and definitions]. Moscow: Standartinform, 2011, 27 p. [In Russian]
3. GOST R 50779.26–2007 *Statisticheskie metody. Tochechnye otsenki, doveritel'nye, prediktsionnye i tolerantnyye intervaly dlya eksponentsial'nogo raspredeleniya* [GOST R 50779.26–2007 Statistical methods. Point estimates, confidence, predictive and tolerance intervals for exponential distribution]. Moscow: Standartinform, 2008, 27 p. [In Russian]
4. Borovkov A. A. *Matematicheskaya statistika* [Mathematical statistics]. Moscow: Nauka, 1984, 472 p. [In Russian]
5. Voinov, V. G., Nikulin M. S. *Nesmeshchennye otsenki i ikh primeneniye* [Unbiased estimates and their application]. Moscow: Nauka, 1989, 440 p. [In Russian]
6. Mikhaylov V. S. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system* [Reliability and quality of complex systems]. 2018, no. 1 (21), pp. 64–71. [In Russian]
7. Mikhaylov V. S. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system* [Reliability and quality of complex systems]. 2018, no. 2 (22), pp. 3–10. [In Russian]
8. Yurkov N. K., Mikhaylov V. S. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system* [Reliability and quality of complex systems]. 2018, no. 4 (24), pp. 29–39. [In Russian]
9. Mikhaylov V. S., Yurkov N. K. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system* [Reliability and quality of complex systems]. 2019, no. 2 (26), pp. 103–113. [In Russian]

Юрков Николай Кондратьевич

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: yurkov_NK@mail.ru

Михайлов Виктор Сергеевич

ведущий инженер,
Центральный научно-исследовательский институт
химии и механики им. Д. И. Менделеева
(115487, Россия, г. Москва, ул. Нагатинская, 16а)
E-mail: Mvs1956@list.ru

Трусов Василий Анатольевич

кандидат технических наук, доцент,
кафедра конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: trusov_v@mail.ru

Yurkov Nikolay Kondrat'evich

doctor of technical sciences, professor,
head of sub-department of radio equipment design
and production,
Penza State University
(440026, 40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Mikhailov Viktor Sergeevich

lead engineer,
Central Research Institute of Chemistry
and Mechanics named after D. I. Mendeleev
(115487, 16a Nagatinskaya street, Moscow, Russia)

Trusov Vasilij Anatolievich

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of radio equipment design
and production,
Penza State University
(440026, 40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Образец цитирования:

Юрков, Н. К. Оценка и прогнозирование остаточного ресурса по результатам биномиальных испытаний, не давших отказы / Н. К. Юрков, В. С. Михайлов, В. А. Трусов // Надежность и качество сложных систем. – 2019. – № 3 (27). – С. 62–69. – DOI 10.21685/2307-4205-2019-3-7.

А. В. Григорьев, А. В. Лысенко, Г. В. Таньков, И. Ю. Наумова, Н. К. Юрков

ГРАДУИРОВОЧНАЯ ФУНКЦИЯ ИЗМЕРЕНИЯ АППЛИКАТЫ ВИБРАЦИОННОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА РАЗМЫТИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ КРУГЛОЙ МЕТКИ

A. V. Grigorev, A. V. Lysenko, G. V. Tankov, I. Yu. Naumova, N. K. Yurkov

THE CALIBRATION MEASUREMENT APPLICATI VIBRATION DISPLACEMENTS BASED ON THE ANALYSIS OF DEFOCUS OF THE IMAGE OF A CIRCULAR MARK

Аннотация. Актуальность и цели. Вибрационная диагностика машин и механизмов, зданий и сооружений, радиоэлектронной аппаратуры является очень популярным методом обнаружения дефектов в латентной их фазе, когда они еще не влияют значимо на работу оборудования. В настоящее время быстро развивается перспективная экономичная и информативная виброизмерительная технология, в основу которой положен анализ размытия изображения круглой метки или матрицы круглых меток, нанесенных на поверхность объекта контроля. Целью настоящей статьи является исследование градуировочной характеристики виброизмерительной системы с анализом размытия изображения круглой метки. **Материалы и методы.** В статье исследуются материалы, полученные авторами в ходе натурного эксперимента. Для обработки результатов применены методы линейной аппроксимации и регрессионного анализа. **Результаты.** Получены реальные изображения круглой метки: четкого при отсутствии вибрации и с размытием от вибрационного перемещения по аппликату. Получена экспериментальная градуировочная характеристика виброизмерительной системы с анализом размытия изображения круглой метки. Построена реальная регрессионная модель этой градуировочной характеристики и доказана ее линейность. **Выводы.** Экспериментально доказано, что при вибрационном перемещении исследуемой точки поверхности объекта контроля наблюдается значимое размытие изображения круглой метки, в геометрическом центре которой эта точка расположена. Полученная экспериментальная градуировочная характеристика реальной виброизмерительной системы с анализом размытия изображения круглой метки позволяет вычислить амплитуду вибрационного перемещения исследуемой материальной точки по аппликату на основе вызванного им приращения радиуса изображения круглой метки. Экспериментально доказана линейность градуировочной характеристики виброизмерительной системы с анализом размытия изображения круглой метки. Полученная линейная регрессионная модель

Abstract. Background. Vibration diagnostics of machines and mechanisms, buildings and structures, electronic equipment is a very popular method of detecting defects in their latent phase, when they do not significantly affect the operation of the equipment. Currently, a promising cost-effective and informative vibration measurement technology is rapidly developing, which is based on the analysis of blurring the image of a round mark or a matrix of round marks applied to the surface of the object under control. The purpose of this article is to study the calibration characteristics of the vibration measurement system with the analysis of the image blur of the round mark. **Materials and methods.** The article examines the materials obtained by the authors in the course of full-scale experiment. Methods of linear approximation and regression analysis are used to process the results. **Results.** The real images of the round mark are obtained: clear, in the absence of vibration, and with blurring from the vibration movement on the applique. The experimental calibration characteristic of the vibration measuring system with the analysis of the image blur of the round mark is obtained. The real regression model of this calibration characteristic is constructed and its linearity is proved. **Summary.** It is experimentally proved that during the vibration movement of the test point of the surface of the object under control, a significant blurring of the image of the round mark, in the geometric center of which this point is located, is observed. The obtained experimental calibration characteristic of the real vibration measuring system with the analysis of blurring of the image of the round mark allows to calculate the amplitude of the vibration movement of the material point on the applique on the basis of the increment of the radius of the image of the round mark caused by it. The linearity of the calibration characteristic of the vibration measuring system with the analysis of the image blur of the round mark is experimentally proved. The resulting linear regression model will create a technique for predicting the reduced error of the vibration measurement system with the analysis of the blur of the image of the round mark on the basis of a given number of pixels falling on this image.

позволит создать методику прогнозирования приведенной погрешности виброизмерительной системы с анализом размытия изображения круглой метки на основе заданного количества пикселей, приходящихся на это изображение.

Ключевые слова: вибрация, круглая метка, размытие, измерение, градуировка, перемещение, амплитуда, аппликата, погрешность, аппроксимация, регрессия, растр, пиксель, изображение, прогнозирование, модель.

Keywords: vibration, round mark, blur, measurement, calibration, displacement, amplitude, applique, error, approximation, regression, raster, pixel, image, prediction, model.

Введение

Системы вибрационной диагностики технических объектов приобретают все возрастающее значение как составная часть сложных технических систем, повышающая их надежность и качество [1–3]. При этом все более важную роль играет фактор интегрирования аппаратных средств системы, ее датчиков и программных обрабатывающих и управляющих структур [4]. При этом повышаются требования к системам измерения вибраций и вибрационных полей. Развитие фотоприемных регистрирующих устройств, повышение их разрешающей способности, чувствительности и линейности закономерно приводит к росту их применения в виброизмерительных системах, предназначенных для текущего контроля технических объектов, как в процессе эксплуатации, так и при испытаниях опытных образцов. При этом важную роль играют системы, в основу работы положен эффект вибрационного размытия изображения тестового объекта. Наиболее информативным тестовым объектом при этом представляется специально нанесенная на поверхность объекта контроля метка круглой формы. Для контроля распределения амплитуды вибрации по фрагменту поверхности объекта контроля может быть нанесена не одна круглая метка, а целая их матрица.

Современное состояние вопроса

Предельными ситуациями вибрационного перемещения точки поверхности объекта контроля является ее перемещение в плоскости объекта и перпендикулярно ей [5]. Вибрационное размытие в каждом из этих предельных случаев имеет свою специфику [6]. Эту специфику необходимо учитывать при анализе изображения круглой метки с вибрационным размытием [7]. Важными факторами такого учета является выбор правильного критерия формирования областей связанных элементов изображения [8] и построение алгоритма анализа этих сформированных областей [9]. Вектор перемещения исследуемой точки проецируется на плоскость объекта [10]. В результате в плоскости объекта формируется след вибрационного размытия [11]. Полное описание следа вибрационного размытия, заключающееся в создании списка координат и интенсивностей пикселей, этому следу принадлежащих, мало что дает. Гораздо важнее разработка алгоритмов создания проблемно ориентированного сжатого структурного описания следа размытия изображения круглой метки [12]. Один из эффективных вариантов преобразования описания полного в описание сжатое представлен в статье [13]. При этом важная роль отводится процессу предварительной калибровки виброизмерительных систем перемещения на основе анализа размытия изображения круглой метки [14]. Расстояния на изображении измеряются в растровых единицах (*run*). Под растровой единицей понимается расстояние между центрами примыкающих друг к другу в строке или в столбце пикселей [15].

Схема экспериментальных исследований

Авторами был проведен эксперимент, схема которого представлена на рис. 1.

На вибровозбудителях 1 была размещена плата 2, на которой закреплен механический контактный датчик вибрационного ускорения 3 и нанесена круглая белая метка 4 на черном фоне, диаметр которой был равен 4 мм. Над этой меткой было размещено регистрирующее устройство – цифровой светоптический микроскоп *DigiMicroProf*. Разрешающая способность фотокамеры *5Mpix*. Вначале осуществлялось фотографирование метки при отсутствии вибрации (рис. 2,а).

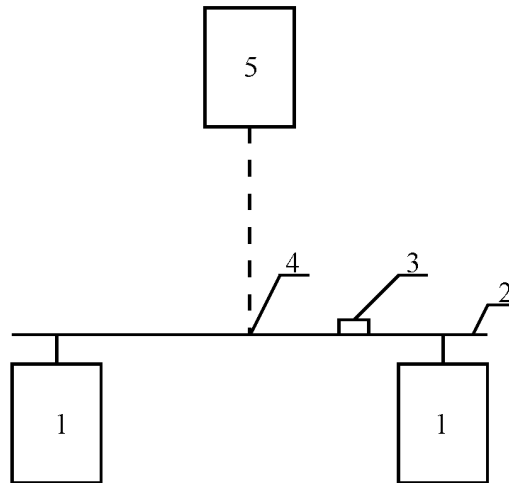


Рис. 1. Схема эксперимента по градуировке системы измерения вибрационного перемещения

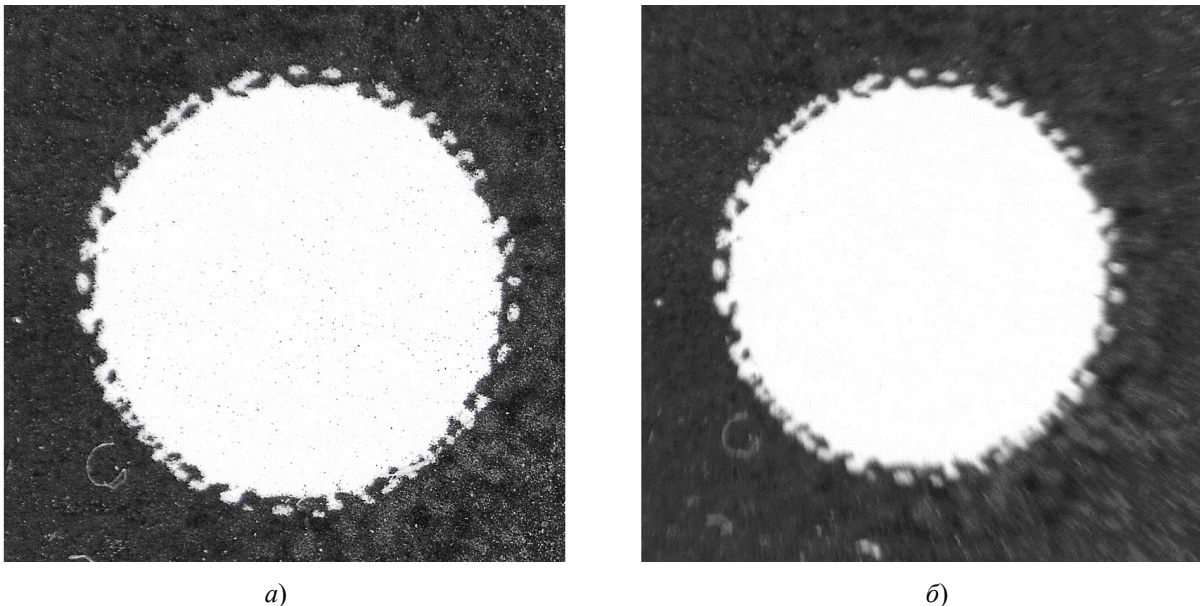


Рис. 2. Исходное полутоновое изображение круглой метки:
 а – при отсутствии вибрации; б – при наличии вибрации

Полученная фотография подвергалась бинаризации с пороговым уровнем $u_1 = 0,9U$ и фильтрации с целью устранения белых вкраплений за пределами изображения метки и черных раковин внутри этого изображения.

Порядок экспериментальных исследований

При построчном считывании бинарного отфильтрованного изображения осуществлялся подсчет количества пикселей, принадлежащих изображению метки, в результате чего измерялась площадь изображения круглой метки при отсутствии вибрации S_{imt0} . На основании этого результата вычислялся радиус изображения метки при отсутствии вибрации l_0 :

$$l_0 = \sqrt{\frac{S_{imt0}}{\pi}} \tag{1}$$

Затем возбуждалась вибрация. Вибрация регулировалась по показаниям контактного датчика: последовательно формировались гармонические вибрации частотой 50 Гц и амплитудой вибрационного ускорения $1g, 2g, \dots, 9g$, где g – ускорение свободного падения.

На рис. 2,б представлено исходное полутоновое изображение круглой метки при максимальной экспериментальной вибрации 9g.

Для каждого значения амплитуды вибрационного ускорения, измеренного в единицах g, вычислялось соответствующее ему значение вибрационного перемещения, измеренного в микрометрах. Поскольку вибрации формируются гармонические, посредством несложных математических преобразований получена формула

$$M[\text{мкм}] = \frac{10^6 A \cdot g}{(2\pi f)^2} \quad (2)$$

где $M[\text{мкм}]$ – амплитуда вибрационного перемещения, измеренная в микрометрах; A – амплитуда вибрационного ускорения, измеренная в единицах g (1g, 2g, ..., 9g); g – ускорение свободного падения – принималось равным $9,807\text{м/с}^2$; f – частота вибрации, Гц.

При каждом значении вибрационного ускорения регистрирующее устройство осуществляло фиксацию изображения метки. Это изображение подвергалось бинаризации с пороговым уровнем $u_l = 0,9U$. Полученное бинарное изображение подвергалось фильтрации с целью устранения паразитных вкраплений белого на черном фоне и устранения раковин черного внутри бинарного изображения белой метки. Осуществлялся подсчет количества пикселей, принадлежащих размытому изображению метки, в результате чего формировались значения площади размытых изображений метки $S_{imz}(k)$, где k – порядковый номер изображения метки, полученного при наличии вибрации. Для каждого значения k определялся радиус $l_z(k)$ отфильтрованного бинарного изображения метки, измеренный в растровых единицах, run:

$$l_z = \sqrt{\frac{S_{imz}}{\pi}} \quad (3)$$

Вычислялись значения приращения радиуса изображения метки, вызванного вибрационным перемещением исследуемой точки по формуле:

$$L_z(k) = l_z(k) - l_0, \quad (4)$$

где $L_z(k)$ – приращение радиуса k -го размытого изображения метки, вызванное вибрационным перемещением исследуемой материальной точки.

Результаты экспериментальных исследований

Результаты этих измерений представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты измерений

$S_{iml0} = 739219\text{run}^2; l_0 = 485,078\text{run}$					
k	$A(k), g$	$M(k), \text{мкм}$	$S_{imz}(k), \text{run}^2$	$l_z(k), \text{run}$	$L_z(k), \text{run}$
1	1	99,37	735973	484,012	-1,06619
2	2	198,7	735889	483,984	-1,09381
3	3	298,1	734623	483,568	-1,51031
4	4	397,5	733192	483,097	-1,98152
5	5	496,8	731341	482,486	-2,59171
6	6	596,2	729387	481,841	-3,23669
7	7	695,6	729112	481,751	-3,32754
8	8	794,9	727353	481,169	-3,90901
9	9	894,3	726479	480,88	-4,19818

На рис. 3 представлен экспериментальный график зависимости измерительного сигнала – абсолютной величины приращения радиуса изображения метки $|L_z|$, измеренной в растровых единицах, от амплитуды вызвавшего его вибрационного перемещения метки M , измеренного в микрометрах.

Экспериментальная зависимость была аппроксимирована прямой по методу наименьших квадратов. Анализ графика показывает, что полученную градуировочную характеристику измери-

тельного преобразования можно считать линейной. Расчетное значение t -критерия Стьюдента составило 62,2398. Табличное значение t_t при доверительной вероятности 0,999 и 8 степенях свободы 5,0413. Таким образом, адекватность линейной регрессионной модели можно считать 100 %-й.

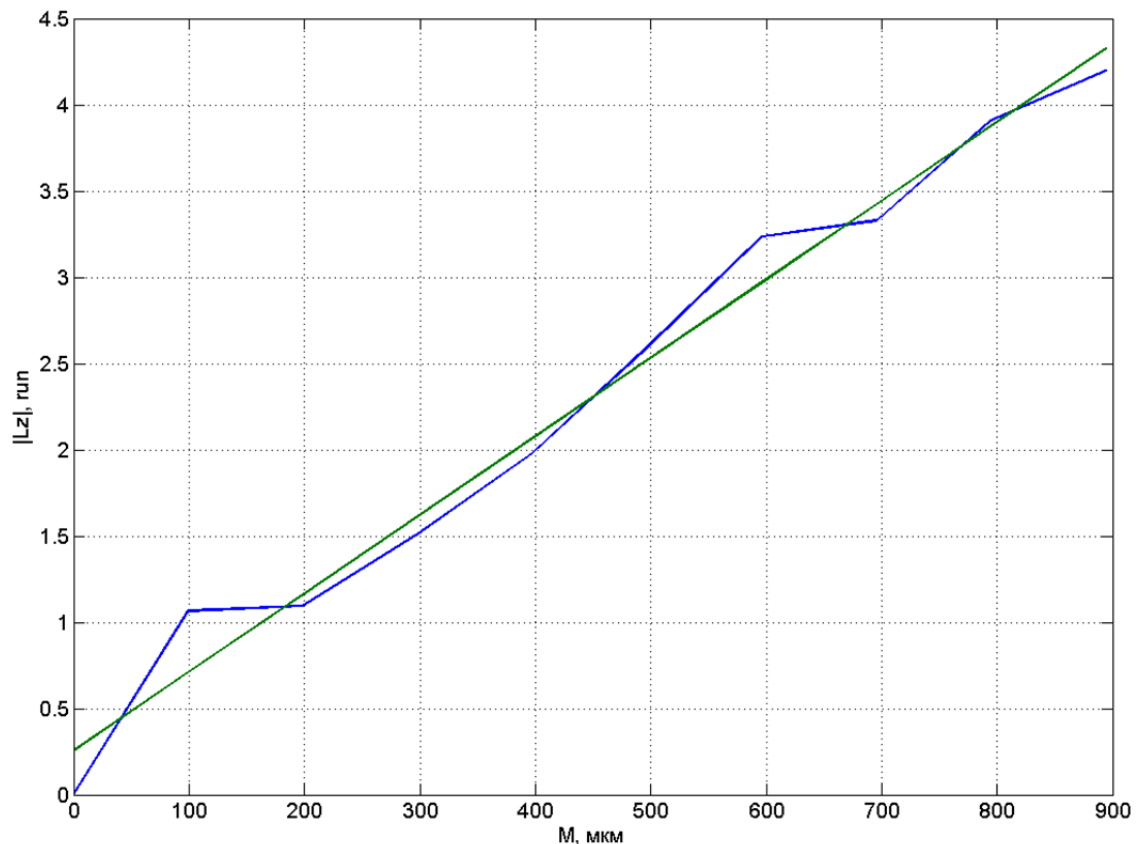


Рис. 3. Экспериментальная зависимость абсолютной величины приращения радиуса изображения круглой метки от вызвавшего его вибрационного перемещения исследуемой материальной точки

В качестве нормирующего вибрационного перемещения исследуемой материальной точки удобно принять значение $M_N = 1000$ мкм. Экстраполяция аппроксимирующей прямой дает результат: $|L_z|(M_N) = 4,80838 \text{ run}$, принимая во внимание то, что в данном эксперименте $l_z < l_0$: $L_z(M_N) = -4,80838 \text{ run}$. Экспериментальное значение радиуса изображения метки при отсутствии вибрации l_0 приведено в табл. 1. Там же приведено экспериментальное значение площади изображения метки при отсутствии вибрации S_{im0} . Под приведенной погрешностью понимается относительная погрешность измерения при нормирующем значении измеряемой величины [16]. В качестве нормирующего обычно принимается максимальное значение измеряемой величины. Вычисления по методике, представленной в статье [17], приводят к результату: приведенная погрешность измерений $\delta_N M$ при нормирующем вибрационном перемещении $M_N = 1000$ мкм равна 0,777869 %.

Заключение

Разработана схема эксперимента по градуировке системы измерения амплитуды вибрационного перемещения по аппликату.

Получены изображения круглой метки: четкое при отсутствии вибрации и с вибрационным размытием. Их сравнение указывает на значимое различие.

Разработана методика экспериментальных исследований по формированию градуировочной характеристики виброизмерительной системы с анализом размытия изображения круглой метки.

Получены результаты экспериментальных исследований в виде таблицы и графика градуировочной характеристики виброизмерительной системы с анализом размытия изображения круглой метки.

Осуществлена линейная аппроксимация градуировочной характеристики виброизмерительной системы с анализом размытия изображения круглой метки.

Доказана адекватность линейной регрессионной модели градуировочной характеристики виброизмерительной системы с анализом размытия изображения круглой метки.

Библиографический список

1. Гришко, А. К. Прогнозирование и оптимизация управления процессов проектирования сложных технических систем в масштабе реального времени / А. К. Гришко, А. В. Лысенко, С. А. Моисеев // Надежность и качество сложных систем. – 2018. – № 1 (21). – С. 40–45. – DOI 10.21685/2307-4205-2018-1-5.
2. Гришко, А. К. Многокритериальный выбор оптимального варианта сложной технической системы на основе интервального анализа слабоструктурированной информации / А. К. Гришко, И. И. Кочегаров, А. В. Лысенко // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2017. – № 3 (21). – С. 97–107.
3. Optimizing structure of complex technical system by heterogeneous vector criterion in interval form / A. V. Lysenko, I. I. Kochegarov, N. K. Yurkov, A. K. Grishko // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – Vol. 1015, iss. 4. – DOI 10.1088/1742-6596/1015/4/042032.
4. Кузнецов, Н. С. Гибридный интеллект инженерии гетероструктур вычислительной техники / Н. С. Кузнецов, В. В. Смогунов, Л. Р. Фионова, Н. К. Юрков // Надежность и качество сложных систем. – 2018. – № 3 (23). – С. 85–97.
5. Моделирование следа размытия изображения круглой метки при ее компланарном и ортогональном виброперемещениях / А. В. Григорьев, В. А. Трусов, В. Я. Баннов, П. Г. Андреев, Г. В. Таньков // Труды международного симпозиума Надежность и качество. – 2015. – Т. 1. – С. 107–109.
6. Структура методики измерения параметров вибраций по следу размытия изображения круглой метки / А. В. Григорьев, Е. А. Данилова, С. А. Бростилов, И. Ю. Наумова, Э. В. Лапшин, А. А. Баранов // Труды международного симпозиума Надежность и качество. – 2015. – Т. 2. – С. 13–16.
7. Григорьев, А. В. Структура методики анализа следа вибрационного размытия изображения круглой метки / А. В. Григорьев, Н. К. Юрков, В. А. Трусов, В. Я. Баннов // Труды международного симпозиума Надежность и качество. – 2016. – Т. 2. – С. 28–31.
8. Григорьев, А. В. Формирование и описание отсчетных сегментов следа вибрационного размытия изображения круглой метки / А. В. Григорьев, А. В. Затылкин, А. В. Лысенко, Г. В. Таньков // Труды международного симпозиума Надежность и качество. – 2016. – Т. 2. – С. 31–37.
9. Григорьев, А. В. Анализ отсчетных сегментов следа вибрационного размытия изображения круглой метки / А. В. Григорьев, И. И. Кочегаров, С. А. Бростилов, Н. В. Горячев, П. Г. Андреев // Труды международного симпозиума Надежность и качество. – 2016. – Т. 2. – С. 37–41.
10. Каражанов, Б. Б. Особенности отображения вектора вибрационного перемещения материальной точки в плоскости изображения / Б. Б. Каражанов, А. В. Григорьев, Е. А. Данилова, А. К. Гришко // Труды международного симпозиума Надежность и качество. – 2017. – Т. 2. – С. 16–20.
11. Структурное описание размытия изображения круглой метки при возвратно-поступательном вибрационном перемещении исследуемой материальной точки / Г. Ж. Надырбеков, А. В. Григорьев, И. И. Кочегаров, А. В. Лысенко, Н. А. Стрельцов // Труды международного симпозиума Надежность и качество. – 2017. – Т. 2. – С. 11–13.
12. Анализ размытия изображения круглой метки при возвратно-поступательном вибрационном перемещении исследуемой материальной точки / Д. Х. Нуржанов, А. В. Григорьев, В. А. Трусов, В. Я. Баннов, Н. А. Стрельцов // Труды международного симпозиума Надежность и качество. – 2017. – Т. 2. – С. 14–16.
13. Вычисление выходных параметров системы измерения модуля и компонент вектора вибрационного перемещения исследуемой материальной точки объекта контроля / А. В. Григорьев, А. К. Гришко, Э. В. Лапшин, И. Ю. Наумова, Е. А. Данилова, Н. К. Юрков // Труды международного симпозиума Надежность и качество. – 2016. – Т. 2. – С. 41–44.
14. Методика калибровки системы трехкомпонентного измерения параметров вибраций на основе анализа геометрии следа размытия изображения круглой метки / А. В. Григорьев, В. Б. Алмаметов, А. И. Долотин, А. Г. Царев, Г. Г. Беликов, А. К. Гришко // Труды международного симпозиума Надежность и качество. – 2015. – Т. 2. – С. 16–19.
15. ГОСТ 27459–87 Системы обработки информации. Машинная графика. Термины и определения. – Москва : Стандартинформ, 2014. – 30 с.
16. РМГ 29–2013. Метрология. Основные термины и определения. – Москва, 1988. – 10 с.
17. Вероятностное прогнозирование погрешностей измерения радиуса изображения круглой метки по технологиям подсчета строк и пикселей / А. В. Григорьев, А. А. Чибриков, Г. В. Таньков, Е. А. Данилова // Труды международного симпозиума Надежность и качество. – 2018. – Т. 1. – С. 252–254.

References

1. Grishko A. K., Lysenko A. V., Moiseev S. A. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system* [Reliability and quality of complex systems]. 2018, no. 1 (21), pp. 40–45. DOI 10.21685/2307-4205-2018-1-5. [In Russian]
2. Grishko A. K., Kochegarov I. I., Lysenko A. V. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'* [Measurement. Monitoring. Management. Control]. 2017, no. 3 (21), pp. 97–107. [In Russian]
3. Lysenko A. V., Kochegarov I. I., Yurkov N. K., Grishko A. K. *Journal of Physics: Conference Series*. 2018, vol. 1015, iss. 4. DOI 10.1088/1742-6596/1015/4/042032.
4. Kuznetsov N. S., Smogunov V. V., Fionova L. R., Yurkov N. K. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system* [Reliability and quality of complex systems]. 2018, no. 3 (23), pp. 85–97. [In Russian]
5. Grigor'ev A. V., Trusov V. A., Bannov V. Ya., Andreev P. G., Tan'kov G. V. *Trudy mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality]. 2015, vol. 1, pp. 107–109. [In Russian]
6. Grigor'ev A. V., Danilova E. A., Brostilov S. A., Naumova I. Yu., Lapshin E. V., Baranov A. A. *Trudy mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality]. 2015, vol. 2, pp. 13–16. [In Russian]
7. Grigor'ev A. V., Yurkov N. K., Trusov V. A., Bannov V. Ya. *Trudy mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality]. 2016, vol. 2, pp. 28–31. [In Russian]
8. Grigor'ev A. V., Zatytkin A. V., Lysenko A. V., Tan'kov G. V. *Trudy mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality]. 2016, vol. 2, pp. 31–37. [In Russian]
9. Grigor'ev A. V., Kochegarov I. I., Brostilov S. A., Goryachev N. V., Andreev P. G. *Trudy mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality]. 2016, vol. 2, pp. 37–41. [In Russian]
10. Karazhanov B. B., Grigor'ev A. V., Danilova E. A., Grishko A. K. *Trudy mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality]. 2017, vol. 2, pp. 16–20. [In Russian]
11. Nadyrbekov G. Zh., Grigor'ev A. V., Kochegarov I. I., Lysenko A. V., Strel'tsov N. A. *Trudy mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality]. 2017, vol. 2, pp. 11–13. [In Russian]
12. Nurzhanov D. Kh., Grigor'ev A. V., Trusov V. A., Bannov V. Ya., Strel'tsov N. A. *Trudy mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality]. 2017, vol. 2, pp. 14–16. [In Russian]
13. Grigor'ev A. V., Grishko A. K., Lapshin E. V., Naumova I. Yu., Danilova E. A., Yurkov N. K. *Trudy mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality]. 2016, vol. 2, pp. 41–44. [In Russian]
14. Grigor'ev A. V., Almametov V. B., Dolotin A. I., Tsarev A. G., Belikov G. G., Grishko A. K. *Trudy mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality]. 2015, vol. 2, pp. 16–19. [In Russian]
15. GOST 27459–87 *Sistemy obrabotki informatsii. Mashinnaya grafika. Terminy i opredeleniya* [GOST 27459–87 System of information processing. Computer graphics. Terms and definitions]. Moscow: Standartinform, 2014, 30 p. [In Russian]
16. RMG 29–2013. *Metrologiya. Osnovnye terminy i opredeleniya* [RMG 29–2013. Metrology. Basic terms and definitions]. Moscow, 1988, 10 p.
17. Grigor'ev A. V., Chibrikov A. A., Tan'kov G. V., Danilova E. A. *Trudy mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality]. 2018, vol. 1, pp. 252–254. [In Russian]

Григорьев Алексей Валерьевич

кандидат технических наук, доцент,
кафедра конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: a_grigorev@mail.ru

Grigoriev Alexey Valeryevich

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of radio equipment design
and production,
Penza State University
(440026, 40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Лысенко Алексей Владимирович

кандидат технических наук, доцент,
кафедра конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: lysenko_av@bk.ru

Таньков Георгий Васильевич

кандидат технических наук, доцент,
кафедра конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: kipra@pnzgu.ru

Наумова Ирина Юрьевна

кандидат технических наук, доцент,
кафедра конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: ira.ipvla@yandex.ru

Юрков Николай Кондратьевич

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: yurkov_NK@mail.ru

Lysenko Alexey Vladimirovich

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of radio equipment design
and production,
Penza State University
(440026, 40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Tankov Georgiy Vasilievich

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of radio equipment design
and production,
Penza State University
(440026, 40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Naumova Irina Yurievna

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of radio equipment design
and production,
Penza State University
(440026, 40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Yurkov Nikolay Kondrat'evich

doctor of technical sciences, professor,
head of sub-department of radio equipment design
and production,
Penza State University
(440026, 40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Образец цитирования:

Градуировочная функция измерения аппликаты вибрационного перемещения на основе анализа размытия изображения круглой метки / А. В. Григорьев, А. В. Лысенко, Г. В. Таньков, И. Ю. Наумова, Н. К. Юрков // Надежность и качество сложных систем. – 2019. – № 3 (27). – С. 70–77. – DOI 10.21685/2307-4205-2019-3-8.

А. П. Быков, С. В. Андросов, М. Н. Пиганов

МЕТОДИКА ТЕПЛОВАКУУМНЫХ ИСПЫТАНИЙ ПРИБОРОВ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

A. P. Bykov, S. V. Androsov, M. N. Piganov

TECHNIQUE OF THERMAL-VACUUM TESTING OF SPACECRAFT

Аннотация. Рассматривается проведение операции дегазации на приборах из состава космического аппарата (КА) для повышения качества и надежности изделия в целом. Рассмотрена общая процедура проведения термобалансных и термовакуумных испытаний по программе наземных испытаний. Определены минимальные требования к функциональным испытаниям. Предложены режимы проведения испытаний. Описаны требования к материалам космического аппарата и электронных приборов. Определена последовательность кондиционирования приборов. Предложена методика тепловакуумных испытаний. Она предусматривает два этапа: проверку работоспособности приборов и КА и их дегазацию. Подробно разработана операция дегазации приборов. Определены рациональные режимы ее проведения. Показано, что данная методика позволяет значительно сохранить время откачки вакуумной камеры и резко уменьшить интенсивность выделения высокомолекулярных соединений. Установлено, что выбранные режимы операции дегазации приборов позволяют повысить качество и надежность КА в целом.

Ключевые слова: методика, приборы, дегазация, качество, ракетно-космическая техника, космический аппарат, тепловакуумные испытания, термобарокамера, печатные платы.

Abstract. Generic procedure of thermal-balance and thermal-vacuum test operations under the ground test program was considered. The minimum requirements for functional tests were determined. The modes of testing were proposed, the requirements for the materials of the spacecraft and electronic devices were described. The sequence of air conditioning of devices was determined. The technique of thermal-vacuum tests was offered. It involves two stages: functionality test of devices and spacecraft and their degasification. The degasification operation of devices was developed in detail. The rational modes of its carrying out are defined. It is shown that this technique can significantly reduce the pumping time of the vacuum chamber and sharply reduce the rate of evolution of high-molecular compounds. It is established that the selected modes of degasification operations of devices can improve the quality and reliability of the spacecraft as a whole.

Keywords: technique, devices, degasification, quality, rocket and space technology, spacecraft, thermal-vacuum tests, thermal-vacuum chamber, printed circuit boards.

Введение

Космический вакуум – разреженная космическая газообразная материя – оказывает разнообразные воздействия на материалы, узлы и блоки бортовых приборов, находящихся вне гермоотсеков космических аппаратов (КА). Эти приборы представляют собой очень сложные оптико-механические, электрические и электронные устройства. Поэтому даже знание детальных вакуумных характеристик составных частей не позволяет на современном этапе заранее предсказать те или иные особенности их поведения в космическом полете. Единственным приемлемым на сегодняшний день способом их подготовки к полетам являются тщательные предполетные исследования и испытания в специальных наземных установках, моделирующих воздействия космического вакуума [1].

В соответствии с ГОСТом [2] все космические аппараты должны проходить термобалансные и термовакуумные испытания по программе наземных испытаний.

Термобалансные испытания (ТБИ) позволяют провести проверку соответствия системы обеспечения теплового режима (СОТР) КА заданным требованиям. Они должны подтвердить, что СОТР поддерживает требуемые эксплуатационные температурные пределы приборов и посадочных мест

приборов по всему КА. Эти испытания должны дать все необходимые данные для подтверждения расчетной тепловой модели.

Термовакuumные испытания (ТВИ) проводятся с целью проверки электрических характеристик приборов, аппаратуры и оборудования в условиях вакуума и при имитации экстремальных или близких к ним, прогнозируемых для полета, значений температуры. ТВИ должны продемонстрировать способность испытуемого выполнить требования проекта. Виды испытательных воздействий и конфигурация испытаний приводятся в плане испытаний КА или в комплексной программе экспериментальной отработки.

Как правило, функциональные испытания, выполняемые в течение ТВИ, включают следующие минимальные требования к функционированию:

- при минимальной холодной температуре;
- при максимальной горячей температуре;
- во время переходов между температурами.

Для конкретного проекта КА ТВИ могут включать следующие режимы:

- имитация участка выведения;
- термоциклирование;
- проверка включения приборов, аппаратуры и оборудования при минимальной и максимальной температуре.

В ряде случаев при наличии достоверных данных по проектам-прототипам термовакuumные испытания заменяются тепловакуумными, когда идет проверка только при максимальной горячей температуре.

Для обеспечения теплового режима РЭС некоторых типов КА в лабораторных условиях необходимо воспроизвести следующие факторы космического пространства:

- глубокий вакуум;
- солнечное излучение;
- излучения планет солнечной системы;
- «холод» и «черноту» пространства за пределами телесных углов, занимаемых Солнцем и рассматриваемой планетой.

Для проведения тепловых испытаний на Земле используются специальные барокамеры. Они должны воспроизводить некоторые условия космического пространства, прежде всего давление, температуру и солнечную радиацию. Температура космического пространства с достаточной для практических целей точностью имитируется путем охлаждения внутренних стенок (экранов) барокамер жидким азотом (77К). Изнутри эти экраны покрывают специальными покрытиями, обеспечивающими степень их черноты, близкую к единице. Это делается для того, чтобы излучаемый объектом тепловой поток поглощался стенкой, а не отражался ею обратно. Циклограмма работы приборов и оборудования, по возможности, должна соответствовать рабочей при эксплуатации на орбите. В полной мере имитация этих условий сложна. Поэтому на практике обычно ограничиваются той или иной степенью приближения. Целесообразно ограничиться разумной степенью приближения, определяемой пересечением технической осуществимости и экономической целесообразности создания наземных испытательных установок.

Вопрос выбора испытательных воздействий и этапов проведения испытаний ЭРИ радиоэлектронных узлов, приборов и систем не является тривиальным. Так, в работе [3] при разработке нового варианта КТВ микросборок вместо 35 испытательных воздействий, используемых ранее, было рекомендовано оставить 24. Остальные испытательные воздействия было решено перенести на этап испытания приборов, в состав которых входят эти микросборки.

В связи с этим поиск новых, более эффективных вариантов испытания РЭС КА является актуальной задачей.

Цель работы – повышение эффективности тепловакуумных испытаний приборов КА.

При проведении тепловакуумных испытаний (ТВИ) изделия в нашем случае решались две основные задачи:

1) проверка работоспособности КА в условиях пониженного давления (имитация воздействия космического вакуума);

2) дегазация КА для уменьшения образования собственной внешней атмосферы вокруг него, которая служит причиной «загрязнения» поверхности аппарата (оптика, солнечные батареи, астронавигационное оборудование и другое) в условиях космического вакуума.

Вакуумная система испытательных установок должна в течение длительного времени обеспечивать поддержание в объеме давления 10^{-3} – 10^{-5} Па и включать высокопроизводительную форвакуумную безмасляную откачную систему на основе спиральных насосов и высоковакуумную откачную систему турбомолекулярных и криогенных насосов большой производительности.

Выбор материалов КА и приборов

Наружные поверхности КА подвергаются в космосе вакуумно-тепловому воздействию. При этом наблюдается газовыделение, продукты которого загрязняют элементы изделий и окружающую среду. В связи с этим для наружных поверхностей КА рекомендуется применять материалы, имеющие общую потерю массы не более 1 % и содержание летучих конденсирующихся веществ не более 0,1 % [4]. Непригодными для наружных поверхностей считают и материалы, удовлетворяющие данным требованиям, но выделяющие окрашенные продукты, которые могут влиять на эксплуатационные характеристики элементов и приборов КА.

Для оценки пригодности материалов для изделий космической техники проводят испытания на потерю массы и содержание летучих конденсирующихся веществ при вакуумно-тепловом воздействии. При этом образцы материалов помещаются в специальные изотермические контейнеры. Для исключения влияния условий хранения на результаты испытаний образцы предварительно кондиционируют. При этом создается атмосфера с постоянной относительной влажностью (50 ± 5) % при температуре $20(\pm 3)$ °С. Кондиционирование образцов проводят до того момента, пока уменьшение массы образца составит не более $2 \cdot 10^{-4}$ г за 24 ч при периодичности взвешивания образцов раз в сутки.

В соответствии с ГОСТом [5] кондиционирование – это серия операций, необходимых для того, чтобы привести температуру и влажность пластмассы или образца для испытания в состояние равновесия с установленной температурой и влажностью. Время кондиционирования t'_{70} , необходимое для образца толщиной d , определяют по формуле

$$t'_{70} = t_{70} \frac{d^2}{d_0^2},$$

где t_{70} – время кондиционирования, необходимое для достижения равновесной влажности для образца толщиной d_0 по ISO62.

При известном коэффициенте диффузии влаги D время достижения равновесия t_{70} определяется следующим образом:

$$t_{70} = \frac{d^2}{\pi^2 D}.$$

Допускаемое отклонение для относительной влажности ΔU определяют по формуле

$$\Delta U = k_A \Delta \theta + k_D \Delta \theta_D,$$

где k_A – коэффициент, зависящий от температуры воздуха; $\Delta \theta$ – допускаемое отклонение температуры воздуха; k_D – коэффициент, зависящий от точки росы; $\Delta \theta_D$ – допускаемое отклонение точки росы.

Операция дегазации

При дегазации КА в сборе затрачивается значительное время на откачку камеры до необходимого давления (около 72 ч). В случае отказа какого-либо узла или прибора расходуется значительное количество времени и средств на разбор изделия и поиск неисправности. Для оценки изменения затрат при испытаниях КА было принято решение проводить предварительную операцию дегазации на каждом приборе, входящем в состав изделия, до окончательной сборки. Материалы, использованные при изготовлении приборов, были выбраны таким образом, чтобы удовлетворять требованиям [4].

Условия дегазации (выбирались с учетом требований конструкторской документации (КД) по дегазации КА в сборе):

Давление: не выше $5 \cdot 10^{-5}$ мм рт.ст. ($6,665 \cdot 10^{-3}$ Па).

Скорость изменения давления в камере – не выше 10 мм рт.ст./с.

Температура: $50\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (согласно КД на прибор).

Время дегазации: 72 ч.

Дегазация проводилась в термобарокамере АТМ2.708.005 производства ООО «Аврора-ТЭХМО» г. Волгоград. При этом температура в камере задавалась на пульте управления, а на испытуемом приборе контролировалась с помощью двух термометров сопротивления ТМ-221 (погрешность измерения – $\pm 0,9$ Ом), закрепленных на торцах корпуса прибора (согласно КД) и подсоединенных к миллиомметру Е6-25. Давление измерялось вакуумметром широкодиапазонным WRG-S (поверен в соответствии с МИ 140-89).

Подготовка термобарокамеры АТМ2.708.005 к дегазации проводилась следующим образом.

Камера была очищена, обезжирена, затем обезгажена при давлении, не превышающем $5 \cdot 10^{-5}$ мм рт.ст. ($6,665 \cdot 10^{-3}$ Па), температуре $80\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 12 ч.

Прибор устанавливался во внутренний объем камеры, датчики температуры крепились на крышке и на боковой стенке корпуса прибора.

Дегазация проводилась в следующей последовательности:

- внутренний объем термобарокамеры откачивался до давления не более $5 \cdot 10^{-5}$ мм рт.ст. ($6,665 \cdot 10^{-3}$ Па);

- камера нагревалась до температуры $50\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$;

- производилась выдержка 12 ч;

- фиксировались показания датчиков температуры, давления;

- производилась выдержка в течение 72 ч.

Завершающие работы:

- отключались нагреватели камеры;

- выключалась откачка, в камеру напускался очищенный сухой сжатый воздух до нормального давления;

- выполнялся демонтаж прибора (откреплялись датчики температуры, прибор извлекался из внутреннего объема камеры);

- выполнялась проверка прибора на чистоту, отсутствие механических повреждений, посторонних предметов;

- выполнялась проверка прибора в объеме входного контроля.

Результаты испытаний

Операцию дегазации приборов из состава КА применяли для оценки качества и надежности приборов, паяных соединений и монтажа электрорадиоизделий (ЭРИ) на печатных платах (ПП). При проведении проверок в объеме входного контроля после дегазации был выявлен отказ одной платы из состава прибора. Подробный анализ показал, что дефект вызван «вспучиванием» ЭРИ и отрывом контактных площадок с поверхности ПП. Эффект «вспучивания» явился следствием нарушения технологического процесса при приклейке ЭРИ к поверхности ПП: клей на подложку был нанесен «елочкой», а не сплошным слоем. Воздух, который остался между ЭРИ и ПП, послужил причиной «вспучивания» в условиях пониженного давления. Плата была перемещена на монтажный участок и отремонтирована.

Следует отметить, что подобные дефекты исключаются в случае, если при изготовлении ПП влагозащитное покрытие наносится методом вакуумного осаждения из газовой фазы (полипараксилилен), так как процесс идет при давлении 10^{-2} мм рт.ст. (3–5 Па) [6, 7].

Заключение

По результатам работы выявлено значительное сокращение (до 4 раз) времени откачки вакуумной камеры при дегазации изделия в сборе после проведения предварительной дегазации приборов из состава изделия. По результатам контроля процесса дегазации изделия с помощью масс-спектрометра выявлено существенное уменьшение (в 10–20 раз) интенсивности выделения высокомолекулярных соединений за время дегазации в течение 72 ч.

Кроме того, результаты ТВИ изделия в сборе показали отсутствие загрязнений поверхностей зеркал и экранов, что также подтверждает эффективность дегазации составных частей изделия перед окончательной сборкой КА.

Предложенный вариант частной методики ТВИ соответствует основным принципам общей методики производственных испытаний электронных узлов КА [8].

Библиографический список

1. *Кеменов, В. Н.* Вакуумная техника и технология : учеб. пособие / В. Н. Кеменов, С. Б. Нестеров. – Москва : Издательство МЭИ, 2002.
2. ГОСТ Р 56469–2015. Аппараты космические автоматические. Термобалансные и термовакuumные испытания. – Москва : Стандартиформ, 2017. – 12 с.
3. *Тюлевин, С. В.* Экспертные оценки в управлении качеством электронных средств / С. В. Тюлевин, М. Н. Пиганов. – Самара : Изд-во СГАУ, 2015. – 119 с.
4. ГОСТ Р 50109–92. Материалы неметаллические. Метод испытания на потерю массы и содержание летучих конденсирующихся веществ при вакуумно-тепловом воздействии. – Москва : Госстандарт России, 1992. – 10 с.
5. ГОСТ 12423–2013 (ISO 291:2008). Пластмассы. Условия кондиционирования и испытания образцов (проб). – Москва : Стандартиформ, 2014. – 8 с.
6. *Ширшова, В. А.* Технология влагозащиты и электроизоляции изделий РЭА полипараксилиленом / В. А. Ширшова // Компоненты технологии. – 2002. – № 2. – С. 32–36.
7. *Наседкин, А. В.* Разработка тестовых конструкций для испытания электронных устройств космической аппаратуры / А. В. Наседкин, И. Ю. Шумских // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2014. – № 2 (44). – С. 118.
8. *Наседкин, А. В.* Методика производственных испытаний электронных узлов / А. В. Наседкин, М. Н. Пиганов // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2012. – № 7. – С. 67–75.

References

1. Kemenov V. N., Nesterov S. B. *Vakuumnaya tekhnika i tekhnologiya: ucheb. posobie* [Vacuum engineering and technology: tutorial]. Moscow: Izdatel'stvo MEI, 2002. [In Russian]
2. GOST R 56469–2015. *Apparaty kosmicheskie avtomaticheskie. Termobalansnye i termovakuumnye ispytaniya* [GOST R 56469–2015. Spacecraft automatic. Thermobalance and thermal-vacuum tests]. Moscow: Standartinform, 2017, 12 p. [In Russian]
3. Tyulevin S. V., Piganov M. N. *Ekspertnye otsenki v upravlenii kachestvom elektronnykh sredstv* [Expert assessment and quality control of electronic tools]. Samara: Izd-vo SGAU, 2015, 119 p. [In Russian]
4. GOST R 50109–92. *Materialy nemetallicheskie. Metod ispytaniya na poteryu massy i sodержание letuchikh kondensiruyushchikhsya veshchestv pri vakuumno-teplovom vozdeystvii* [GOST R 50109–92. Non-metallic materials. Test method for mass loss and content of volatile condensable substances under vacuum-thermal effect]. Moscow: Gosstandart Rossii, 1992, 10 p. [In Russian]
5. GOST 12423–2013 (ISO 291:2008). *Plastmassy. Usloviya konditsionirovaniya i ispytaniya obraztsov (prob)* [GOST 12423–2013 (ISO 291:2008). Plastics. Conditions of conditioning and testing of samples (samples)]. Moscow: Standartinform, 2014, 8 p. [In Russian]
6. Shirshova V. A. *Komponenty tekhnologii* [Technology components]. 2002, no. 2, pp. 32–36. [In Russian]
7. Nasedkin A. V., Shumskikh I. Yu. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta* [Bulletin of Samara State Aerospace University]. 2014, no. 2 (44), p. 118. [In Russian]
8. Nasedkin A. V., Piganov M. N. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta* [Bulletin of Samara State Aerospace University]. 2012, no. 7, pp. 67–75. [In Russian]

Быков Алексей Петрович

аспирант,
Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева;
(443086, Россия, г. Самара, Московское шоссе, 34);
испытатель деталей и приборов,
Ракетно-космический центр «Прогресс»
(443009, Россия, г. Самара, ул. Земеца, 18)
E-mail: kipres@ssau.ru

Андросов Сергей Владимирович

аспирант,
Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева;
(443086, Россия, г. Самара, Московское шоссе, 34);
инженер,
Ракетно-космический центр «Прогресс»
(443009, Россия, г. Самара, ул. Земеца, 18)
E-mail: kipres@ssau.ru

Bykov Aleksey Petrovich

postgraduate student,
Samara National Research University
named after academician S. P. Korolev
(443086, 34 Moscow highway, Samara, Russia);
tester of parts and devices
Rocket and space center "Progress"
(443009, 18 Zemetsa street, Samara, Russia)

Androsov Sergey Vladimirovich

postgraduate student,
Samara National Research University
named after academician S. P. Korolev
(443086, 34 Moscow highway, Samara, Russia);
engineer,
Rocket and space center "Progress"
(443009, 18 Zemetsa street, Samara, Russia)

Пиганов Михаил Николаевич

доктор технических наук, профессор,
кафедра конструирования и технологии
электронных систем и устройств,
Самарский национальный исследовательский
университет имени академика С. П. Королева
(443086, Россия, г. Самара, Московское шоссе, 34)
E-mail: kipres@ssau.ru

Piganov Mikhail Nikolaevich

doctor of technical sciences, professor,
sub-department of construction and technology
of electronic systems and devices department,
Samara National Research University
named after academician S. P. Korolev
(443086, 34 Moskovskoye highway, Samara, Russia)

Образец цитирования:

Быков, А. П. Методика тепловакуумных испытаний приборов космического аппарата / А. П. Быков, С. В. Андросов, М. Н. Пиганов // Надежность и качество сложных систем. – 2019. – № 3 (27). – С. 78–83. – DOI 10.21685/2307-4205-2019-3-9.

УДК 519.718

DOI 10.21685/2307-4205-2019-3-10

А. И. Имамутдинов, Н. В. Слепцов

АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ЭВОЛЮЦИОННО-ГЕНЕТИЧЕСКИХ ВЫЧИСЛЕНИЙ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ОБОБЩЕНИЯ

A. I. Imamutdinov, N. V. Sleptsov

ANALYSIS OF THE PROCESS OF EVOLUTIONARY GENETIC CALCULATIONS IN TERMS OF GENERALIZATION CHARACTERISTICS

Аннотация. *Актуальность и цели.* Эволюционно-генетические вычисления активно применяются для решения сложных задач безотносительно к формально-логическим характеристикам связей между параметрами этих задач. Их основное преимущество состоит в возможности получения некоторой кодировки решения исходя из минимальной информации о входных массивах данных и реакции модели на входные данные. Расширение применения методов требует в числе прочих задач обеспечения высоких показателей обобщения для полученного решения. *Методы.* Рассмотрение свойств процесса формирования решения при эволюционных вычислениях проведено на примере поиска стратегии решения игровой задачи – дилемме заключенного (ДЗ), относящейся к классу некооперативных игр с ненулевой суммой и широко применяемой в теории игр и машинном обучении. *Результаты.* В результате исследования модели выявлены причины формирования наиболее эффективных стратегий поведения и особенности, накладываемые эволюционным характером получения результата. *Выводы.* Доказана возможность повышения показателей обобщения для решений, полученных методами эволюционных вычислений применением предложенных подходов.

Ключевые слова: эволюционные вычисления, генетические алгоритмы, обучение, игровые стратегии, массовые исключения, свертспециализация, сходимость.

Abstract. *Background.* Evolutionary – genetic calculations are actively used to solve complex problems, regardless of the formal – logical characteristics of the relationships between the parameters of these problems. Their main advantage consists in the possibility of obtaining some coding of the solution based on minimal information about the input data arrays and the response of the model to the input data. Expanding the application of methods requires, among other tasks of ensuring high indicators of generalization for the solution obtained. *Methods.* Consideration of the properties of the decision-making process in evolutionary computations is carried out using the example of finding a strategy for solving the DZ game problem – the dilemma of the prisoner, belonging to the class of noncooperative games with a nonzero sum and widely used in game theory and machine learning. *Results.* The study of the model revealed the reasons for the formation of the most effective behavioral strategies and features imposed by the evolutionary nature of the result. *Conclusions.* The possibility of increasing the generalization indices for solutions obtained by the methods of evolutionary computing using the proposed approaches has been proved.

Keywords: evolutionary computations, genetic algorithms, training, game strategies, mass exclusions, super-specialization, convergence.

Введение

Эволюционно-генетические вычисления, основывающиеся на применении методов генетического моделирования, генетических алгоритмов (ГА) и генетического программирования [1] активно применяются для решения сложных задач безотносительно к формально-логическим характеристикам связей между параметрами этих задач. Их основное преимущество состоит в возможности получения некоторой кодировки решения исходя из минимальной информации о входных массивах данных и реакции модели (формируемой системы, решения) на входные данные.

Направление поиска в течение цикла генетических вычислений зависит от решаемой задачи, структуры кодированной области поиска для задачи, генетических операторов. При выборе способа кодирования для ГА часто возможно следовать принципу минимальности кодирующего алфавита, но если одновременно следовать принципу создания значимых строительных блоков, способ кодирования не становится настолько очевидным, поскольку интуитивные представления о структуре пространства поиска задачи могут отличаться от пространств, соответствующих двоичной кодировке.

Обобщение как характеристика эволюционного решения

Рассмотрение некоторых аспектов эволюционного обучения и ограничений при использовании ГА проведем на примере получения решения для одного из наиболее сложных для анализа классов задач – моделирования игровых стратегий.

В ряде источников, например в [2, 3], приведены результаты исследования эволюционного решения ряда игр. Модели анализируют популяции стратегий ГА, каждая из которых решает игровую задачу по отношению к каждой другой стратегии в популяции. Генерируемая динамическая среда обеспечивает стратегии высокого качества. Однако высокое качество стратегий внутри популяции не гарантирует такового для популяции произвольной, поэтому и встает вопрос о дополнительных характеристиках решения, именно – показателях обобщения. Такие показатели в настоящее время представляются предельно актуальными в рамках, например, проблематики искусственного интеллекта.

В работах [1, 3] при исследовании процесса эволюционного обучения отмечена характерная особенность развития эволюционного процесса генерации качественных стратегий. При проведении игры достаточно быстро формируется популяция стратегий с высокими характеристиками и в течение длительного периода эпох моделирования они доминируют. Такие периоды составляют порядка 200–300 эпох при стандартном числе эпох моделирования порядка 300. Однако с достаточным постоянством периоды доминирования высококачественных решений заменяются на низкокачественные (так называемые массовые исключения), причем замены происходят достаточно быстро. Подобный характер сходимости наблюдается и при решении других классов задач методами эволюционно-генетического моделирования. Внешние причины таких выбросов отсутствуют, поэтому реальные причины таких характерных отклонений необходимо рассмотреть и по возможности минимизировать их влияние.

Прежде всего отметим, что особи популяции представляют собой некоторые объекты, кодирующие сложноорганизованное решение, представляющее совокупность многих параметров. Оценка особи (в нашем случае – игровой стратегии) проводится либо по локальным показателям качества, либо по комплексным, но с учетом приоритетности отдельных показателей, что незначительно лучше с точки зрения робастности: особи/стратегии, успешные в локальной популяции при изменении условий вследствие накопления мутаций, оказываются непригодными для этих новых условий и деградируют.

Низкие показатели обобщения для высококачественных стратегий в общем случае лежат в таких обстоятельствах. Поиск решения средствами генетического поиска осуществляется как правило на сложном рельефе. В такой области поиска ГА с фиксированной функцией пригодности подобная функция создает аттракторы, часть которых непостоянны. Находясь вблизи от аттрактора популяция слабо изменяется, поэтому притяжение к непостоянному аттрактору создает впечатление сходимости. Одновременно, следствием непостоянности аттрактора являются его изменения, что влечет резкие перемены в популяции.

Поскольку в условиях реального эволюционного обучения данная функция может изменяться, получаемые результаты имеет смысл распространить и на случай нефиксированной функции пригодности.

В качестве базовой задачи, в рамках которой будем исследовать особенности формирования игровых стратегий эволюционными методами, можно выбрать дилемму заключенного (ДЗ), решения, результаты, анализы и стратегии, образованные на ее основе, которые достаточно широко используются в целом ряде областей, таких как теория управления, экономика, машинное обучение.

Она фактически является удобным тестовым примером, дающим простое и наглядное представление о характере эволюционного процесса обучения в условиях неопределенности, позволяет легко задавать параметры, позволяющие легко проследить тренды стратегий, оценить их качество, дать оценку их критическим параметрам.

Задача формулируется стандартным образом – для двух участников на каждом шаге игры возможен выбор одной из двух стратегий – сотрудничество либо отказ от него, причем каждый из участников не имеет данных о выборе другого. При этом для каждой пары выбранных стратегий существует оценка выигрыша (премии) R для пары $C-C$, P – для пары $O-O$, S – для пары $C-O$ и T – для пары $O-C$. Соотношения для величины выигрыша следующие:

$$\begin{aligned} T > R > P > S; \\ R > (S + T) / 1. \end{aligned} \quad (1)$$

Принимаемые значения для данной реализации игры представлены на рис. 2.

Был установлен ряд ограничений. Первое, игра не бесконечна, число возможных итераций – 50 раундов. Второе ограничение – стратегия сохраняет данные лишь только о трех предшествующих реализациях. Генотип стратегии допускает битовое представление возможных действий (0 для сотрудничества, 1 – для отказа) и формирует таблицу поиска.

Например, пусть три предыдущих действия одного игрока были « $C-O-C$ » (010), соответствующие три действия его противника были « $O-C-O$ » (100), их объединение формирует строку 100010_2 (34_{10}). Действие указывается в 34 разряде генотипа одного игрока. У противника объединение действий даст 010100_2 (20_{10}), поэтому указание действий проводится в позиции 20 генотипа.

Поскольку в принятой кодировке отсутствует возможность обратиться к предыдущим шагам для начальных трех позиций, относящиеся к ним действия сформированы искусственно и хронология фактических результатов начинается с четвертой итерации.

Эволюция взаимодействия

Сверхспециализация: эволюция взаимодействия. Стратегии поведения участников ДЗ варьируются от крайне антагонистических до крайне коллаборационных. При анализе любых реализаций в условиях (1) характерным показателем эволюции стратегий поведения является эволюция сотрудничества, поскольку стратегии совместных действий оказываются в конечном счете жизнеспособнее и обеспечивают деградацию антагонистичных участников. Типичный пример эволюции стратегии сотрудничества представлен на рис. 3. Начальные популяции предполагают случайные стратегии, в том числе индивидуалистические, дающие в этих условиях определенные возможности развития стратегий. На рубеже 9–14 поколений стратегии индивидуализма вырождаются (в конечном счете из-за того, что возможности обоих участников выше), стратегии сотрудничества обеспечивают успешное противостояние оппонентам и обеспечивают более высокий уровень показателей. На рис. 1 значение среднего выигрыша указывает на стратегию сотрудничества, а именно, после 50 итераций доминирующим является сотрудничество, дающее средний выигрыш 3. На рис. 2 показано изменение средней оценки пригодности и ее стандартного отклонения в эволюционирующих поколениях (300) для 30 прогонов модели.

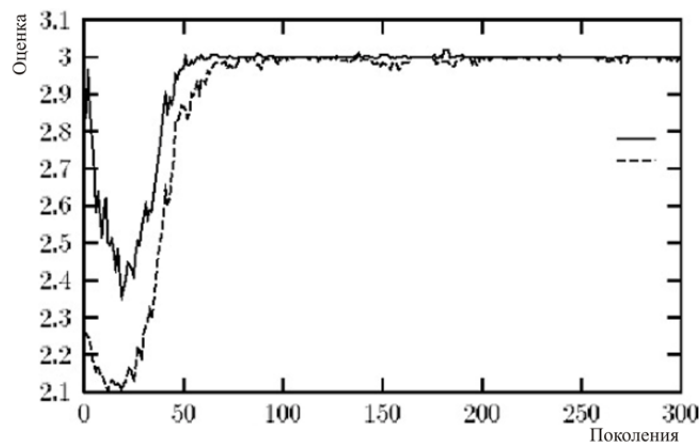


Рис. 1. Средний выигрыш

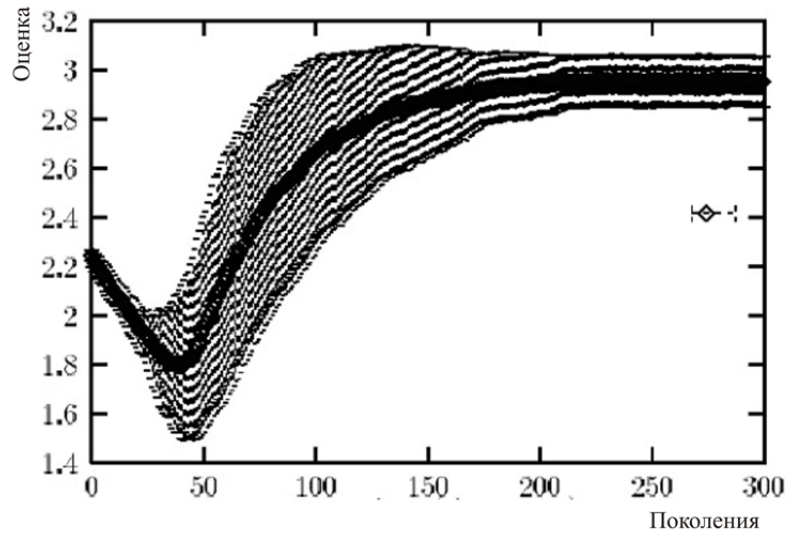


Рис. 2. Средняя оценка пригодности

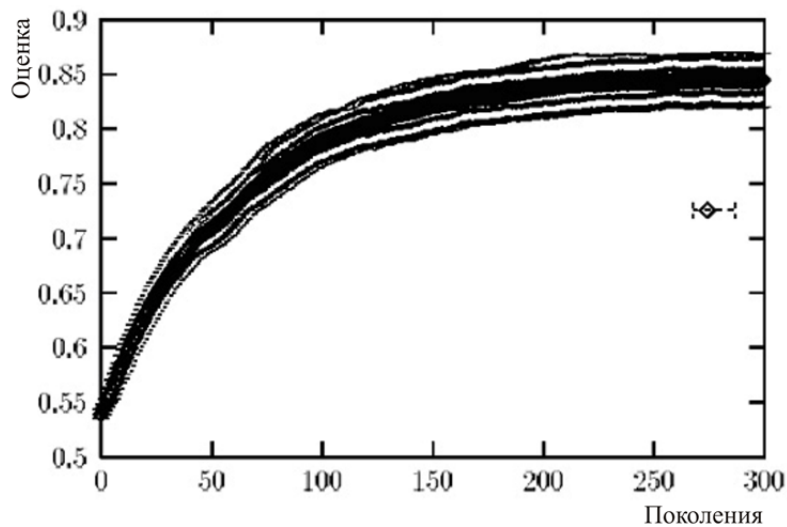


Рис. 3. Смещение в популяции

Оценка оптимального числа итераций может быть проведена с помощью данных, приведенных на рис. 3, отображающем зависимость среднего отклонения смещения для популяции в зависимости от номера итерации.

Значение оценки равное 0,85 определяет сводимость конкретной позиции к символу 0 либо 1 в 85 % случаев. Характер кривой после 250 поколений определяет устойчиво сходимый процесс.

Стабилизация смещения в популяции на 85 %, а не на 100 % объясняется следующим обстоятельством. Схождение генотипа к определенной стратегии показывает, что в этом случае он обеспечивает реакцию для всех имеющихся внешних воздействий, иначе говоря, и указание в генотипе членов популяции на необходимость выбора стратегий для таких не встречающихся обстоятельств не дает ни преимущества, ни штрафа. Фактически мы наблюдаем частичную атрофию стратегий, что вполне может вызывать непредсказуемые действия.

Разнообразие признаков в популяции обеспечивается двумя причинами. Первая – это отсутствие как преимуществ, так и штрафных санкций в стадии стабилизации параметров. Вторая – влияние мутации. Отсюда, несмотря на недостижимость уровня смещения, в 100 % абсолютно доминирующей стратегией в популяции является С – С, т.е. сотрудничество. Остается открытым вопрос, в какой степени эта стратегия будет обладать свойствами универсальности при изменяющихся условиях, иначе говоря, свойствами обобщения.

Специализация и возникновение массовых исключений. При достижении определенных показателей стабильности в характеристиках обучения встает проблема сроков окончания обучения. Можно либо продолжать его для расширенного диапазона ситуаций, в основном, не встречающихся на практике, либо можно ограничиться уже рассмотренными, наиболее характерными, но неизбежно обладающими свойствами локальности. Расширение диапазона влечет расширение разнообразия свойств и повышение устойчивости к внешнему окружению или в конечном счете к повышению обобщающей способности полученного решения. Сужение диапазона ситуаций ведет к сверхспециализации, результатом которой становится ослабление устойчивости, ухудшение обобщающих способностей. Незначительный выход за пределы обучающих множеств ситуаций, например, в результате тривиальной мутации, ведет к резкому смещению в пространстве поиска, нивелируя предшествующие полученные результаты.

На рис. 4 показан процесс схождения к оптимальной стратегии, в целом аналогичный рис. 1. Однако появление мутации в одной из итераций резко меняет характер процесса. Стратегия отказа от сотрудничества, успешная при общем предшествовавшем доминировании стратегии сотрудничества, использует локальные преимущества временного характера и расширяется до тех пор, пока число жертв стратегии незначительно и количество некооперирующих особей не достигнет предела, за которым такая стратегия перестает давать преимущества (эпохи 222 – 310). В результате популяция возвращается к прежней стратегии *C–C*, вернется к стратегии сотрудничества, но в нашем случае примерно 1/5 часть процесса ушла на ликвидацию выброса.

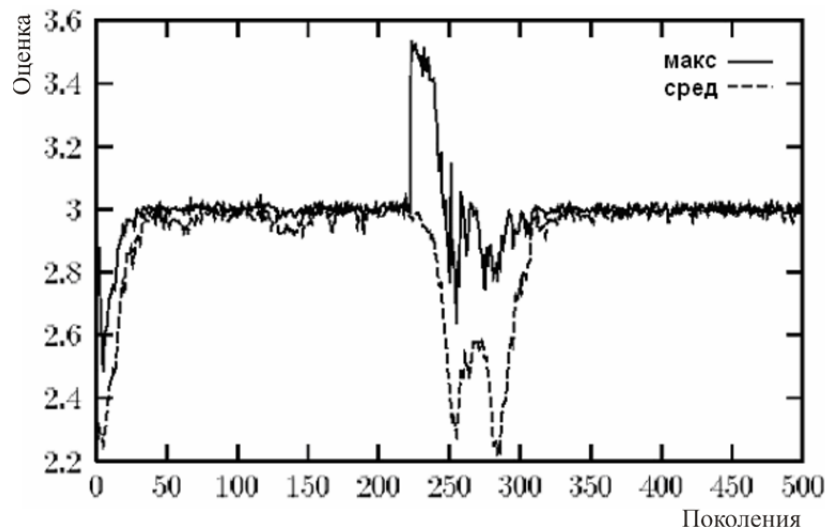


Рис. 4. Оценка среднего выигрыша, ситуация т.н. исключения

В целом аналогичные выбросы редки, а периоды стабильности длительны, что соответствует взаимным уровням влияния мутаций и кроссовера на эволюционный процесс. В условиях длительного моделирования, несмотря на достаточную редкость, выбросы достаточно обычны, поэтому типичным оказывается характер поведения модели на рис. 1. В среднем рис. 4 типичен лишь для одного прогона из 30, иными словами, имеет вероятность порядка 0,03–0,04, к тому же чаще всего выбросы не носят столь резкого характера.

Отметим, что если общей причиной выбросов является сверхспециализация решений (генотипов) в окружении без разнообразных внешних факторов, то их реализация в модели обусловлена такими причинами.

В данном случае генотип особи – это таблица поиска с возможными вариантами поведения (*C* либо *O*) для каждой из потенциально возможных последовательностей предыдущих шагов развития игровой стратегии. В нашем случае стратегия игрока *A* противостоит стратегии игрока *B* после длительного периода доминирования стратегии *C – C* (взаимное сотрудничество игроков, приносящее обоим максимальный средний выигрыш).

Пусть предшествующая хронология трех действий:

- для *A* – «*O–C–C*»;
- для *B* – «*C–C–C*».

В кодировке «0» для C и «1» – для O запись указанной хронологии для $B - (100000 = 32_{10})$ определяет требование указать в 32 разряде строки генотипа, т.е. изменение игроком A характера поведения определит в свою очередь действие в таблице поиска, формирует генотип второго участника. Очевидное принятие ответных мер как стратегия ответных действий на выбор явно конфликтного взаимодействия не приводит к ожидаемому результату в развивающейся закрытой популяции взаимодействующих особей (рис. 5). Несмотря на очевидное селективное давление, конкретный разряд как действие, предпринятое на начальном участке эволюционного развития популяции после односторонней неудачи в виде выбора стратегии возмездия как ответной меры, в популяции оперативно восстанавливается как доминирующая стратегия сотрудничества. Для чистой популяции участников с диминированием стратегии $C-C$ какая-либо односторонняя неудача исключена, и выбор после односторонней неудачи стратегии возмездия маловероятен. В результате для всех членов популяции будет обеспечен дрейф к «0» (C) в бите 32.

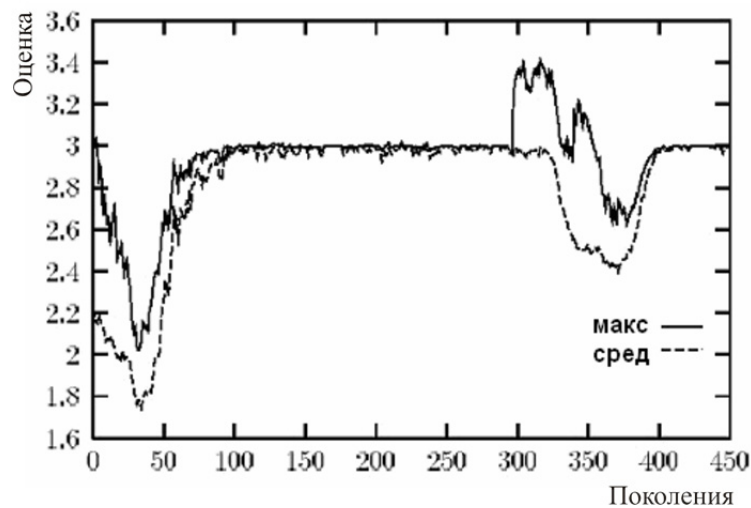


Рис. 5. Вариант массового исключения

Возможна еще ситуация, когда неудачный выбор стратегий в нескольких различных итерациях вызваны разными обстоятельствами и им противостоят стратегии, вырабатывающие меры реагирования. И в этом случае выбор в совокупности стратегий ответных мер в нормальных условиях невыгоден.

На графике рис. 6 большинство членов популяции содержало 0 (C) в разряде 32 примерно до 200 поколения. Такая особенность сверхтесного сотрудничества может стать недостатком, если в результате либо внешних воздействий, либо мутации возникнет стратегия, использующая этот недостаток, как например, на рис. 4. Подобная мутация первоначально сгенерировала большое число невзаимодействующих потомков с доминирующей стратегией возмездия, следствием чего стало быстрое снижение оценки пригодности и, как следствие, восстановление линии на стратегию C .

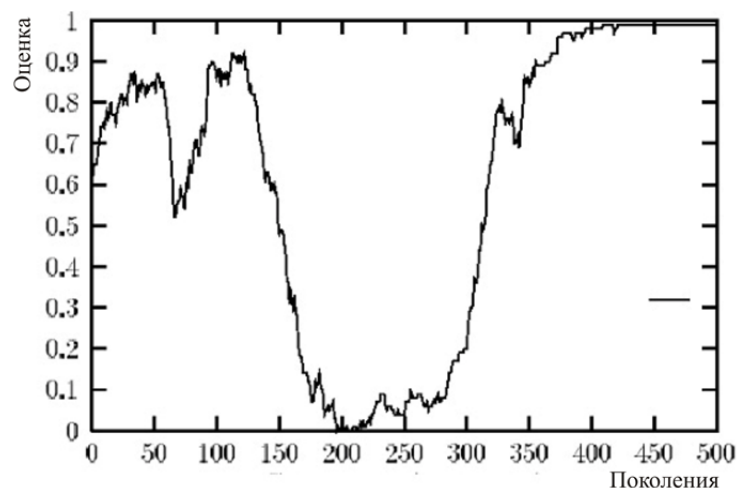


Рис. 6. Среднее значение выбранного бита

Данные обстоятельства поясняют локальные обстоятельства резких нарушений сходимости, представленных на рис. 4. Общие причины такого развития могут быть сформулированы следующим образом:

1. Объективно к любой эволюционной среде в той или иной степени развивается специализация вплоть до сверхспециализации.

2. Сверхспециализация неизбежно предполагает набор уязвимостей в стратегиях, которые могут быть использованы в собственных интересах, возникших в результате мутаций особей с резким ростом предельных показателей оценок пригодности или качества функционирования.

3. Далее средние показатели качества постепенно и достаточно быстро ухудшаются, вследствие деградации неприспособленных особей, и популяция в конечном счете вновь стабилизируется, причем в условиях малого числа мутаций стабилизация происходит на уровне, предшествовавшем выбросу.

В результате для ГА в рассматриваемой модели реализации, соответствующей стандартному или каноническому, сверхспециализация к предельно выгодной стратегии дает умеренные либо недостаточные характеристики обобщения. Для ряда задач это может быть допустимо, в противном случае можно предложить ряд мер по повышению свойств обобщения ГА.

Способы улучшения свойств обобщения ГА

Кратко рассмотрим возможные способы улучшения свойств обобщения ГА, имея в виду возможность впоследствии дать их подробный анализ и оценку.

Достаточно очевидными и простыми с точки зрения реализации являются такие подходы:

1) начать процесс эволюционного моделирования с изначально высококачественных особей популяции. По сути, предполагается селекционный отбор на этапе формирования начальной популяции. В условиях искусственной биологической эволюции это резко ускоряет получение результата;

2) повысить разнообразие обучающей среды введением дополнительных стратегий, например, при решении задачи ДЗ поставить задачу игры против дополнительных игроков.

В заключение отметим некоторые ключевые моменты получения числовых оценок результатов:

1) сходимость процесса стабильно наблюдалась по прошествии 250 поколений, при том, что различные среды обучения не оказывали существенного влияния на это значение. Отсюда значительное превышение таких границ не имеет смысла для повышения качества решения;

2) размер эволюционирующей популяции выбран в 100 особей. Популяция обеспечивает формирование усредненной стратегии по следующему принципу: признак принимается равным определенному значению – 0 либо 1 (соответственно, действия *C* либо *O*), если он равен этому значению для 50 % или большего числа членов популяции;

3) Для оценки характеристик, влияющих на показатели обобщения, тестовые наборы, предполагали среды с принципиально разнообразными стратегиями:

- сотрудничество;
- стратегия возмездия либо ответных воздействий;
- случайные стратегии.

Заключение

В результате рассмотрения было показано, что

– для стандартного ГА характерно формирование результатов с недостаточно высокими показателями способности обобщения, что может вызвать ситуации эволюционных выбросов или крахов;

– частичным выходом из ситуации недостаточно высоких характеристик обобщения является применение способов повышения видообразования и совместного эволюционного изменения множества характеристик популяции и обучающих стратегий;

– существенного повышения качества решения можно добиться применением динамических процедур формирования критериев оценки.

Библиографический список

1. *Koza, J. Genetic programming: a paradigm for genetically breeding computer population of computer programs to solve problems / J. Koza. – Cambridge, MA : MIT Press, 1992.*

2. Батищев, Д. И. Оптимизация многоэкстремальных функций с помощью генетических алгоритмов / Д. И. Батищев, С. А. Исаев // Высокие технологии в технике, медицине и образовании : межвуз. сб. науч. тр. – Воронеж : ВГТУ, 1997. – С. 4–17.
3. Вороновский, Г. К. Генетические алгоритмы, искусственные нейронные сети и проблемы виртуальной реальности / Г. К. Вороновский, К. В. Махотило, С. Н. Петрашев, С. А. Сергеев. – Харьков : Основа, 1997.

References

1. Koza J. *Genetic programming: a paradigm for genetically breeding computer population of somputer programs to solve problems*. Cambridge, MA: MIT Press, 1992.
2. Batishchev D. I., Isaev S. A. *Vysokie tekhnologii v tekhnike, meditsine i obrazovanii: mezhvuz. sb. nauch. tr.* [High technologies in engineering, medicine and education: inter-university collection of proceedings]. Voronezh: VGTU, 1997, pp. 4–17. [In Russian]
3. Voronovskiy G. K., Makhotilo K. V., Petrashev S. N., Sergeev S. A. *Geneticheskie algoritmy, iskusstvennye neyronnyye seti i problemy virtual'noy real'nosti* [Genetic algorithms, artificial neural networks and virtual reality problems]. Kharkov: Osнова, 1997. [In Russian]

Имамутдинов Антон Игоревич

аспирант,
Пензенский государственный университет
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: antonim94@yandex.ru

Imamutdinov Anton Igorevich

postgraduate student,
Penza State University
(440026, 40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Слепцов Николай Владимирович

кандидат технических наук, доцент,
кафедра экономической кибернетики,
Пензенский государственный университет
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: nbs_nbs@km.ru

Sleptsov Nikolay Vladimirovich

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of economic cybernetics,
Penza State University
(440026, 40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Образец цитирования:

Имамутдинов, А. И. Анализ процесса эволюционно –генетических вычислений с точки зрения характеристик обобщения / А. И. Имамутдинов, Н. В. Слепцов // Надежность и качество сложных систем. – 2019. – № 3 (27). – С. 84–91. – DOI 10.21685/2307-4205-2019-3-10.

А. И. Имамутдинов, Н. В. Слепцов

**ОСНОВАНИЯ ПРИМЕНЕНИЯ КВАЗИБИОЛОГИЧЕСКИХ ПОДХОДОВ
К РЕШЕНИЮ ОПТИМИЗАЦИОННЫХ ЗАДАЧ**

A. I. Imamutdinov, N. V. Sleptsov

**BASES OF APPLICATION OF QUASI-BIOLOGICAL
APPROACHES ON SOLVING OPTIMIZATION PROBLEMS**

Аннотация. *Актуальность и цели.* К постановке проблемы возможности целевого использования базовых принципов функционирования и развития биологических систем в естественном окружении для решения сложных и практически важных задач, таких как задачи оптимизации систем, приводят эффективность и согласованность действия элементов биологических объектов всех уровней, существующих в условиях непрерывной биологической эволюции, равно как и функциональность строения объектов, сформировавшихся под влиянием естественного отбора. *Материалы и методы.* Рассмотрены процессы эволюционного возникновения и развития носителей кодирования информации об объектах и системах. Проанализированы модели эволюционного развития как средства исследования и построения сложных систем. *Результаты.* Даны оценки и обоснована применимость квазибиологических методов для решения сложных многопараметрических задач. *Выводы.* Модели генетико-молекулярных информационных систем могут служить основанием для развития систем представления, генерации и оптимизации сложных структур. Рассмотрение моделей эволюции информационных последовательностей позволяет сделать вывод о возможности формального обоснования базовых характеристик методов – получении единого решения, средней скорости получения решения, характеристик связности для генетических систем управления клеточными организмами.

Ключевые слова: моделирование, система, эволюционное развитие, информационные последовательности, автоматы, модели эволюции.

Abstract. *Background.* The formulation of the problem of the possibility of the targeted use of basic principles of functioning and development of biological systems in a natural environment for solving complex and practically important tasks, such as the problems of optimizing systems, lead to the effectiveness and consistency of the action of elements of biological objects of all levels that exist in continuous biological evolution, as well as the functionality of the structure of objects formed under the influence of natural selection. *Materials and methods.* The processes of evolutionary emergence and development of media coding information about objects and systems are considered. Analyzed models of evolutionary development as a means of research and construction of complex systems. *Results.* Estimates are given and the applicability of quasi-biological methods for solving complex multiparameter problems is justified. *Conclusions.* Models of genetic and molecular information systems can serve as the basis for the development of systems of representation, generation and optimization of complex structures. Consideration of the models of evolution of information sequences allows us to conclude that it is possible to formally substantiate the basic characteristics of the methods – obtaining a single solution, the average speed of obtaining a solution, and connectivity characteristics for genetic control systems of cellular organism.

Keywords: modeling, system, evolutionary development, informational sequences, automata, models of evolution.

Введение

Большинство практически значимых задач в таких областях, как управление сложными объектами, генерация и выбор оптимального решения, поиск оптимального пути, размещения распределенных ресурсов с учетом временной составляющей, характеризуются зависимостью от большого числа составляющих, что делает проблематичным в общем случае получение точного формального решения и вынуждает обращаться к приближенным методам. Однако с ростом числа параметров

сложность вычислений также резко растет и это обстоятельство вызывает интенсификацию поиска приемлемых с точки зрения вычислительной сложности методов решения задач такого рода.

Идеи, на которых данные методы основываются, упрощенно могут быть сведены либо к некоторой структуризации параметров (объектов) связей задачи (метод анализа иерархий, МАИ, метод группового учета аргументов, МГУА), либо к последовательному улучшению начального многопараметрического решения, представляющего в общем случае достаточно сложный объект способами, имеющими аналоги в естественной биологической среде, такими как обучение, имитация механизмов биологического воспроизведения максимально приспособленных особей, имитация механизмов поведения высокоорганизованных биологических сообществ (нейронные сети, эволюционно-генетические методы, метод муравьиных колоний и т.д.).

Уже перечисление аналогов биологических механизмов показывает их принципиальную неоднородность, реализацию на разных уровнях иерархии биологических структур, эффективность работы в рамках некоторой популяции (аналог – множество особей, статистический эксперимент), сильная зависимость результата как от условий внешней среды, что естественно, так и от последовательности достаточно сложных механизмов формирования очередной популяции, являющейся носителем нового, как правило, улучшенного решения. При этом отмеченные механизмы показывают очень высокую эффективность по критерию результат/затраты. В силу сказанного представляется актуальным рассмотрение моделей информационных систем и систем информационных преобразований, основанных на генетико-молекулярном базисе.

Модели генетико-молекулярных информационных систем и методы эволюционной кибернетики

К постановке проблемы возможности целевого использования базовых принципов существования и развития биологических систем в естественном окружении для решения сложных и практически важных задач для человека, например, задач оптимизации систем, приводят эффективность и согласованность действия элементов биологических объектов всех уровней (клеток, организмов, популяций), существующих в условиях непрерывной биологической эволюции, равно как и функциональность строения организмов, сформировавшихся под влиянием естественного отбора. Исходной базой для современных исследований по моделированию информационных систем на молекулярно-генетических принципах являются общие модели эволюции.

Основные механизмы эволюционной оптимизации биообъектов к условиям окружающей среды могут быть представлены следующим образом: на каждой из своих ступеней эволюция непрерывно формирует существенно новые формы генотипов – компактного кодированного представления параметров биообъекта, на которые постоянно действуют процессы как передачи и распространения наследуемых признаков, так и их изменения. Закрепление генотипических признаков в последующих поколениях биообъектов, дающее максимально приспособленный к конкретной внешней среде фенотип, проводится естественным отбором. Являясь, как и процессы наследования и изменчивости, хорошо формализуемым фактором, отбор в то же время по существу может интерпретироваться как творческий процесс создания естественных систем (ЕС), равно как и искусственных систем (ИС). Рассматриваемые в неразрывном единстве наследственность, изменчивость и естественный отбор являются движущими факторами эволюционного развития.

Исторически первоначальные эволюционные концепции преимущественно монистичны и подчеркивают какой-либо один, реже больше факторов эволюции, в то же время такая ограниченность может быть принята только в качестве первоначального приближения. Реальные механизмы эволюционного процесса достаточно сложны во всех проявлениях, поскольку он решает элементарными по сути средствами задачи различных системных уровней – например, одновременно с адаптацией особей популяции к условиям текущего окружения (главным образом – внутривидовая конкуренция) нарабатываются свойства популяции, обеспечивающей ей выживание в конкуренции с другими видами и во времени.

В настоящее время базовые положения эволюционной теории формируются в рамках синтетической теории эволюции (СТЭ), исторически являющейся синтезом дарвинизма, теории популяций и классической генетики [1]. Основанием для перехода к СТЭ послужило в первую очередь изменение в понимании механизмов изменчивости и принципов наследования.

Базовые положения эволюционной теории могут быть сведены к следующим:

– эволюция обеспечивается естественным отбором, использующим случайные мутации и рекомбинации для формирования приспособленности строения и функций организмов условиям внешней среды;

– наследственная изменчивость в популяциях носит массовый характер, специальные мутационные изменения носят характер индивидуальный, присущий только отдельным представителям популяций;

– максимально благоприятные сочетания свойств закрепляются механизмом максимального преимущества при размножении – наибольшее число потомков наблюдается у особей с максимальной адаптацией к окружению;

– естественный отбор идет по фенотипическим признакам.

Существенным моментом является то обстоятельство, что конкретные условия внешней среды одновременно являются как факторами формирования оптимальных популяций, так и факторами формирования параметров самого эволюционного процесса. Объединение всех видов и форм эволюции в СТЭ, рассмотрение их с единых позиций и точки зрения единого описания и управления, описание их адекватным формальным аппаратом может дать мощный инструмент для генерации, анализа и исследования ЕС и ИС.

Формально эволюционный алгоритм представляет оптимизационный метод, рассматривающий развитие множества – популяции – объектов или особей, для каждой из которых формируется оценивающая функция – многомерная $f(S)$ – параметров или «генов» особи $S = (S_1, S_2, \dots, S_N)$. Задача традиционно заключается в максимизации $f(S)$. Процесс основан на последовательной генерации новых популяций, включающих особей с новым набором параметров и поиск в них особей с наиболее оптимальным уровнем приспособленности. Он реализуется за счет рекомбинаций, мутаций и отбора геномов особей. Механизмы эволюционного поиска обеспечивают квазипараллелизм поиска в пространстве решений, генерацию последовательных приближений к оптимальным решениям за счет рекомбинации полученных ранее решений с повышенным уровнем оценки. Это дает серьезные преимущества при использовании их для оптимизации многомерных, плохо определенных функций.

Простейшая модель эволюции информационных последовательностей. Рассматривая развитие моделей эволюционных вычислений, можно отметить определенные этапы своеобразной эволюции, в том числе и такого процесса. Начиная от простейших, такие модели несли общие черты, присущие реализации эволюционных механизмов и в то же время старались обеспечивать предельный уровень минимализма в соответствии с уровнем решаемых задач. Так, относящаяся к простейшим модель квазивидов [2] предназначена для анализа эволюции информационных последовательностей, представленных векторами $S = (S_1, S_2, \dots, S_N)$. Эти последовательности способны к самовоспроизведению, соответственно, популяция в процессе эволюционного развития представляет множество $\{S_k\}$, из n последовательностей $S_k, k = 1, \dots, n$, каждая последовательность – это цепочка N символов, $S_{ki}, i = 1, \dots, N$. Длина N и численность популяции n велики: $N, n \gg 1$.

Функционирование модели:

A0. *Создание исходной популяции $\{S_k(0)\}$.* Случайно выбираем символ S_{ki} , для каждого $k = 1, \dots, n$, и для каждого $i = 1, \dots, N$. Полагаем его равным произвольному символу алфавита.

A1. *Оценка.* Для каждого $k = 1, \dots, n$, определяем $f(S_k)$.

A2. *Генерация популяции $\{S_k(t+1)\}$.* Генерируем очередную популяцию $\{S_k(t+1)\}$ отбором n особей по результатам проведения $f(S_k)$.

A3. *Мутации в новой популяции.* Замена $S_{ki}(t+1)$ на произвольный символ для каждого $k = 1, \dots, n$, и для каждого $i = 1, \dots, N$, с вероятностью P , характеризующей интенсивность мутаций.

A4. *Смена поколений.* Для $t = 0, 1, 2, \dots$, пока выполняется $t \leq t_p$, повторяем блок A1, A2, иначе A4.

A5. *Конец*

Модель не накладывает ограничений на характер представления времени и позволяет получить интересные результаты как для непрерывного, так и дискретного времени, в частности, показывает особенности сходимости процесса.

Пусть x_k – численность особей k -го вида; W_k – селективная ценность особей k -го вида; ϕ_{kl} – параметры, характеризующие мутационные потоки, E – параметр, характеризующий ограничения, например, на численность популяции:

$$\sum_l x_l = n = \text{const}.$$

В случае мутаций очень низкой интенсивности ($\phi_{kl} = 0$) и для частот $p_k = x_k/n$, характеризующих вероятности нахождения в популяции особей разных видов, динамика популяции определяется уравнением Эйдена – Фишера:

$$\frac{dp_k}{dt} = (W_k - \langle W \rangle) p_k, \quad (1)$$

где $\langle W \rangle = \sum_k W_k p_k$ – средняя селективная ценность в популяции.

Отсюда скорость изменения $\langle W \rangle$:

$$\begin{aligned} \frac{d\langle W \rangle}{dt} &= \sum_k W_k (W_k - \langle W \rangle) p_k = \sum_k p_k (W_k^2 - 2W_k \langle W \rangle + W_k \langle W \rangle) = \\ &= \sum_k p_k (W_k^2 - 2W_k \langle W \rangle + \langle W \rangle^2) = \sum_k p_k (W_k - \langle W \rangle)^2. \end{aligned} \quad (2)$$

Отсюда следует, средняя селективная ценность в популяции растет и в состоянии равновесия системы достигает некоторого значения. При достижении состояния равновесия скорость изменения средней селективной ценности падает до нуля.

Поскольку лишь для одного вида, обладающего максимальным W_k , выполняется условие $p_k(t) \rightarrow 1$ при $t \rightarrow \infty$, решение системы (1) показывает, что выживает только один вид.

Анализ систем уравнений модели в общем случае показывает, что эволюционный отбор приводит к отбору квазивида – некоторого распределения видов, для которого частоты видов пропорциональны компонентам собственного вектора, соответствующего максимальному собственному значению λ_m , но не одного отдельного вида (либо особи).

Основные результаты, обеспечиваемые моделью:

- 1) процесс эволюции сходится к квазивиду, распределение особей в котором строго определены;
- 2) доступна оценка времени сходимости к квазивиду.

«Спин-стекольная» модель эволюции. Рассмотренная выше модель информационных последовательностей ограничена в том смысле, что предполагает наличие одного экстремума. Подобное ограничение отсутствует в модели спиновых стекол.

Формальное описание модели [2]:

- 1) система S образована из N спинами: $S = S_1, S_2, \dots, S_N; N \gg 1$, с возможными значениями $1, -1$;
- 2) спины случайным образом взаимодействуют. Энергия системы определена как

$$E(S) = -\sum_{i < j} J_{ij} S_i S_j, \quad j = 1, \dots, N \quad (3)$$

либо

$$E(S) = -\frac{1}{2} \sum_{i, j=1}^N J_{ij} S_i S_j, \quad j \neq i, \quad (4)$$

где J_{ij} – элементы матрицы взаимодействий между спинами.

Алгоритм функционирования:

A0. Генерация начальной популяции $\{S_k(0)\}$.

Для каждого $k = 1, \dots, n$ и каждого $i = 1, \dots, N$ случайно выбираем символ S_{ki} , из $\{1, -1\}$.

A1. Оценка.

Для каждого $k = 1, \dots, n$ вычисляем $f(S_k)$.

A2. Генерация очередного поколения популяции $\{S_k(t+1)\}$.

Отбор в $\{S_k(t+1)\}$ n особей с вероятностями, пропорциональными $f(S_k)$.

A3. Мутации.

Переворачиваем спин $S_{ki}(t+1)$: ($S_{ki} \rightarrow -S_{ki}$) с вероятностью P_m для каждого $k = 1, \dots, n$, для каждого $i = 1, \dots, N$. P_m – интенсивность мутаций.

A4. Смена поколений.

Для $t = 0, 1, 2, \dots, T$, пока $t \leq T$, повторяем блок A1, A2, иначе A4.

A5. Конеч.

В конечном счете модель обеспечивает сходимость с некоторому локальному энергетическому минимуму E_L различному для различных реализаций. В силу этого обстоятельства ее можно рассматривать как развитие модели квазивидов.

Модель гиперциклов. Модель обеспечивает расширение предшествовавших моделей до уровня рассмотрения механизмов кооперации в процессе эволюции самовоспроизводящихся макромолекулярных систем РНК и ферментов. В данной модели информация, закодированная РНК-последовательностями, передается в структуру ферментов аналогично механизму трансляции в биологических клетках. Структурная стабильность обеспечивается циклической организацией гиперцикла.

Можно отметить также близкую к модели гиперциклов модель сайзеров, удачно воспроизводящую эволюционный процесс возникновения системы управления простого типа.

При всей ограниченности и понятной условности выделения этапов эволюции информационно-логических последовательностей их фиксация позволяет:

- 1) говорить об этапности в развитии информационно-логических моделей с постоянным усложнением на каждом из этапов и повышении уровня организации;
- 2) четко привязать к ним принципиально новые характеристики и возможности;
- 3) рассматривать указанные модели как элементы либо возможные сценарии предбиологических систем.

Общие модели эволюции и методы теоретической популяционной генетики

Молекулярная эволюция: теория нейтральности. Усложнение представлений о характере эволюционного процесса и вызванные этим усложнения моделей и характеристик эволюции в значительной степени связаны с интерпретацией ряда экспериментальных данных, позволивших уточнить степень влияния отдельных факторов эволюции на скорость ее протекания и, соответственно, на получение результата. Экспериментальные оценки касались в основном скорости замен в белках и потребовали уточнения понимания в первую очередь влияния фактора мутации. Это уточнение легло в основу теории нейтральности, интерпретирующей экспериментальные данные по эволюции белков и состоит в том, что на молекулярном уровне мутации преимущественно нейтральны либо слабо вредны. Наличие существенно вредных мутаций возможно, но селекция нейтрализует их влияние на популяцию.

К основным положениям теории нейтральности можно отнести:

1. Если функция и третичная структура белка остаются в основном неизменными, скорость эволюции любого белка приблизительно постоянна.
2. Для функционально менее важных частей белка накопление мутационных замен проходит быстрее, чем в для более важных. Следствием для эволюционных алгоритмов является необходимость создания некоторой избыточности генотипа, что позволяет принципиально за счет накопления изменений в неиспользуемой части генотипа обеспечивать структурные скачки.
3. Интенсивность выбраковки селекцией неблагоприятных мутаций и случайных фиксаций нейтральных мутаций (либо несущественно вредных) выше, чем положительный отбор благоприятных мутаций.

Отметим также и стохастический характер математических моделей теории нейтральности, так как существенную роль в фиксации нейтральных мутаций играет относительно малая численность популяции.

Модели блочного эволюционного отбора в своей основе имеют принцип формирования генотипов из фрагментов, оптимизированных ранее. Предлагаются блочно-иерархическая и блочно-модульная организация моделей. Эволюционирующие системы развиваются снизу вверх при сохранении основного принципа – строительными блоками выступают ранее сгенерированные и оптимальные (жизнеспособные) структуры, на базе которых формируется эволюционирующая система.

Последней из рассматриваемых моделей эволюционного отбора отметим модель эволюции автоматов или модель *NK*-автоматов Кауфмана. Модели дают возможность определить ряд характе-

ристик поведения эволюционирующих систем, не затрагивавшихся в предыдущих моделях, в основном, влияние структурных особенностей систем на эволюционное поведение.

NK -автомат (рис. 1) образован N булевыми логическими элементами, каждый элемент имеет K входов и один выход, $N \gg 1$. Сигналы на входах/выходах элементов принимают значения $\{0,1\}$. Выходы одних элементов объединены со входами других, характер связей – случайный. Число входов каждого элемента K – фиксировано.

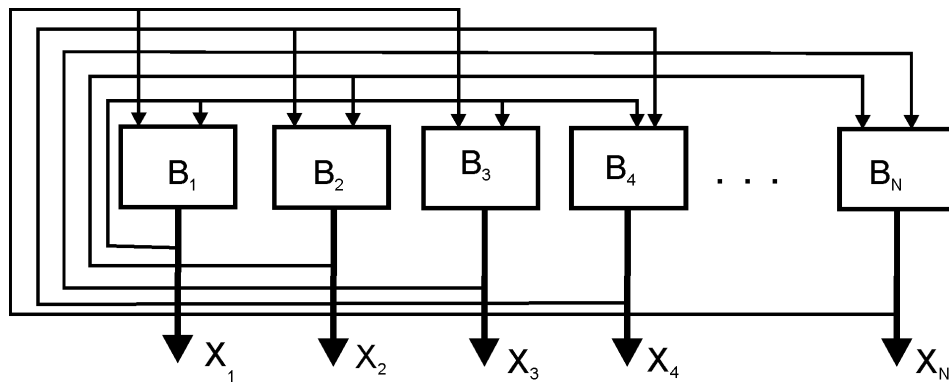


Рис. 1. NK -автомат: B_i – логические элементы; $K = 2$

Основной результат, обеспечиваемый моделью, состоит в возможности связи характера функционирования автоматов и степени связанности его элементов K . При $K \approx N$ поведение автоматов стохастично: оно резко меняется и по отношению к минимальным возмущениям и по отношению к мутациям (происходит как типа элемента так и типа связи между элементами).

В диапазоне от N до 2 тип поведения сохраняется, но принципиально меняется при $K \approx 2$. Минимальные возмущения практически не оказывают влияния на программы, стандартными становятся незначительные изменения динамики функционирования. Каскадные, радикальные изменения программ автоматов возможны вследствие крайне редких мутаций. Такое поведение достаточно близко описывает типичное поведение управления биообъектов вследствие ряда причин:

- характер поведения автомата и интерпретируемой системы одновременно обеспечивает сочетание стабильности функционирования, так и требуемую степень пластичности для эволюционного развития;
- в схемах биологической регуляции обычно присутствует незначительное количество связей между отдельными элементами, функционирование отдельных элементов в силу этого достаточно простое;
- имеются основания говорить о близости некоторых характеристик NK -автоматов и сопоставляемых им характеристик биологических организмов разного эволюционного уровня. Так, сравнение числа аттракторов NK -автомата с числом различных типов клеток у биологических объектов дает сопоставимые значения.

Формализация основных понятий ЭМ. Рассмотренные модели эволюционирующих информационных последовательностей обладают некоторыми общими свойствами, в частности, их состав, связи, входные и выходные множества, отчасти функции преобразования. Даже достаточно общее формальное описание в таких обстоятельствах даст возможность проявить сходные черты и механизмы, определить направления дальнейшего концептуального развития моделей.

Возможным аппаратом формализации в данном случае может быть формализм структурированных моделей.

Структурированная модель, образованная некоторой совокупностью элементов f_i , $i \in I$ со свойствами θ_i и отношений между ними s , осуществляет отображение входных функций $x(t) \in X$ дискретного аргумента t ($t \in T^\infty$, $t = 0, 1, \dots$) в выходные функции $y(t) \in Y$, того же аргумента с помощью набора операторов из $\{f, I\}$ в соответствии с отношением s , которое определяет порядок следования $f_i (i \in I)$.

Модель при изменении должна оставаться в условиях ограничений для некоторого класса K . Таблица либо список изменений, оставляющих модель в рамках класса, определим как список режимов изменений (РИ).

Каждая последующая C -модель в рамках эволюционного процесса, рассматриваемая в роли функционального преобразователя F , является очередным ε -приближением некоторого преобразователя F^* по заданному критерию $Q : \varepsilon = r(Q_c^*, Q_c)$. r – функция расстояния, в случае битового представления генотипа – расстояние Хемминга. Если $r(Q_{c2^*}, Q_c) < r(Q_c^*, Q_c)$, то модель C_2 локально эффективна.

Процесс эволюционной обработки образован этапами:

- эволюционного синтеза РП;
- генерации собственно решения.

Конечным результатом очередного шага в процессе эволюционного синтеза ε -приближения в заданном классе моделей является формирование с помощью РИ Γ модели C_N из модели C_{N-1} , выбранной из популяции $\Pi (P_\varepsilon)$ локально-эффективных на предыдущих шагах синтеза. Режим изменения Γ выбирается списка РИ. Структурный эволюционный синтез связывает следующие друг за другом модели: $C_N = (\Gamma_i)C_{N-1}$, где Γ_i – i -й режим изменения из списка РИ. Поиск и оценка проводятся не в пространстве параметров, а в пространстве структур моделей.

Таким образом, процесс эволюционного синтеза можно описать многокомпонентным вектором:

$$P_S = (C^0; G; Q_1; I_c; \Pi_c; P_1; P_2; A),$$

где C^0 – исходная модель класса K ; $G = \langle \Gamma_i, i = \overline{1, L} \rangle$ – список РИ $\Gamma_i : \Gamma_i(C) \subset K$; L – длина РИ; $Q_1 : C \rightarrow R^1$ – критерий отбора; $I_c = (X_c, Y_c)$ – обучающая выборка; $\Pi_c = \langle C_i, i = \overline{1, k} \rangle$ – популяция локально-эффективных моделей; k – размер популяции Π_c ;

$P_1 = (P_{11}, \dots, P_{1k}) \in I^k, P_{1i} \in [0, 1], i = \overline{1, k}, \sum_{i=1}^k P_{1i} = 1$; P_{1i} – вероятность выбора моделей $C_i \in \Pi_c$;

$P_2 = (P_{21}, \dots, P_{2L}) \in I^L, P_{2i} \in [0, 1], i = \overline{1, L}, \sum_{i=1}^L P_{2i} = 1$; P_{2i} – вероятность выбора РИ $\Gamma_i \in G$;

$A : I^L \times I^K \times I^s \rightarrow P(I^K \times I^L)$ – стратегия случайного поиска.

Формирование решения P_U :

$$P_U = (\Pi^0; V; P_3; Q_2; r),$$

где $\Pi^0 = \langle C_j, j = \overline{1, k} \rangle$ – популяция сгенерированных моделей; k – размер популяции Π^0 ;

$V : \Pi^0 \rightarrow R$ – оператор генерации решения $r \in R$; $P_3 = (P_{31}, \dots, P_{3L}) \in I^L, P_{3i} \in [0, 1], i = \overline{1, L}, \sum_{i=1}^L P_{3i} = 1$;

P_3 – вероятность выбора модели $C_j \in \Pi^0$; $Q_2 : R \rightarrow R^1$ – критерий оценки $r \in R$; $r \in R$ – генерируемое решение (генотип).

Вследствие единства эволюционного процесса критерий Q_2 оценки решения и критерий отбора Q_1 образуют взаимосвязанную систему.

Заключение

Проведенный анализ современного состояния средств эволюционной информатики позволяет утверждать, что модели генетико-молекулярных информационных систем могут служить основанием для развития систем представления, генерации и оптимизации сложных структур [3].

Рассмотрение моделей эволюции информационных последовательностей позволяет сделать вывод о возможности формального обоснования результата о получении единого решения (выживания только одного вида), средней скорости получения решения, характеристик связности для генетических систем управления клеточными организмами.

Формальное описание различных классов моделей эволюции информационных процессов как структурированных моделей дает возможность однотипного описания и применения к ним однотипных методов исследования.

Эволюционный синтез структурированных моделей при выполнении набора требований придает процедурам структурного случайного поиска свойства глобальности и, как следствие, эффективности при оптимизации многоэкстремальных функций.

Решение задач развития средств и моделей эволюционной информатики, применения средств эволюционного моделирования для задач структурного синтеза может быть использовано в приложении, например, к построению проблемно-ориентированных систем представления, генерации и оптимизации сетевых структур.

Библиографический список

1. Слепцов, Н. В. Оптимизация эволюционно-генетического поиска / Н. В. Слепцов, П. П. Макарычев. – KG Saarbrucken Germany : LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH& Co., 2012. – 337 с.
2. Редько, В. Г. Эволюционная кибернетика / В. Г. Редько. – Москва : Наука, 2001. – 274 с.
3. Chambers Practical handbook of genetic algorithms v 3 Complex coding systems 2 ed. – 2001.

References

1. Sleptsov N. V., Makarychev P. P. *Optimizatsiya evolyutsionno-geneticheskogo poiska* [Optimization of evolutionary genetic search]. KG Saarbrucken Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH& Co., 2012, 337 p. [In Russian]
2. Red'ko V. G. *Evolutsionnaya kibernetika* [Evolutionary cybernetics]. Moscow: Nauka, 2001, 274 p. [In Russian]
3. *Chambers Practical handbook of genetic algorithms v 3 Complex coding systems 2 ed.* 2001.

Имамутдинов Антон Игоревич

аспирант,
Пензенский государственный университет
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: antonim94@yandex.ru

Слепцов Николай Владимирович

кандидат технических наук, доцент,
кафедра экономической кибернетики,
Пензенский государственный университет
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: nbs_nbs@km.ru

Imamutdinov Anton Igorevich

postgraduate student,
Penza State University
(440026, 40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Sleptsov Nikolay Vladimirovich

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of economic cybernetics,
Penza State University
(440026, 40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Образец цитирования:

Имамутдинов, А. И. Основания применения квазибиологических подходов к решению оптимизационных задач / А. И. Имамутдинов, Н. В. Слепцов // Надежность и качество сложных систем. – 2019. – № 3 (27). – С. 92–99. – DOI 10.21685/2307-4205-2019-3-11.

А. И. Имамутдинов

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГЕНЕТИЧЕСКОГО ПОИСКА

A. I. Imamutdinov

PROVIDING COMPUTATIONAL EFFICIENCY OF GENETIC SEARCH

Аннотация. *Актуальность и цели.* Оценка показателей надежности и качества многопараметрических зависимостей возможна средствами эволюционно-генетических вычислений, не требующих данных о внутренней структуре связей и зависимостей анализируемых объектов. Эволюционные методы показывают высокую результативность либо при применении специализированных разновидностей генетического поиска, либо при эффективном управлении поиском в процессе решения. *Методы.* Перспективным методом повышения эффективности оптимизационных моделей вычислений на основе эволюционных методов при универсальности модели вычислений является сохранение в кодировке неразрушаемой информации произвольной длины, что выдвигает дополнительные требования в реализации основных генетических операторов. *Результаты.* Дополнительные требования могут быть сведены к свойствам сохранения шаблонов с высокими показателями независимо от их длины, а также способностью выделения, определения их свойства, отмечать пригодность. Реализацию подобного расширения в управлении поиском предложено осуществить введением масок и механизма управления масками. *Выводы.* Предложенный подход к повышению эффективности генетического поиска возможно реализовать применением модифицированных генетических операций на основе маскирования и фиксированного набора правил без существенного увеличения вычислительных затрат.

Ключевые слова: оптимизация, модели эволюционно-генетического поиска, генетические операторы, маскирующие функции.

Abstract. *Background.* Evaluation of reliability and quality indicators of multiparameter dependencies is possible by means of evolutionary-genetic calculations that do not require data on the internal structure of the connections and dependencies of the analyzed objects. Evolutionary methods show high performance, either with the application of specialized types of genetic search, or with effective management of the search in the solution process. *Methods.* A promising method for increasing the efficiency of optimization models of computations based on evolutionary methods with the universality of the computation model is to preserve arbitrary lengths in the encoding of indestructible information, which places additional demands on the implementation of the main genetic operators. *Results.* Additional requirements can be reduced to the properties of preserving templates with high rates regardless of their length, as well as the ability to highlight, determine their properties, note the suitability. The implementation of such an extension in the search management is proposed to implement the introduction of masks and mask control mechanism. *Conclusions.* The proposed approach to improving the efficiency of genetic search can be implemented using modified genetic operations based on masking and a fixed set of rules to significantly increase computational costs.

Keywords: optimization, evolutionary search models, genetic operators, masking functions.

Введение

Генетические методы поиска – группа методов вычислений, основанных на аналогиях с механизмами биологической эволюции, при компьютерной реализации характеризуются простотой и универсальностью в применении к достаточно широкому кругу задач, в которых возможности традиционных методов вычислений по разным причинам могут быть ограничены. Показателем востребованности одной из разновидностей методов эволюционных вычислений – генетических алгоритмов (ГА) является их включение как одного из возможных вариантов оптимизационного поиска в стандартный пакет MS OFFICE, конкретно, в инструмент ПОИСК РЕШЕНИЯ Excel.

Возможные схемы реализации эволюционных вычислений включают достаточно различающиеся наборы действий, соответствующие, в частности, различному пониманию природы эволюционного развития либо различной степени такого понимания. При общепринятом стандартном

подходе реализация эволюционно-генетических вычислений включает следующую последовательность шагов/этапов генетических вычислений [1]:

- определение/выбор общего критерия эволюционного процесса для данной реализации;
- определение/выбор частных параметров эволюционных операторов, определяющих в основном временные показатели и условия сходимости процесса;
- формирование исходной популяции – задание по сути начального приближения к решению;
- оценку полученной популяции;
- проведение преобразования популяции имитацией генетических преобразований с учетом ранее определенных параметров эволюционных операторов и генерация за счет преобразований новой, очередной популяции;
- оценка очередной популяции либо переход к предыдущему шагу, либо выдача результата, в качестве которого выступает последняя полученная популяция.

Базовыми этапами при любых возможных алгоритмах реализации эволюционных вычислений являются этапы генерации исходной популяции и генерация новой популяции, реализуемая обычно операторами кроссовера (скрещивания), мутации, а также иногда рядом менее распространенные, к примеру, репродукции.

Проблемой в применении ГА является достаточно сильная зависимость результата/скорости получения результата от сочетания многих факторов, и в первую очередь – от выбора соответствующих значений параметров генетических операторов, причем оптимизация такого сочетания зависит от задачи, от ее кодировки и от целого ряда факторов. Решение проблемы принципиально возможно на трех направлениях. Наиболее радикальный – применение для настройка параметров тех же принципов эволюционных вычислений за счет серьезного усложнения процедуры поиска решения, но в рамках единых механизмов его реализации. Второе направление – традиционная оптимизация параметров операторов, она приводит к повышению как скорости, так и устойчивости поиска без серьезных вычислительных затрат, что существенно для успешного применения генетических методов. И, наконец, наоборот, в ряде случаев для успешного применения подхода используются достаточно экзотические разновидности операторов, не обладающие характеристиками универсальности, но прочно остающиеся в парадигме эволюционных вычислений.

Особенности, отличающие эволюционные вычисления от традиционных, приводят, с одной стороны, к крайне высокой эффективности в приложениях, модель обработки в которой близко соответствует модели эволюционных вычислений, а с другой – приводит к сложностям, когда указанная модель требует дополнительного согласования с особенностями эволюционной модели. Подобное согласование обычно осуществляется введением универсальных дополнительных механизмов управления, позволяющих распространить эволюционный принцип управления не только на процесс поиска решения, но и на управление собственно самим указанным процессом. Для ряда задач, например, комбинаторной оптимизации использование эволюционно-генетических методов часто осложняется крайне резким изменением показателей качества решения при незначительном изменении самого решения, что влечет за собой применение модифицированных генетических преобразований, учитывающих особенности задачи, при неизменной общей схеме вычислений. Отметим, что оба подхода в применении в определенному классу задач показывают высокую, часто крайне высокую эффективность.

Последующее рассмотрение касается оптимального управления только одного оператора – кроссовера. Это связано с тем, что по многочисленным оценкам удельная значимость кроссовера и мутаций при несомненной важности обеих операций для реальной эволюции соотносится от 9 к 1 до 99 к 1.

Оператор селекции (репродукция) реализует некоторый критерий отбора и определяется целью поиска, т.е. задается либо лицом, осуществляющим поиск, либо типом задачи.

Тип задачи оказывает большое влияние на применение в рамках единого процесса конкретного способа реализации операторов скрещивания (кроссовера) и мутации. Соответственно, в рамках единых принципов и механизмов в ГА реализованы разновидности алгоритмов работы этих двух операторов. В ряде работ подобные разновидности рассматриваются как самостоятельные, но в подавляющем большинстве случаев различия между ними могут быть сведены на уровень параметрических.

Для множества всех двоичных строк длины L проводится поиск строки X . Дано: X_1 и X_2 – строки длины L ; p – множество номеров позиций, для которых X_1 и X_2 различны; $p = \{i | 1 < i \leq L \text{ и } X_1[i] \neq X_2[i]\}$, $S(Z_1, Z_2)$ – количество позиций, в которых различаются строки Z_1 и Z_2 .

Конечная цель ГА – максимизация оценочной функции F (она же – функция приспособленности), – т.е. найти $x \in X$, такой, что $F(x) = \max \{F(z) | z \in X\}$.

Операция кроссовера состоит в формировании из двух предшественников (предков) двух потомков путем соединения фрагментов генотипов предков, разделенных в простейшем случае в одной точке – точке кроссовера.

Она образует строку со следующими свойствами:

- в позициях, не вошедших в p , строка совпадает с $X1$ и $X2$;
- половина позиций, вошедших в p , в среднем, совпадает с позициями в $X1$, другая половина позиций из p , в среднем совпадает с позициями в $X2$.

Строгое формальное описание операции приведено в [1], для наших целей можно отметить только, что вероятность операции между строками с успешным исходом тем выше, чем больше, если во взаимодействующих строках количество позиций совпадения с соответствующими позициями в искомой строке. Задачей управления поиском в таких условиях предполагает ограничение либо полное исключение возможности разрушения высококачественных кодировок. Можно также отметить, что большое количество совпадений значений позиций естественно при формировании строки от общего предка с достаточно благоприятным набором характеристик, что является нормальным для популяции, эволюционирующей в стандартных условиях.

Проблема поиска решения в условиях генетических преобразований имеет и другую сторону, а именно: обеспечение сохранения найденных удачных решений и их фрагментов – строительных блоков. Она состоит в подверженности найденных однажды удачных решений разрушению. Поясним это утверждение. Обозначим H – некоторый шаблон, $\delta(H)$ – его длина определения, $O(H)$ – его порядок. С вероятностью $\delta(H)/(l-1)$, где l – длина строки, содержащей шаблон, точка кроссовера находится в пределах шаблона. Таким образом, более длинные фрагменты будут разрушаться с большей вероятностью. Подобное нежелательно при кодировании оптимальных в некотором смысле фрагментов генотипа. Исключить в выбранной кодировке наличие стандартных блоков большой размерности может принцип значимых строительных блоков [2, 3].

С другой стороны, для обеспечения универсальности желательно использовать произвольную информацию в кодировке, поэтому оператор кроссовера должен также обладать свойствами сохранения шаблонов с высокими показателями независимо от их длины. Помимо сохранения шаблонов, необходимо их тем либо иным образом выделять, определять их свойства, отмечать пригодность. Реализация подобного расширения возможна введением масок и механизма управления масками.

Простейшим способом маскирования в данном случае может быть введение масок как дополнительного множества генов. Управление масками (а следовательно, и направлением поиска) в данном случае проводится за счет механизмов общего процесса, что предполагает простоту реализации, но затрудняет оперативное воздействие на направление поиска.

Другим способом является управление маскирующими функциями, которые предназначены в основном для изменения направления поиска. Этот подход в силу простоты реализации и малых затрат является предпочтительным.

Суть второго подхода состоит в модификации маски после применения операции кроссовера в зависимости от ее результата с точки зрения успеха улучшения потомком существенных характеристик предков. Значение оценки пригодности потомков указывает желательность/нежелательность продолжения поиска в направлении, задаваемом маской, поэтому изменением маски управление процессом осуществляется с учетом текущего состояния.

Маскированный кроссовер (МК). Введем следующие обозначения: S_1 и S_2 – исходные строки; S_3 и S_4 – их потомки; $M1$ и $M2$ – битовые маски, применяемые соответственно к S_1 , и S_2 . Нижний индекс для M указывает позицию бита в строке.

Алгоритм выполнения МК показан на рис. 1.

```

A: CopyMask (S1, S2, S3, S4)
  for i = 1 to L
  begin
    if M2i = 1 and M1i = 0
      Копировать i-й бит из S2 в S3
    if M1i = 1 and M2i = 0
      Копировать i-й бит из S1 в S4
  end

```

Рис. 1. Алгоритм выполнения МК

Из А следует универсальность МК, поскольку стандартные, такие как односточный, равномерный и целый ряд других разновидностей операторов являются его частными случаями: односточный кроссовер реализуется через МК установкой первых n битов $M1$ в 1, остальных – в 0, $M2$ формируется как дополнение $M1$; равномерный кроссовер реализуется абсолютно аналогично, при этом i -й бит $M1$ выбирается случайно.

Для шаблонов, идентифицированных масками, МК пытается обеспечить сохранение доминирующих признаков. Рассмотрим формирование S_3 при одинаковых соответствующих разрядах масок $M1$ и $M2$ для S_1 и S_2 , разряды предка S_1 копируются в потомка S_3 .

Маски. МК сохраняет шаблон S_1 в S_3 , если значение разряда маски соответствует разряду шаблона с высокой оценкой. В не зафиксированных позициях S_1 МК добавляет некоторые шаблоны из S_2 . Формирование S_4 проводится аналогично. Смещение поиска для последующих эпох ГА обеспечивается изменением масок правилами управления разрядами масок. Они применяются к исходным строкам – предкам и управляют последующими установками маски. При этом устраняется проблема, возникающая при прямом управлении кроссовером масками, приводящими к феномену появления иерархии метамасок. Правила образуют некоторое множество, а выбор конкретного правила определяется соотношением результата проведенной операции по отношению к исходным параметрам генотипов предшественников.

Выделив три градации результата потомка – Удачный (У), Средний (С), Плохой (П), ограничим множество правил формирования и распространения масок 6 вариантами MF (рис. 2).

Потомок 1	Потомок 2	Правило
удачный	Удачный	MF_{yy}
плохой	Плохой	MF_{nn}
средний	Средний	MF_{cc}
удачный	Плохой	MF_{yn}
удачный	Средний	MF_{yc}
средний	Плохой	MF_{cn}

Рис. 2. Варианты масок MF

Основное назначение правил – коррекция результата операции в случае, если оценка у потомка ниже, чем у его доминирующего предка. В этом случае целесообразно максимально учитывать информацию от обоих предков.

Приведем пример правила распространения масок.

Обозначим через $P1$ и $P2$ – предков, $PM1$ и $PM2$ – соответствующие им маски, $C1$ и $C2$ – потомки, $CM1$ и $CM2$ – их маски. Значение позиции # выбирается случайно с одинаковой вероятностью.

П1: MF_{xx} – оба потомка имеют достаточно качественные показатели.

Развитие поиска исключительно успешное и отражено масками на рис. 3 и ниже. Маски объединяются по OR для сохранения вклада обоих предков.

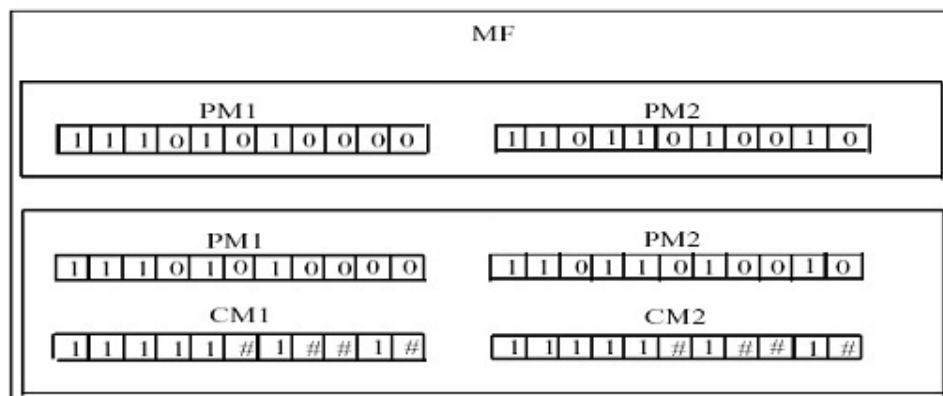


Рис. 3. Развитие поиска

CM1: PM1 OR PM2. Если в какой-либо позиции остались 0, ей присваивается #.

CM2: Аналогично *CM1*.

PM1: Без изменений, кроме вызванных мутацией *PM1*.

PM2: Аналогично *PM1*.

Правила масок явно сохраняют информацию о направлении поиска, поэтому МК позволяет одновременно обеспечить как накопление, использование информации о направлении поиска, так и независимость от определяющей длины шаблонов.

В заключение отметим одну особенность МК. Операции генетического преобразования, в частности кроссовер, не исчерпывают всех этапов эволюционного процесса. К критическим этапам необходимо отнести в том числе и селекцию. Стандартная процедура селекции предполагает полное замещение сгенерированной популяцией потомков предшествовавшей исходной популяции предков. Такой механизм препятствует возможности ГА сойтись к одному оптимальному решению вследствие тенденции к разрушению лучших особей при поиске в перспективных направлениях. Для нормализации процесса можно модифицировать процедуры стандартной селекции заменой ее на элитарную, а именно, N потомков совместно с предками формируют популяции из $2N$ особей, из которых для дальнейшей эволюции отбирается N лучших потомков.

Библиографический список

1. Слепцов, Н. В. Эффективное управление генетическим поиском с помощью операций кроссовера / Н. В. Слепцов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2009. – № 3. – С. 32–46.
2. Holland, J. H. Building Blocks, Cohort Genetic Algorithms, and Hyperplane-Defined Functions / J. H. Holland // *Evolutionary Computation*. – 2000. – № 4 (8). – P. 373–391.
3. Емельянов, В. В. Теория и практика эволюционного моделирования / В. В. Емельянов, В. В. Курейчик, В. М. Курейчик. – Москва : ФМЛ, 2003.

References

1. Sleptsov N. V. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki [*University proceedings. Volga region. Engineering sciences*]. 2009, no. 3, pp. 32–46. [In Russian]
2. Holland J. H. *Evolutionary Computation*. 2000, no. 4 (8), pp. 373–391.
3. Emel'yanov V. V., Kureychik V. V., Kureychik V. M. *Teoriya i praktika evolyutsionnogo modelirovaniya* [Theory and practice of evolutionary modeling]. Moscow: FML, 2003. [In Russian]

Имамутдинов Антон Игоревич

аспирант,
Пензенский государственный университет
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: antonim94@yandex.ru

Imamutdinov Anton Igorevich

postgraduate student,
Penza State University
(440026, 40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Образец цитирования:

Имамутдинов, А. И. Обеспечение вычислительной эффективности генетического поиска / А. И. Имамутдинов // Надежность и качество сложных систем. – 2019. – № 3 (27). – С. 100–104. – DOI 10.21685/2307-4205-2019-3-12.