

# СОДЕРЖАНИЕ

## ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ БЕЗОПАСНОСТИ, НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА

<b>Бецков А. В., Прокопьев И. В.</b> АНАЛИЗ ЖИВУЧЕСТИ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА.....	3
<b>Бойко О. Г., Фурманова Е. А.</b> МЕТОДОЛОГИЯ ОЦЕНКИ ВЕРОЯТНОСТИ КАТАСТРОФИЧЕСКИХ ОТКАЗОВ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СИСТЕМ САМОЛЕТОВ.....	7

## ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

<b>Карапузов М. А., Полесский С. Н., Жаднов В. В.</b> ВЛИЯНИЕ ВНЕШНИХ ВОЗМУЩАЮЩИХ ФАКТОРОВ НА ДОЛГОВЕЧНОСТЬ СВЧ-УСТРОЙСТВ .....	14
<b>Безродный Б. Ф., Шмелев О. Ю., Майоров С. А.</b> ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ НА ОСНОВЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОБЪЕМОВ ОПЫТНЫХ ПАРТИЙ ИЗДЕЛИЙ ЭЛЕКТРОНИКИ.....	21

## ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

<b>Чернышев Ю. О., Сергеев А. С., Дубров Е. О.</b> БИОИНСПИРИРОВАННЫЕ АЛГОРИТМЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ КРИПТОАНАЛИЗА .....	27
<b>Безродный Б. Ф., Орлов А. В., Голубев А. С., Болотский Д. Н.</b> К ПРОБЛЕМЕ ОЦЕНКИ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ОБЪЕКТОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ АВТОМАТИКИ И ТЕЛЕМЕХАНИКИ .....	34
<b>Юрков Н. К., Русяева Е. Ю., Полтавский А. В.</b> ВЗГЛЯД НА ТЕОРИЮ АЛГОРИТМОВ С ПОЗИЦИЙ ФИЛОСОФИИ .....	40
<b>Полтавский А. В.</b> ИНТЕГРАЦИИ СИГНАЛОВ КОГЕРЕНТНОЙ СИСТЕМЫ ГЛОНАСС/GPS .....	46

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ

<b>Абрамов О. В.</b> ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ЭЛЕМЕНТАМИ НАСТРОЙКИ .....	51
---	----

**Светлов А. В., Паршуков М. Ю., Комаров В. В., Сапунов Е. В.**  
МЕТОДИКИ ВХОДНОГО КОНТРОЛЯ ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ ..... 56

**Годунов А. И., Шишков С. В., Юрков Н. К.**  
КОМПЛЕКС ОБНАРУЖЕНИЯ И БОРЬБЫ С МАЛОГАБАРИТНЫМИ  
БЕСПИЛОТНЫМИ ЛЕТАТЕЛЬНЫМИ АППАРАТАМИ ..... 62

# ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ БЕЗОПАСНОСТИ, НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА

УДК 629.7.075

## АНАЛИЗ ЖИВУЧЕСТИ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

А. В. Бецков, И. В. Прокопьев

Эффективное функционирование беспилотного летательного аппарата (далее – БПЛА) самостоятельно или в составе аэромобильного комплекса специального назначения в интересах обеспечения мониторинга оперативной обстановки предполагает безопасное управление БПЛА, при отсутствии оператора непрерывно управляющим им [1, 2].

БПЛА – сложный объект управления, на который возлагаются разнообразные целевые задачи [1].

Под разнообразными задачами мы понимаем:

1) мониторинг оперативной обстановки конкретной территории (акватории, воздушного пространства), объекта визуализированный, дозиметрический, радио и т.д. и одновременное доведение информации до наземного пункта управления (заказчика – лица, принимающего решение);

2) инспектирование, слежение за объектом с распознаванием образов, ситуаций и передачи оперативной информации наземному пункту управления;

3) ретрансляция служебной информации по каналу связи;

4) имитация цели и перехвата [2].

Важную проблему представляет обеспечение живучести БПЛА вследствие их высокой стоимости, ответственности за качество выполняемых задач в обычных условиях и агрессивных воздействий среды пилотажа БПЛА.

Решить эти и некоторые другие задачи можно с помощью двухуровневой (многоуровневой) организации управления, при которой второй (каждый последующий) уровень управления адаптирует первый (предыдущий) уровень к конкретным заданным условиям. Эту адаптацию можно представить как некоторую перестройку параметров или переход к новой структуре системы управления первого уровня.

Существует несколько современных информационно-технических технологий, позволяющих создавать данные системы управления (далее – СУ): экспертные системы, искусственные нейронные сети, нечеткая логика, генетические алгоритмы и ряд других информационных технологий.

В инженерном контексте интеллектуальное управление БПЛА должно обладать следующими свойствами: во-первых, живучестью (устойчивостью к внешним возмущениям); во-вторых, способностью к обучению и адаптации; в-третьих, способностью к включению новых компонентов; в-четвертых, автономностью (при этом учитывается возможность потери связи с оператором), обеспечивается живучестью (СУ).

Системой управления БПЛА, обладающей свойствами, необходимыми для применения ее в системах управления более сложного порядка (система управления аэромобильного комплекса специального назначения), могут быть интеллектуальные системы управления, построенные на нейроконтроллерах с гибридным управлением.

На рис. 1 приведена функциональная схема системы управления БПЛА на основе интеллектуального управления.

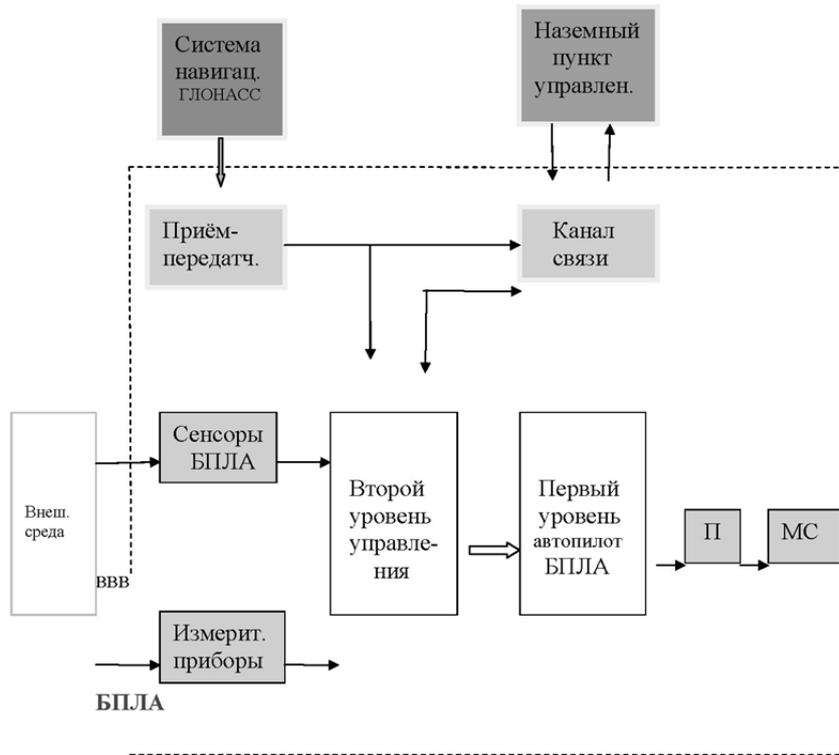


Рис. 1. Функциональная схема двухуровневой системы управления беспилотным летающим аппаратом:  
 П – приводы; МС – механическая система

Система управления второго уровня (последующего) в соответствии с заданной программой и на основании поступающей информации от навигационной системы, сенсорных датчиков, измерительных приборов формирует управляющий вектор  $\bar{x}$  для первого уровня управления автопилота [3, 4].

Автопилот (далее – АП) решает задачу управления механическими системами БПЛА. Обеспечивает перемещение БПЛА из одной точки пространства в другую по координатам, выдаваемым вторым уровнем управления. АП, по сути, – ПИД регулятор, выполненный по схеме нечеткого нейроэмулятора и гибридного нейроконтроллера с обратной связью (рис. 2).

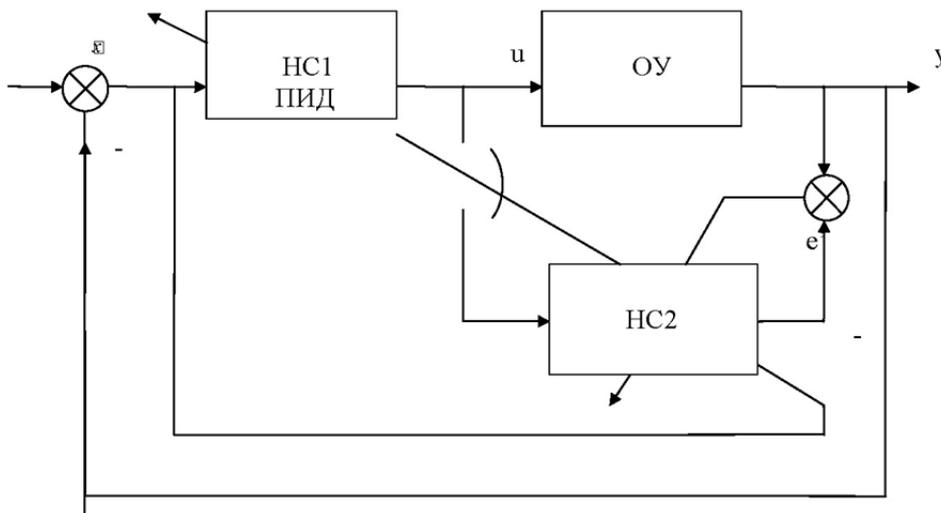


Рис. 2. Схема гибридного нейросетевого управления

В схеме используется контроллер обратной связи, выполненный как гибридный ПИД регулятор НС1, обучающийся через индификатор НС2. Обучение через индификатор необходимо, чтобы не мешать нормальному функционированию объекта пробными воздействиями, используемыми для обучения. Кроме того, такая схема позволяет реализовать предикатное управление и повышает безопасность БПЛА.

Данная схема управления (см. рис. 2) повышает живучесть и тем самым вероятность выполнения задачи. Схема напоминает структурное дублирование, однако мы здесь имеем дело с временным резервированием. Помимо быстрогодействия системы, за счет чего создается резерв времени, этот резерв времени может быть использован для контроля, поиска неисправностей и восстановления работоспособности и других операций, расчет новых траекторий, направленных на обеспечение безопасного функционирования системы при воздействии дестабилизирующих факторов [5, 6].

Безопасность, как правило, не является целью операции, в которой используется БПЛА. Однако свойство безопасного функционирования БПЛА создает необходимые условия для достижения цели операции. Во многих случаях получение полезного эффекта операции может обеспечиваться только при выполнении требований к показателям ее безопасности.

Отсюда следует, что требования к значениям показателей безопасности БПЛА вытекают из требований к показателю эффективности операции, в которой она используется.

Среди состояний сложной технической системы (например, аэромобильный комплекс) обычно выделяется подмножество опасных состояний, переход в которые считается недопустимым. Для БПЛА, например, к их числу могут относиться: нарушение газодинамической устойчивости работы силовой установки БПЛА, получение БПЛА в результате внешних воздействий повреждений определенного типа и размера и т.д.

В задачах безопасного использования БПЛА можно рассматривать интенсивность воздействия как некоторую характеристику возмущений внешней среды, например, полет БПЛА:

- степень турбулентности атмосферы;
- величину дополнительной подъемной силы (момента тангажа, момента крена и т.д.), которую будет испытывать летательный аппарат в данной точке пространства;
- величину дополнительной перегрузки (боковой или вертикальной);
- величину дополнительных углов атаки, скольжения или угловых скоростей и т.д.

Все эти возмущения и другие составляют управляющий вектор  $\vec{x}$  и если интенсивность воздействия будет больше заданной величины, в системе управления сработают правила восстановления, составляющие базу знаний самой системы управления, характеризующуюся как интеллект [7, 8].

1. Если параметры объекта меняются, можно воспользоваться методами оперативной идентификации. На этой основе можно осуществлять непрерывную подстройку параметров нечеткого регулятора или отдельных его частей.

2. Существуют трудности в обосновании устойчивости сложных нелинейных систем управления. Иногда БПЛА может оказаться в режимах работы, которые могут оказаться критическими. По этой причине для обеспечения устойчивости системы целесообразно использовать дополнительные стабилизирующие устройства.

### *Список литературы*

1. Катулев, А. Н. Исследование операций: принципы принятия решений и обеспечение безопасности / Н. А. Северцев, А. Н. Катулев. – Тверь, 1999. – 167 с.
2. Бецков, А. В. Формирование и функционирование аэромобильных комплексов МВД России / А. В. Бецков. – М. : ТЕИС, 2010. – 240 с.
3. Курбанов, В. Г. Математические методы в теории управления / В. Г. Курбанов. – СПб., 2009. – 412 с.
4. Юрков, Н. К. Оценка безопасности сложных технических систем / Н. К. Юрков // Надежность и качество сложных систем. – 2013. – № 2. – С. 15–21.
5. Хайкин, С. Нейронные сети: полный курс : пер. англ. / Саймон Хайкин. – 2-е изд. – М. : Вильямс, 2006. – 1104 с.
6. Информационно-измерительный лабораторный комплекс исследования теплопроводов электрорадиоэлементов / Н. В. Горячев, А. В. Лысенко, И. Д. Граб, Н. К. Юрков // Надежность и качество : тр. Междунар. симп. : в 2 т. / под ред. Н. К. Юркова. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2012. – Т. 2. – С. 239–240.

7. Осовски, С. Н. Нейронные сети для обработки информации / С. Н. Осовски. – М. : Финансы и статистика, 2002. – 248 с.
8. Затылкин, А. В. Индукционный виброметр для проведения амплитудно-частотного и модального анализа конструкций РЭС / А. В. Затылкин, Г. В. Таньков, А. А. Бобров // Надежность и качество : тр. Междунар. симп. : в 2 т. / под ред. Н. К. Юркова. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2013. – Т. 2. – С. 44–48.

**УДК 629.7.075**

**Бецков, А. В.**

**Анализ живучести беспилотного летательного аппарата** / А. В. Бецков, И. В. Прокопьев // Надежность и качество сложных систем. – 2014. – № 2(6). – С. 3–6.

**Бецков Александр Викторович**

доктор технических наук, доцент,  
кафедра управления органами внутренних дел  
в особых условиях,  
Академия управления МВД России,  
(125171, Россия, г. Москва,  
ул. Зои и Александра Космодемьянских, д. 8)  
(499) 745-95-20  
E-mail: abckov@mail.ru

**Прокопьев Игорь Витальевич**

кандидат технических наук,  
старший научный сотрудник,  
отдел безопасности и нелинейного анализа,  
ВЦ РАН им. А. А. Дородницына  
(119333, Россия, г. Москва, ул. Вавилова, 40)  
(495) 135-55-08  
E-mail: fvi-2003@mail.ru

**Аннотация.** Рассматриваются особенности системы интеллектуального управления беспилотным летательным аппаратом для обеспечения живучести в агрессивной среде, принятия решения с целью достижения требуемого результата.

**Ключевые слова:** беспилотный летательный аппарат, аэромобильный комплекс, мониторинг оперативной обстановки, живучесть, системы интеллектуального управления, нейросетевое управление, гибридное управление, индикатор.

**Betskov Aleksandr Viktorovich**

doctor of technical sciences, associate professor,  
sub-department of management bodies of internal  
affairs in the special conditions,  
Russian Academy of the interior Ministry  
(125171, 8 Zoy and Alexander Kosmodemianskys street,  
Moscow, Russia)

**Prokop'ev Igor' Vital'evich**

candidate of technical sciences,  
senior staff scientist,  
department of security and nonlinear analysis,  
VTs Russian Academy of Sciences  
of A. A. Dorodnitsyn  
(119333, 40 Vavilov street, Moscow, Russia)

**Abstract.** In article features of system of intellectual management by the pilotless flying device for maintenance of survivability in an excited environment, decision-making with objective of achievement of required result are considered.

**Key words:** the pilotless flying device, an aeromobile complex, monitoring of operative conditions, survivability, systems of intellectual management, neural network control, hybrid management, indicator.

## МЕТОДОЛОГИЯ ОЦЕНКИ ВЕРОЯТНОСТИ КАТАСТРОФИЧЕСКИХ ОТКАЗОВ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СИСТЕМ САМОЛЕТОВ

О. Г. Бойко, Е. А. Фурманова

**Введение.** Полные отказы функциональных систем самолетов (ФСС) чреваты катастрофами. Их вероятность не велика и по требованиям Норм летной годности не превышает  $1 \cdot 10^{-9} \text{ ч}^{-1}$  [1]. Высокая безотказность ФСС обеспечивается использованием нагруженного резервирования и восстановления систем после каждого полета в случае реализации отказа.

В соответствии с документами [2, 3] расчет безотказности ФСС выполняется методами, основанными на использовании теоремы умножения вероятностей. Недостатки этих методов рассмотрены в работах [4, 5]. Здесь следует отметить, что указанные методы не учитывают дискретность отказов элементов, изменение структуры систем в процессе развития отказов и влияние восстановления.

Вместе с этим следует отметить, что:

– в статистической физике, задолго до создания теории надежности, были сформулированы постулаты и принципы решения задач статистическими методами. Постулат Макса Планка, в частности, гласит [6]: «Всякая конечная физическая система при рассмотрении ее статистическими методами должна представляться так, как будто она может находиться только в дискретных состояниях». Для ФСС такими состояниями являются: исправное, работоспособные с функциональными отказами и неработоспособное;

– опыт эксплуатации ФСС и выполненные нами эксперименты показывают, что потоки отказов в системах характеризуются постоянством средней наработки на отказ  $\bar{T}$  (а следовательно, постоянным параметром потока отказов  $\omega$ ), т.е. являются стационарными пуассоновскими, а системы нестареющими [7, 8]. Следовательно, в качестве математической модели вероятности отказов элементов может быть принято распределение равномерной плотности вида

$$q(t) = \begin{cases} f(t) \cdot t & \text{при } 0 \leq t < 2\bar{T} \\ 1 & \text{при } t \geq 2\bar{T} \end{cases}, \quad (1)$$

где плотность вероятности  $f(t)$  будет иметь вид

$$f(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t < 0, \quad t > 2\bar{T} \\ \frac{1}{2\bar{T}}, & 0 \leq t \leq 2\bar{T} \end{cases}. \quad (2)$$

Целью данной работы является разработка методологического подхода к расчету безотказности ФСС, в котором теорема умножения вероятности не используется. Подход основан на представлении о том, что вероятность отказа элемента в ФСС определяется суммарным параметром потока отказов элементов работоспособной части системы и их предшествующей наработкой [9].

**Основная часть.** В рамках предлагаемого подхода рассмотрим метод оценки безотказности для системы общего резервирования, приведенной на рис. 1.

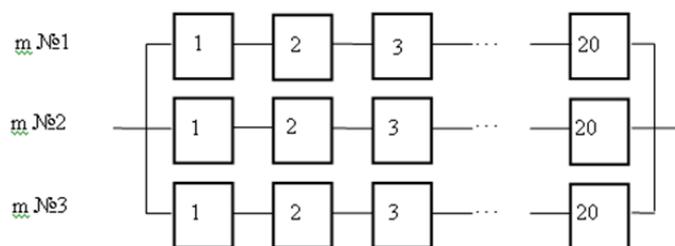


Рис. 1. Расчетная схема системы  $m = 3, n = 20$

Система состоит из  $m = 3$  параллельно включенных подсистем, каждая из которых содержит  $n = 20$  последовательно соединенных элементов, имеющих одинаковые параметры потоков отказов  $\omega = 2 \cdot 10^{-4} \text{ ч}^{-1}$ . Такая схема является приближенным аналогом гидравлической системы самолета Ту-154М и обеспечивает наглядность при иллюстрации метода. Очевидно, что полный отказ системы достигается после отказа в ней трех элементов.

Оценка безотказности по предлагаемому методологическом подходу структурно состоит из трех этапов.

На первом этапе проводится анализ и подготовка исходных данных в соответствии с методикой ОСТ [2]. Результатом первого этапа будет расчетная схема надежности.

На втором этапе выполняется расчет интервалов времени, на которых с заданной вероятностью произойдут отказы в системе без ее восстановления.

На третьем этапе выполняется расчет наработок времени, на которых реализуются отказы в системе с учетом ее восстановлений, и вероятностей ее отказов за час полета.

Поскольку первый этап стандартный [2], то представление подхода начнем со второго этапа. На втором этапе сначала определяется суммарный параметр потока отказов системы как

$$\omega_{\Sigma 1} = n \cdot m \cdot \omega = 60\omega, \quad (3)$$

а, следовательно, суммарная плотность потока отказов будет иметь вид

$$f_{\Sigma}(t) = 0,5\omega_{\Sigma}. \quad (4)$$

В соответствии с (1) вероятность первого отказа в системе определится как

$$q_1(t) = f_{\Sigma}(t) \cdot t_1. \quad (5)$$

При стационарном процессе эксплуатации, в соответствии с принципом неопределенности Гейзенберга, невозможно заранее знать, какой именно из элементов системы откажет на рассматриваемом отрезке времени. Следует обратить внимание на то, что в практике эксплуатации самолетов фиксируются только наработки на первый отказ элементов на самолете в целом и в отдельных системах. При этом фиксируется только время, и никогда не отмечается, какой именно элемент отказывает.

Из (5) находится время  $t_1$  как граница отрезка  $[0, t_1]$ , на котором реализуется первый отказ в системе с вероятностью  $q_1(t)$  в виде

$$t_1 = \frac{q_1(t)}{f_{\Sigma}(t)}. \quad (6)$$

Следует учесть, что при стационарном процессе эксплуатации все моменты времени равноправны, и поэтому за начало отсчета (за 0) можно принять любой произвольный момент времени. Таким образом, время  $t_1$  выражено в (6) через заданное значение вероятности первого отказа  $q_1(t)$ , параметры системы  $n$  и  $m$  и параметры потоков отказов элементов  $\omega$ . Поскольку отказы в системе события достоверные, то вероятность реализации отказа на рассматриваемом отрезке положим равную единице  $q_1(t) = 1$ , и, таким образом, граница отрезка  $[0, t_1]$ , на котором произойдет первый отказ в системе, может быть найдена как выражение (7):

$$t_1 = \frac{1}{f_{\Sigma}(t)} = \frac{1}{60 \cdot 10^{-4}} = 166 \text{ ч}. \quad (7)$$

Очевидно, что первый отказ в системе общего резервирования приводит к отказу одной из трех подсистем, так как элементы в ней соединены последовательно. При этом структура системы на отрезке  $[0, t_1]$  изменится, что приведет к изменению  $\omega_{\Sigma}$ , а следовательно, суммарной плотности потока  $f_{\Sigma}(t)$  системы.

В оставшихся двух работоспособных подсистемах плотность суммарного потока определится в виде

$$f_{\Sigma 2} = n(m-1) \cdot 0,5 \cdot \omega. \quad (8)$$

Аналогично вероятность отказа следующего (второго) элемента с учетом предыдущей наработки системы  $t_1$  определится в виде

$$q_2(t) = f_{\Sigma 2}(t) \cdot t_2 = n(m-1)0,5 \cdot \omega \cdot t_2, \quad (9)$$

где

$$t_2 = t_1 + \Delta t_2. \quad (10)$$

Приращение времени между первым и вторым отказами  $\Delta t_2$  из (10) с учетом  $q_2(t) = 1$  выразится как

$$\Delta t_2 = \frac{q_2(t) - n(m-1)0,5 \cdot \omega \cdot t_1}{n(m-1)0,5 \cdot \omega} = 84 \text{ ч.} \quad (11)$$

После второго отказа в рассматриваемой системе останется работоспособной только одна подсистема, содержащая 20 элементов. Через вероятность ее отказа выразится приращение времени до третьего отказа как

$$\Delta t_3 = \frac{q_3(t) - n(m-2) \cdot 0,5 \cdot \omega (t_1 + \Delta t_2)}{n(m-2) \cdot 0,5 \cdot \omega} = 250 \text{ ч.} \quad (12)$$

Рассчитанные на втором этапе значения  $t_1$ ,  $\Delta t_2$ ,  $\Delta t_3$  определяют границы временных интервалов, на которых с заданной вероятностью реализуются отказы в системе при стационарном процессе эксплуатации и отсутствии ее восстановления. Полученные значения  $t_1$ ,  $\Delta t_2$ ,  $\Delta t_3$  являются исходными данными для расчета безотказности системы с учетом ее восстановления на третьем этапе.

Расчеты, выполненные для приближенной системы-аналога гидросистемы Ту-154М, показали, что с вероятностью  $q(t) = 1$  первая подсистема откажет до времени  $t_1 = 166$  ч; вторая – на интервале от  $[t_1, 250]$  ч; система в целом откажет на интервале  $[t_2, 500]$  ч.

Графически процесс изменения вероятности отказа системы может быть представлен в виде, приведенном на рис. 2. Поскольку рассматриваемая система состоит из трех подсистем, то отказ каждой из них увеличивает вероятность отказа всей системы на  $\Delta Q = 0,333$ . В связи с этим времени  $t_1$  будет соответствовать вероятность отказа системы  $Q(t_1) = 0,333$ . Времени  $t_2$  будет соответствовать  $Q(t_2) = 0,666$ , а вся система с вероятностью  $Q(t_3) = 1$  откажет до времени  $t_3 = 500$  ч соответственно.

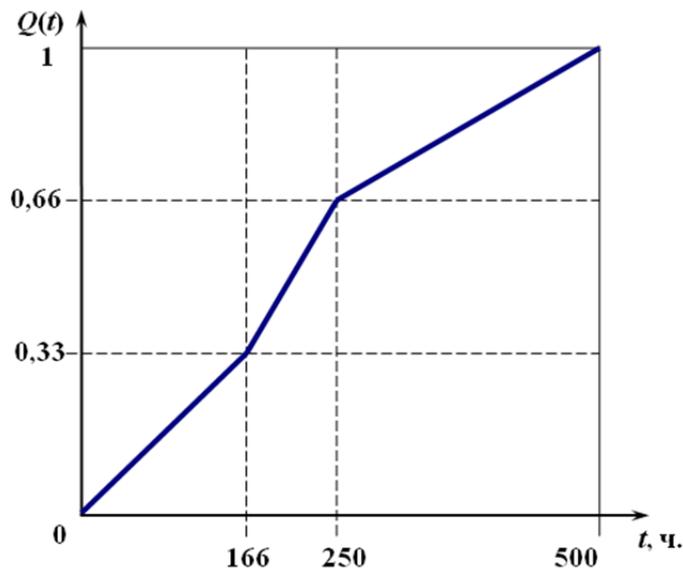


Рис. 2. Изменение вероятности отказа системы-аналога гидросистемы самолета Ту-154М без учета восстановления

Характер изменения вероятности отказа, показанный на рис. 2, полностью отражает процесс выхода из строя подсистем изменением угла наклона последующих участков на графике. Следует иметь в виду, что при стационарном процессе эксплуатации в соответствии с моментом времени, принятым за начало отсчета, может быть построено поле таких зависимостей, как на рис. 2.

По российским статистическим данным налет на один отказ какого-либо агрегата на самолете в целом составляет: для Ту-154М – 33 ч, Ту-134А – 23 ч, Ил-86 – 27 ч, Ил-76 – 7 ч соответственно. Поскольку на самолете Ту-154М отказывали элементы нескольких систем, а аналог гидросистемы, рассмотренный выше, приближенный, то полученное значение налета на отказ элемента в гидросистеме, равное 166 ч, следует признать близким к действительному.

Для высоконадежных ФСС время  $t_1$ , получаемое по статистическим данным, фиксируемым в серийной эксплуатации, является единственным расчетным показателем, дающим возможность подтвердить правомерность любого методологического подхода.

На третьем этапе метода выполняются расчеты изменения безотказности системы с учетом ее восстановления и вероятности ее отказа за час полета.

При построении метода учтено, что вследствие резервирования один отказ в системе самолета в полете на безопасность полета особого влияния не оказывает. Но существует вероятность реализации за время полета и других отказов, таких, что система может потерять работоспособность, что приведет к катастрофе. Если число отказов не катастрофично, то после завершения полета система будет восстановлена на земле. Поэтому время восстановления системы следует рассматривать состоящим из двух частей: времени полета с отказавшим элементом  $T_{по}$  и времени восстановления системы на земле  $T_{вост.з}$ :

$$T_{вост} = T_{по} + T_{вост.з} \quad (13)$$

Поскольку время восстановления системы на земле не оказывает влияния на безопасность полета, то в расчетах используется только время  $T_{по}$ .

При стационарном процессе эксплуатации изменение надежности в функциональной системе циклично и является следствием многократных повторений «отказов–восстановлений». Таким образом, наработку восстанавливаемой системы можно представить в виде совокупности таких циклов. Тогда продолжительность цикла «один отказ–восстановление» в системе выразится как

$$t_{ц}^1 = t_1 + T_{по} \quad (14)$$

Через некоторое конечное множество таких циклов в полете могут реализоваться два отказа. Циклограмма времен отказов и восстановлений в системе до наступления события двух отказов за полет приведена на рис. 3.

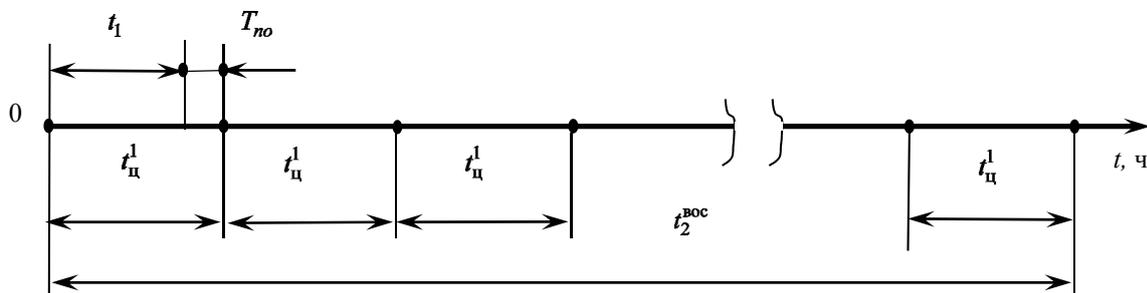


Рис. 3. Циклограмма процесса отказов–восстановлений до реализации второго отказа в системе

Число циклов «один отказ–восстановление» в системе должно быть таким, чтобы сумма времен  $T_{по}$  каждого из них стала равной  $\Delta t_2$ . Это обеспечивает возможность определить число циклов как

$$k_2 = \frac{\Delta t_2}{T_{\text{по}}}, \quad (15)$$

и выразить через него наработку системы  $t_2^{\text{вост}}$  в соответствие с рис. 3 в виде

$$t_2^{\text{вост}} = t_{\text{ц}}^1 \cdot k_2 = (t_1 + T_{\text{по}}) \frac{\Delta t_2}{T_{\text{по}}}. \quad (16)$$

Число циклов отказ–восстановление, которые реализуются до совместных отказов за полет трех элементов, подобно (15), выразится в виде

$$k_3 = \frac{\Delta t_3}{T_{\text{по}}}, \quad (17)$$

а время реализации трех отказов, т.е. отказ всей системы определится как

$$t_3^{\text{вост}} = (t_{\text{ц}}^2 + T_{\text{по}}) \frac{\Delta t_3}{T_{\text{по}}} \quad (18)$$

или в развернутом виде

$$t_3^{\text{вост}} = \left[ (t_1 + T_{\text{по}}) \frac{\Delta t_3}{T_{\text{по}}} + T_{\text{по}} \right] \cdot \frac{\Delta t_3}{T_{\text{по}}}. \quad (19)$$

В соответствие с (16) и (19) величина времени  $T_{\text{по}}$  оказывает непосредственное влияние на наработки  $t_2^{\text{вост}}$  и  $t_3^{\text{вост}}$  и, следовательно, на надежность систем. При  $T_{\text{по}} = 0$  времена  $t_2^{\text{вост}}$  и  $t_3^{\text{вост}}$  стремятся к бесконечности, т.е. при мгновенном восстановлении система становится безотказной.

Значения наработок  $t_1$ ,  $t_2^{\text{вост}}$  и  $t_3^{\text{вост}}$  обеспечивают возможность определения вероятности возникновения как функциональных, так и полного отказов в восстанавливаемой системе за час полета. Учитывая, что каждый отказ в рассматриваемой системе увеличивает вероятность ее отказа на  $\Delta Q = 0,333$ , можно оценить вероятность отказа на 1 ч полета при наработке системы  $t_1$  в виде

$$Q_1(1) = \frac{\Delta Q}{t_1} = \frac{0,333}{t_1} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ ч}^{-1}, \quad (20)$$

при наработке системы  $t_2^{\text{вост}}$  в виде

$$Q_2(1) = \frac{2\Delta Q}{t_2^{\text{вост}}} = \frac{0,666}{t_2^{\text{вост}}} = 4,75 \cdot 10^{-5} \text{ ч}^{-1}, \quad (21)$$

и при наработке системы  $t_3^{\text{вост}}$  в виде

$$Q_3(1) = \frac{1}{t_3^{\text{вост}}} = 2,85 \cdot 10^{-7} \text{ ч}^{-1}. \quad (22)$$

В соответствии с [2, 3] вероятность отказа за 1 ч полета  $Q(1)$  определяется только на отрезке времени  $[0, 1\text{ч}]$ , т.е. за первый час полета. Такую оценку трудно признать представительной, поскольку  $Q(t)$  является нелинейной функцией времени и, следовательно,  $Q(1)$  будет меняться в процессе налета часов. Приведенная оценка  $Q_3(1)$  по (22) определяет вероятность отказа за час интегрально, во всем диапазоне наработки ФСС от 0 до  $t_3^{\text{вост}}$ . Но в этом диапазоне момент реализации отказа остается никак не определен.

Если в расчетных выражениях (6), (11) и (12) задать ряд одинаковых значений для вероятностей отказов элементов  $q_1(t) = q_2(t) = q_3(t)$ , например, 0,2; 0,4; 0,6; 0,8 и 1, то будет получен ряд значений времен отказа системы  $t_3^{\text{вост}}$ , соответствующих вероятностям отказа системы  $Q(t) = 0,2$ ;

04; 06; 0,8 и 1. Это обеспечит возможность построить графическую зависимость изменения вероятности отказа системы с учетом ее восстановления  $Q(t)$ , а по ней и зависимость плотности вероятности отказа от времени, и определить математическое ожидание времени  $\langle t^{\text{отк}} \rangle$  до отказа системы. Тогда математическое ожидание вероятности отказа системы за 1 час полета будет определено как

$$\langle Q_3(1) \rangle = \frac{1}{\langle t^{\text{отк}} \rangle}. \quad (23)$$

Эта оценка вероятности отказа восстанавливаемой системы за час полета является более представительной, по сравнению с показанной ранее.

Предлагаемый методологический подход обеспечил возможность построения решения задач для оценки надежности систем с различным видом резервирования, в том числе с отдельным резервированием и систем, расчет которых не сводится к схеме последовательно-параллельного соединения.

Расчет таких систем имеет две отличительные особенности. Первая состоит в том, что при выходе из строя элемента в системе ее суммарный параметр потока отказов уменьшается только на параметр потока отказов этого отказавшего элемента [10].

Второе отличие состоит в том, что отказ таких систем может реализоваться по различным путям (сценариям) развития отказов элементов. В связи с этим для каждого сценария необходимо определять и учитывать эти вероятности при расчете времен до отказа системы. Эти методы подробно изложены в работе [11].

**Заключение.** Предлагаемый подход позволяет определять временные интервалы наступления событий отказов в резервированной системе при стационарном процессе эксплуатации, учитывает изменение структуры и восстановление, а также обеспечивает возможность расчета вероятностей отказа на час полета.

Предложенная оценка математического ожидания вероятности отказа системы за час полета является по существу математическим ожиданием вероятности катастрофической ситуации за час полета.

Новый подход обеспечивает возможность по новому решать вопросы оптимизации функциональных систем самолетов гражданской авиации.

### Список литературы

1. АП-25. Авиационные правила. Нормы летной годности самолетов транспортной категории. – М. : МАК. Авиаздат, 2004. – 240 с.
2. ОСТ 1 00132-97. Надежность изделий авиационной техники. Методы количественного анализа безотказности функциональных систем при проектировании самолетов и вертолетов. – 70 с.
3. SAE ARP 4761. Guidelines and Methods for Conducting the Safety Assessment Process on civil Airborne Systems Equipment. USA. – 269 p.
4. Бойко, О. Г. Надежность функциональных систем самолетов гражданской авиации : моногр. / О. Г. Бойко. – М. : РАН, 2009. – 119 с.
5. Бойко, О. Г. Проблемы и перспективы методов расчета надежности сложных функциональных систем / О. Г. Бойко, Л. Г. Шаймарданов // Проблемы и перспективы развития авиации, наземного транспорта и энергетики : материалы VI Междунар. науч.-техн. конф. «АНТЭ-2011». – Казань : КазГТУ-КАИ, 2011. – Т. 1. – С. 24–30.
6. Трайбус, М. Термостатика и термодинамика / М. Трайбус ; пер. с англ. под ред. А. В. Лыкова. – М. : Энергия, 1970. – 504 с.
7. Дедков, В. К. Компьютерное моделирование характеристик надежности нестареющих восстанавливаемых объектов / В. К. Дедков, Н. А. Северцев // Надежность и качество : тр. Междунар. симп. : в 2 т. / под ред. Н. К. Юркова. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2010. – Т. 1. – С. 368–370.
8. Дедков, В. К. Прогностика и косвенное прогнозирование надежности технических объектов / В. К. Дедков // Надежность и качество : тр. Междунар. симп. : в 2 т. / под ред. Н. К. Юркова. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2009. – Т. 1. – С. 108–110.
9. Гнеденко, Б. В. Математические методы в теории надежности. Основные характеристики надежности и их статистический анализ / Б. В. Гнеденко. – М. : Наука, 1965. – 524 с.
10. 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. 75–79.

11. Бойко, О. Г. Об одном из направлений оптимизации структуры функциональных систем самолетов / О. Г. Бойко, Е. А. Фурманова // Проблемы и перспективы развития авиации, наземного транспорта и энергетики : материалы Междунар. науч.-техн. конф. «АНТЭ-2013». – Казань : КНИТУ-КАИ, 2013. – С. 73–79.

УДК 629.7/621.01

**Бойко, О. Г.**

**Методология оценки вероятности катастрофических отказов функциональных систем самолетов** / О. Г. Бойко, Е. А. Фурманова // Надежность и качество сложных систем. – 2014. – № 2(6). – С. 7–13.

**Бойко Оксана Геннадьевна**

кандидат технических наук, доцент,  
кафедра технической эксплуатации  
летательных аппаратов и двигателей,  
Сибирский государственный аэрокосмический  
университет имени академика М. Ф. Решетнева  
(660014, Россия, Красноярск, проспект имени газеты  
«Красноярский рабочий» 31)  
(391) 233-15-51  
E-mail: bouko1962@yandex.ru

**Фурманова Евгения Андреевна**

ассистент,  
кафедра технической эксплуатации  
летательных аппаратов и двигателей,  
Сибирский государственный аэрокосмический  
университет имени академика М. Ф. Решетнева  
(660014, Россия, Красноярск, проспект имени газеты  
«Красноярский рабочий» 31)  
(391) 233-15-51  
E-mail: furmula@mail.ru.

**Аннотация.** Рассмотрен новый методологический подход к расчету безотказности восстанавливаемых резервированных систем, в котором не используется теорема умножения вероятностей. Новый подход основан на предположении о том, что при стационарном процессе эксплуатации вероятность отказа элемента определяется суммарным параметром потока отказов элементов работоспособной части системы и их предшествующей наработкой. Особенности методологического подхода являются возможности оценки временных интервалов, на которых с заданной вероятностью реализуются отказы в системе. На основании нового подхода разработаны методы оценки безотказности функциональных систем самолетов. Расчет безотказности выполняется без учета и с учетом восстановления системы. Метод учитывает изменение структуры в системе по мере реализации в ней отказов и дает оценку вероятностей ее отказов за час полета. В работе показана зависимость безотказности от времени полета с отказом. Приведено решение задачи расчета безотказности функциональной системы с общим нагруженным резервированием.

**Ключевые слова:** функциональная система, безотказность, резервирование, восстановление, вероятность на час полета.

**Boyko Oksana Gennad'evna**

candidate of technical sciences, associate professor,  
sub-department of technical manual aircraft and engines,  
Siberian State Aerospace University  
named after academician M. F. Reshetnev,  
(660014, 31 avenue named after newspaper  
«Krasnoyarskiy rabochiy», Krasnoyarsk, Russia)

**Furmanova Evgeniya Andreevna**

assistant,  
sub-department of technical manual aircraft and engines,  
Siberian State Aerospace University  
named after academician M. F. Reshetnev,  
(660014, 31 avenue named after newspaper  
«Krasnoyarskiy rabochiy», Krasnoyarsk, Russia)

**Abstract.** The new methodological approach is considered in the article. This new approach may be applied to calculate restorable redundant systems infallibility. Probability theory of multiplication is not used in this approach. The new approach is based upon assumption that during stationary exploitation process, the element refusal probability may be defined by summary of elements refusals flow parameter of the workable system part and elements preview working hours. The features of methodological approach are possibilities of time intervals estimation. In these intervals the system refusals may be realized with given probability. Based on the new approach the airplanes functional systems infallibility estimation methods are developed. The infallibility calculation may be performed with and without taking into account the system recovery. The method considers structure changing in system, as the refusals in system may be realized. The method gives the estimation of system refusal probabilities per flying hour. The dependence of infallibility from flight time with refusal is considered.

The solution of functional system infallibility calculation task, meaning the system with active redundancy which is currently running, is presented.

**Key words:** functional system, reliability, redundancy, recovery, the probability for an hour flight.

# ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

УДК 621.3.029

## ВЛИЯНИЕ ВНЕШНИХ ВОЗМУЩАЮЩИХ ФАКТОРОВ НА ДОЛГОВЕЧНОСТЬ СВЧ-УСТРОЙСТВ

М. А. Карапузов, С. Н. Полесский, В. В. Жаднов

На сегодняшний день СВЧ-аппаратура имеет широкий спектр применения: от простых бытовых приборов до сложных устройств космической техники. И вот работоспособность таких устройств чрезвычайно важна, поэтому так важно наиболее точно оценивать как вероятность безотказной работы, наработку, так и ресурс. Это связано с тем, что космическая техника является невосстанавливаемой и после наступления предельного состояния (т.е. полная выработка ресурса) вероятность отказа начинает возрастать очень быстро.

В соответствии с [1] ресурс – суммарная наработка объекта от начала его эксплуатации или ее возобновления после ремонта до перехода в предельное состояние, гамма-процентный ресурс – суммарная наработка, в течение которой объект не достигнет своего предельного состояния с вероятностью  $\gamma$ , выраженной в процентах, а средний ресурс – математическое ожидание ресурса. Под предельным состоянием понимается состояние объекта, при котором его дальнейшая эксплуатация недопустима или нецелесообразна либо восстановление его работоспособного состояния невозможно или нецелесообразно [4].

Еще одним важным пунктом определения значения ресурса радиоэлектронных приборов, в том числе СВЧ-устройств, является учет механических составных частей. Также стоит отметить, что отказы могут быть взаимосвязаны: нарушения работоспособности механических частей приводят к отказу электронной составляющей, и наоборот. Повреждения конструкции, деформации могут приводить к искажению сигналов, а нарушения электрического режима вследствие отказа ЭКБ могут приводить к отпаиванию проводов от контактных площадок, повышению температуры и т.п. Таким образом, пренебрегая отказами механических составных частей, мы завышаем результирующие значения показателей безотказности и долговечности СВЧ-устройств.

Методы оценки ресурса регламентированы ОСТ [3], значения ресурса для предельных и облегченных условий эксплуатации приведены в ТУ (необходимо уточнить, что ТУ только на отечественные разработки). Однако в них не описывается переход от этих значений к заданным на изделие, т.е. разработчики вынуждены оценивать ресурс изделия по нижней границе, так как космическая техника функционирует в отличных от предельных и облегченных условиях. Также сейчас не учитывается временной график работы изделия, когда изделие до непосредственного запуска в космос проходит различные проверки на земле, транспортируется к месту запуска, хранится и т.д. Освещению этих вопросов и посвящена статья – как оценить ресурс изделия, функционирующего в определенных условиях, и как учесть неравномерное расходование ресурса с момента ввода в эксплуатацию.

Для того, чтобы учесть неравномерное расходование ресурса, необходимо значения для различных групп аппаратуры нормировать относительно одного, произвольно выбранного (для определенности назовем его «ресурс при нормальных условиях» –  $T_{p,н.у.}$ ). Таким образом, мы получаем коэффициент пропорциональности расходования ресурса  $K(T_p)$ : для  $T_{p,н.у.}$  он будет равен единице, для более легких условий эксплуатации коэффициент будет строго больше единицы, для более жестких условий коэффициент будет строго меньше единицы. Действительно, если обратиться к ТУ, то для облегченных условий ресурс больше, чем для предельных, а следовательно, и результат нормировки относительно  $T_{p,н.у.}$ :

$$K(T_p) = \begin{cases} > 1, & \text{при } T_p > T_{p,н.у.} \\ 1, & \text{при } T_p = T_{p,н.у.} \\ < 1, & \text{при } T_p < T_{p,н.у.} \end{cases} \quad (1)$$

Далее с помощью этого коэффициента рассчитываем израсходованный ресурс за время эксплуатации изделия в условиях каждой группы аппаратуры, т.е. для «нормальных условий» количество израсходованного ресурса равно времени эксплуатации в этих условиях, а, например, для более жестких условий за то же время израсходуется больше ресурса. Для отрезков времени эксплуатации в условиях каждой группы аппаратуры находим разницу между реальным значением ресурса и нормальным и вычитаем ее из  $T_{p,н.у.}$ , тем самым получая истинное значение ресурса  $T_p$  изделия в заданных условиях групп аппаратуры:

$$T_p = T_{p,н.у.} - \sum_{i=1}^n t^{(i)} \cdot \left( \frac{1}{K_i(T_p)} - 1 \right), \quad (2)$$

где  $T_{p,н.у.}$  – значение ресурса для выбранных «нормальных» условий эксплуатации;  $n$  – количество групп условий эксплуатации аппаратуры (исключая «нормальные»);  $t^{(i)}$  – время эксплуатации в условиях  $i$ -й группы аппаратуры;  $K_i(T_p)$  – коэффициент пропорциональности расходования ресурса для условий  $i$ -й группы аппаратуры.

Методика расчета ресурса для определенных условий групп аппаратуры приведена в [2]. В ТУ обычно приводятся значения ресурса для предельных и облегченных условий эксплуатации, в статье же рассматривается способ перехода от заданных в ТУ значений к действительным:

$$T_p = \frac{T_p(\text{ПУ})}{K_{И} \cdot K_{Н}}, \quad (3)$$

где  $T_p(\text{ПУ})$  – заданное в ТУ значение ресурса для предельных условий эксплуатации;  $K_{И}$  – коэффициент использования;  $K_{Н}$  – коэффициент нагрузки (по критичному параметру).

В равенстве (3)  $K_{И}$  определяется согласно формуле (4), а  $K_{Н}$  согласно формуле (5):

$$K_{И} = \frac{t_{\Sigma pp}}{t_{\Sigma pp} + t_{\Sigma ож}}, \quad (4)$$

где  $t_{\Sigma pp}$ ,  $t_{\Sigma ож}$  – суммарное время нахождения в режиме работы и режиме ожидания за период эксплуатации;

$$K_{Н} = \frac{\Psi_{pp}}{\Psi_{ном}}, \quad (5)$$

где  $\Psi_{pp}$  – значение критичного параметра в режиме работы;  $\Psi_{ном}$  – номинальное значение критичного параметра согласно ТУ.

Рассмотрим в качестве примера изделие бортовой радиоэлектронной аппаратуры космической техники – СВЧ-коммутатор. В процессе эксплуатации коммутатор подвергается влиянию различных внешних воздействующих факторов (ВВФ). Сначала изделие хранится в помещении (на складе) в течение одного года (8760 ч), что соответствует группе 1.1 [8], в дальнейшем транспортируется каким-либо видом транспорта (группа 1.3 – для автомобильного, 3.1 – авиационного, 1.9 – железнодорожного) к месту пуска ракеты-носителя в течение пяти дней (120 часов), после чего происходит запуск в составе ракеты-носителя и вывод на орбиту (группа 4.1) в течение двух суток (48 часов) и, в конце концов, осуществляет свои основные функции (прием и передача в СВЧ-диапазоне) до окончания срока активного существования (САС) в условиях группы 5.3 (рис. 1). Согласно ТУ и статье [3] ресурс изделия для каждой из групп аппаратуры будет различен. С учетом вышесказанного о хранении, транспортировании и непосредственном функционировании изделия делаем вывод, что ресурс расходуется неравномерно.

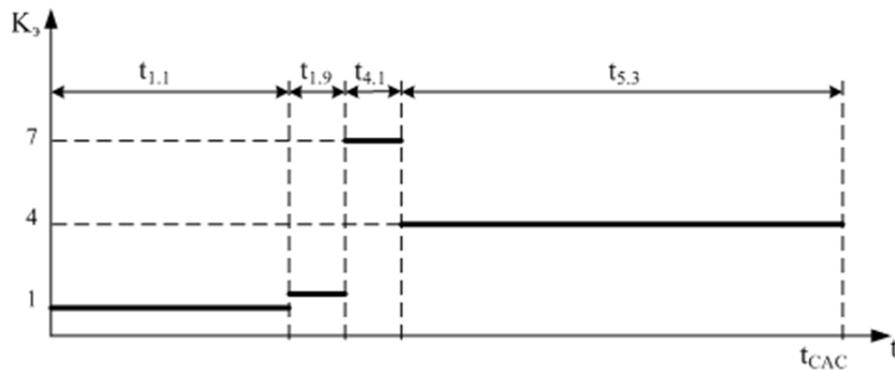


Рис. 1. Временной график эксплуатации коммутатора

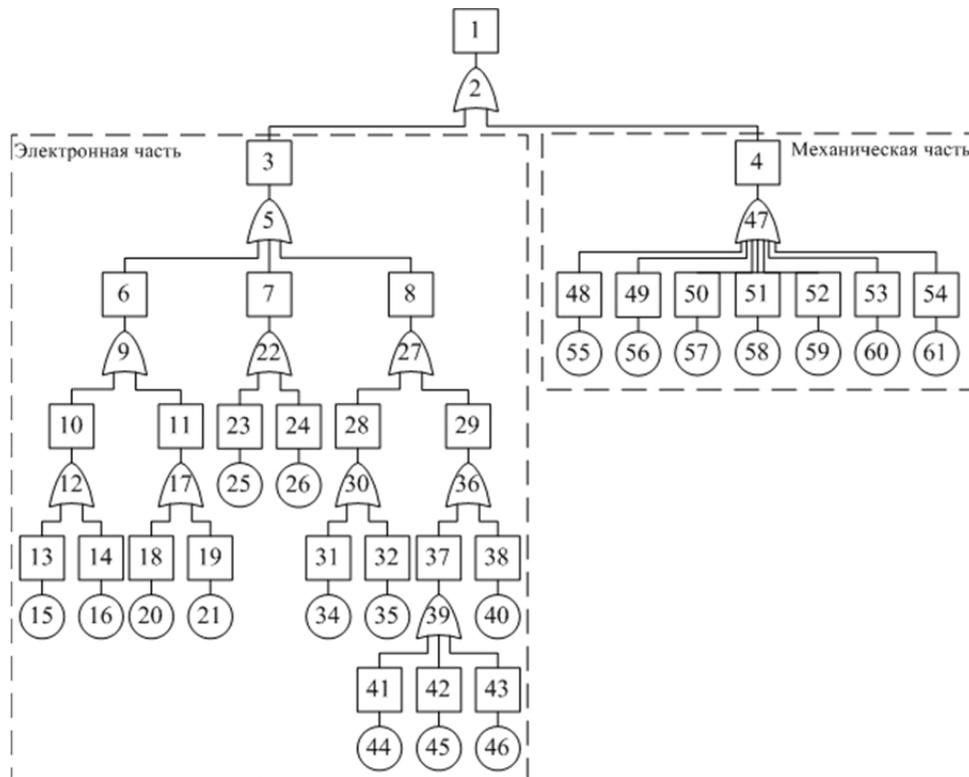


Рис. 2. Дерево отказов коммутатора

После анализа данных технической документации на коммутатор было построено дерево отказов (рис. 2) [7], где цифрами отмечены следующие события: 1 – изделие неработоспособно; 2 – отказ изделия; 3 – нет обработки сигнала; 4 – нарушение крепления и герметизации; 5 – отказ

электронной части; 6 – нет сигнала на входе цепи; 7 – нет обработки сигнала в платах; 8 – нет сигнала на выходе; 9 – отказ входных каскадов; 10 – нет сигнала на входе № 1; 11 – нет сигнала на входе № 2; 12 – отказ элементов входа № 1; 13 – отказ W1; 14 – отказ XW1; 15 – выгорание вентиля W1; 16 – выгорание разъема XW1; 17 – отказ элементов входа № 2; 18 – отказ W2; 19 – отказ XW2; 20 – выгорание вентиля W2; 21 – выгорание разъема XW2; 22 – отказ платы; 23 – отсутствие питания диода платы XN1; 24 – отсутствие питания диода платы XN2; 25 – отказ одного из диодов VD1-VD8; 26 – отказ одного из диодов VD1-VD8; 27 – отказ выходного каскада; 28 – нет сигнала на мостах XN8, XN9; 29 – отказ выходов изделия; 30 – отказ мостов XN8, XN9; 31 – отсутствие сигнала моста XN8; 32 – отсутствие сигнала моста XN9; 33 – повреждение токоведущих дорожек моста XN8; 34 – повреждение токоведущих дорожек моста XN9; 36 – нет сигнала в выходных каналах; 37 – отказ выходных разъемов XW3-XW5; 38 – отказ циркулятора W3; 39 – нет сигнала на разъемах XW3-XW5; 40 – выгорание циркулятора W3; 41 – отказ разъема XW3; 42 – отказ разъема XW4; 43 – отказ разъема XW5; 44 – выгорание разъема XW3; 45 – выгорание разъема XW4; 46 – выгорание разъема XW5; 47 – разрушение сварных, паяных и клееных соединений и разгерметизация заглушек и прокладок; 48 – отказ винтов крепления вентилях W1, W2; 49 – отказ паяного соединения перемычек плат XN1, XN2; 50 – отказ сварного соединения перемычек плат XN5, XN6; 51 – отказ заглушки; 52 – отказ клеевого соединения плат XN4, XN6; 53 – отказ винтов крышки; 54 – отказ прокладки крышки; 55 – ослабление крепления вентилях W1, W2; 56 – разрушение паяного соединения перемычек плат XN1, XN2; 57 – разрушение отказ сварного соединения перемычек плат XN5, XN6; 58 – деформация заглушки; 59 – отслоение пленки клея в соединении плат XN4, XN6; 60 – ослабление крепления крышки; 61 – деформация прокладки крышки. Как можно видеть, отказ изделия в равной мере зависит и от отказа электронных, и от отказа механических СЧ.

Результаты проведенного в соответствии с построенным деревом расчета показателей надежности приведены в табл. 1, а на рис. 3 изображен вклад в общую надежность электронных и механических компонентов коммутатора. Расчет электронной части проводился на основе данных, приведенных в [5], механической части – на основе [6].

Таблица 1

Результаты расчета показателей надежности коммутатора

Наименование компонента	Эксплуатационная интенсивность отказов, 1/ч	Интенсивность отказов в режиме ожидания, 1/ч	Гамма-процентный ресурс, ч
Электронная часть	7,27e-07	5,56e-08	23400
Механическая часть	9,92e-07	7,26e-08	26200
Коммутатор	1,71806079201876E-6	1,281957368E-7	23400

Как видно из рисунка, надежность механической части сопоставима с электронной частью и, пренебрегая ей, мы «улучшаем» надежность в 2 раза. Другими словами, очевидна необходимость учета механических компонентов при расчете показателей надежности и долговечности СВЧ-устройств. В табл. 2 представлены полученные значения показателей надежности, причем ресурс рассчитан с учетом нестационарных условий функционирования с использованием выражения (2).

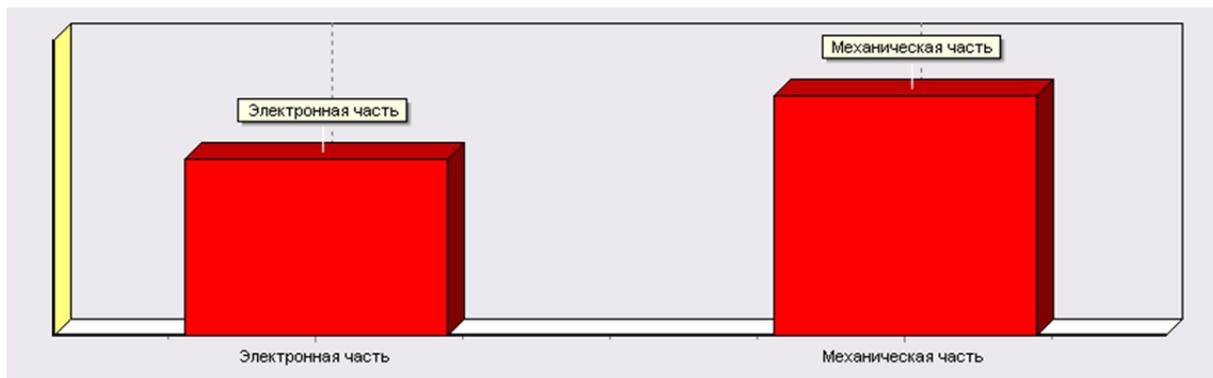


Рис. 3. Вклад в надежность коммутатора электронной и механической части

Таблица 2

## Показатели надежности СЧ коммутатора

Тип изделия	Эксплуатационная интенсивность отказов	Интенсивность отказов в режиме ожидания	Ресурс				
			1.1	1.9	4.1	5.3	Итоговый
Электронная часть							
ФПВН2-88	7,30e-08	8,76e-10	120000	80000	21800	60000	64300
ФЦП2-13	1,90e-07	8,93e-10	120000	80000	21800	60000	64300
СРГ-50 (ВР0.364.026ТУ)	5,49e-09	7,69e-09	200000	133000	53300	100000	104000
Пайка ЭРИ волной	6,90e-10	6,90e-12	131400	87600	35000	65700	70000
2А517А-2Н, Б-2Н	4,50e-08	1,68e-09	50000	47600	10000	17800	23400
Печатный монтаж	3,40e-11	3,40e-13	500000	230800	95200	178600	184000
Механическая часть							
Винт крепления вентилля	1,00e-09	1,00e-11	876000	584500	233600	438000	442400
Пайка перемычек	1,20e-09	1,20e-11	131400	87600	35000	65700	70000
Сварка провода к контактным площадкам	2,40e-10	2,40e-12	87600	58400	23300	43800	48100
Заглушка разъема фторопласт Ф-4(или Ф5)	3,60e-07	3,60e-08	175200	116800	46700	87600	91970
Клееное соединение платы	2,40e-08	2,40e-09	61300	40800	16300	30600	34900
Винт крепления крышки	6,00e-09	6,00e-11	876000	584500	233600	438000	442400
Прокладка крышки	2,88e-07	2,88e-08	43800	29200	11600	21900	26200
Пайка крышки и герметизация	2,40e-07	2,40e-09	131400	87600	35000	65700	70000

При расчете итогового ресурса из табл. 2 с помощью выражения (2) за «нормальные» условия принимались условия группы 5.3 и, как можно видеть, итоговое значение выше, чем для группы 5.3 в среднем на 4000 ч (чуть менее полугода).

Проведенный расчет подтвердил необходимость учета функционирования в условиях различных групп аппаратуры при оценке ресурса. В связи с ужесточением требований к аппаратуре не всегда можно позволить себе роскошь оценки по нижней границе (наихудшему случаю), так как подобные требования подразумевают проведение точных расчетов. Предложенная методика расчета ресурса делает шаг навстречу повышению точности проводимых расчетов ресурса. Также важным фактом является наглядная демонстрация влияния механических компонентов СВЧ-устройств на надежность (см. рис. 3). Примечательно, что учет механических компонентов ухудшает результирующие значения показателей надежности в равной степени, что и электронные [9–11]. Таким образом, все предложенные меры по проведению более точных расчетов наглядно обоснованы и подтверждают необходимость развития методов точных расчетов при ужесточающихся требованиях к СВЧ-устройствам.

Подводя итог, можно сделать следующие выводы:

- при оценке показателей надежности, в частности долговечности, необходимо учитывать механические компоненты СВЧ-устройств;
- значение ресурса зависит от группы аппаратуры, т.е. от набора ВВФ, и при оценке показателей долговечности необходимо учитывать нестационарность условий эксплуатации СВЧ-устройства.

#### Список литературы

1. ГОСТ 27.002-89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения.
2. Жаднов, В. В. Расчетная оценка показателей долговечности электронных средств космических аппаратов и систем / В. В. Жаднов // Надежность и качество сложных систем. – 2013. – № 2. – С. 65–73.

3. ОСТ 4Г0.012.013-84. Аппаратура радиоэлектронная. Определение показателей долговечности.
4. ГОСТ 27.003-89. Надежность в технике. Состав и общие правила задания требований по надежности.
5. Надежность электрорадиоизделий : справочник. – URL: <http://www.twirpx.com/file/1062157/>
6. NSWC-11. Handbook of Reliability Prediction Procedure for Mechanical Equipment.
7. ГОСТ Р 27.302-2009. Надежность в технике. Анализ дерева неисправностей.
8. ГОСТ РВ 20.39.304-98. Комплексная система общих технических требований. Требования к стойкости внешних воздействующих факторов.
9. Затылкин, А. В. Система адаптивного тестирования на основе нечеткого логического вывода / А. В. Затылкин // Надежность и качество : тр. Междунар. симп. : в 2 т. / под ред. Н. К. Юркова. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2012. – Т. 2. – С. 133–135.
10. Литвинов, А. Н. Моделирование напряженно-деформированного состояния в слоистых структурах РЭС при технологических и эксплуатационных воздействиях / А. Н. Литвинов, Н. К. Юрков // Надежность и качество сложных систем. – 2013. – № 3. – С. 16–22.
11. Программа инженерного расчета температуры перегрева кристалла электрорадиокомпонента и его теплоотвода / Н. В. Горячев, А. В. Лысенко, И. Д. Граб, Н. К. Юрков // Надежность и качество : тр. Междунар. симп. : в 2 т. / под ред. Н. К. Юркова. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2012. – Т. 1. – С. 340–340.

### УДК 621.3.029

*Карпузов, М. А.*

**Влияние внешних возмущающих факторов на долговечность СВЧ-устройств / М. А. Карпузов, С. Н. Полесский, В. В. Жаднов // Надежность и качество сложных систем. – 2014. – № 2(6). – С. 14–20.**

***Карпузов Михаил Александрович***

магистрант,  
кафедра информационных технологий  
и автоматизированных систем,  
Московский институт электроники и математики  
Национального исследовательского университета  
«Высшая школа экономики»  
(109028, Россия, г. Москва,  
Б. Трехсвятительский пер., 3)  
(495) 916-88-80  
E-mail: pinv@bk.ru

***Полесский Сергей Николаевич***

кандидат технических наук, доцент,  
кафедра информационных технологий  
и автоматизированных систем,  
Московский институт электроники и математики  
Национального исследовательского университета  
«Высшая школа экономики»  
(109028, Россия, г. Москва,  
Б. Трехсвятительский пер., 3)  
8-926-563-70-04  
E-mail: spolessky@hse.ru

***Жаднов Валерий Владимирович***

кандидат технических наук, доцент,  
кафедра радиоэлектроники и телекоммуникаций,  
Московский институт электроники и математики  
Национального исследовательского университета  
«Высшая школа экономики»  
(101000, Россия, г. Москва, ул. Мясницкая, д. 20)  
(495) 916-88-80  
E-mail: vzhadnov@hse.ru

***Karapuzov Mikhail Aleksandrovich***

master,  
sub-department of information technologies  
and automated systems,  
Moscow institute of electronic and mathematic  
of National Research University  
«High School of Economics»  
(109028, 3 B. Trekhsvyatitel'skiy lane, Moscow, Russia)

***Polesskiy Sergey Nikolaevich***

candidate of technical sciences, associate professor,  
sub-department of information technologies  
and automated systems,  
Moscow institute of electronic and mathematic  
of National Research University  
«High School of Economics»  
(109028, 3 B. Trekhsvyatitel'skiy lane, Moscow, Russia)

***Zhadnov Valeriy Vladimirovich***

candidate of technical sciences, associate professor,  
sub-department of radio electronic  
and telecommunications,  
Moscow institute of electronic and mathematic  
of National Research University  
«High School of Economics»  
(101000, 20 Myasnitskaya street, Moscow, Russia)

**Аннотация.** Обосновывается необходимость учета показателей долговечности деталей СВЧ-устройств, в том числе механических частей. Обычно при оценке показателей надежности и, в частности, показателей долговечности радиоэлектронной аппаратуры учитывают только применяемую электронную компонентную базу, принимая все механические детали высоконадежными элементами, практически не влияющими на результирующее значение оцениваемого показателя. Но механические детали могут подвергаться разрушению, которое является наиболее опасным проявлением процессов старения, деформироваться или изменять свойства материала – его пластичность, электропроводимость, магнитные свойства и т.п. Таким образом, совершенно очевидной становится связь между электронной и механической частями устройства, причем, как описано выше, механический износ детали может привести к ухудшению ее электрических свойств. Отметим также, что взаимосвязь процессов отказа механических и электронных частей сложна. Отсюда возникает естественным образом необходимость, во-первых, корректной оценки показателей надежности механических деталей, и, во-вторых, выявление взаимосвязи отказов механической и электронной частей СВЧ-устройств. В статье будут намечены пути решения этих двух задач и представлены первые результаты анализа методов оценки показателей надежности механических деталей. Об актуальности этих задач свидетельствуют требования, предъявляемые заказчиком, к разрабатываемой аппаратуре, в состав которой входят СВЧ-устройства, – малая вероятность отказов и сбоев, большой срок эксплуатации, стойкость к ВВФ и простота обслуживания.

**Ключевые слова:** надежность, долговечность, СВЧ-устройства, внешние воздействующие факторы, ресурс.

**Abstract.** This article is about consideration must be given to durability's indexes of SHF devices including mechanical parts. Only electronic parts of SHF devices are considered at evaluating reliability of whole device and mechanical parts are supposed reliable very much, almost failure-free. But mechanical parts may be exposed to effects of deterioration and destruction processes, they are able to deform and change their material properties – flexibility, electroconductivity, magnet properties and etc. It shows interconnection of electronic and mechanical parts of SHF devices. Necessary to mention, that this interconnection is very difficult to describe. That's why it so important to be able to properly evaluate reliability both mechanical and electronic parts and their durability. Ways of solving these problems are initiated in this article and described analysis of methods for evaluating reliability of mechanical parts.

**Key words:** reliability, durability, SHF devices, outside factors, useful life.

## ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ НА ОСНОВЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОБЪЕМОВ ОПЫТНЫХ ПАРТИЙ ИЗДЕЛИЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

Б. Ф. Безродный, О. Ю. Шмелев, С. А. Майоров

Одним из важнейших параметров, присутствующим почти в каждом плане испытаний, является количество образцов техники  $n$ . От правильного определения  $n$  зависит достоверность и точность статистически определяемых показателей надежности (ПН). Директивное определение  $n$ , преобладающее в настоящее время, приводит в тому, что во многих случаях количество техники явно недостаточно для получения оценок ПН с заданной точностью и достоверностью.

Существующие методы определения объема выборки [1] основаны на априорном знании закона распределения наработки до отказа, который на практике не всегда бывает известен. Предложенный в [2] метод позволяет определить  $n$  через точечную оценку вероятности безотказной работы изделия на основе биномиального распределения числа отказов из выражения

$$\sum_{i=0}^{n(1-\hat{P})} \binom{n}{i} \hat{P}^{(1+\varepsilon_{\beta_1})(n-i)} \left[ 1 - \hat{P}^{(1+\varepsilon_{\beta_1})} \right]^i = 1 - \beta, \quad (1)$$

где  $\varepsilon_{\beta_1}$  – доверительный интервал или точность оценки  $\hat{P}$ ;  $\beta$  – доверительная вероятность.

Принципиальное затруднение состоит лишь в том, что величина  $\hat{P}$  в момент планирования испытаний неизвестна. Кроме того, непосредственное решение уравнения (1) очень громоздко и трудоемко, а специальные таблицы [3, 4], как правило, не охватывают с достаточной полнотой всех практически встречающихся случаев [2].

В настоящей работе эта задача решается через среднюю наработку на отказ  $T_{cp}$ , поскольку этот показатель наиболее важен для восстанавливаемых изделий и чаще всего присутствует в ТУ.

Выражение для определения точечной оценки средней наработки на отказ  $\hat{T}_{cp}$  выглядит следующим образом [5]:

$$\hat{T}_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n \bar{T}_i}{n},$$

где  $\bar{T}_i$  – средняя наработка на отказ  $i$ -го изделия;  $\bar{T}_i = \frac{\sum_{j=1}^{k_i} T_{ij}}{k_i}$ ;  $\bar{T}_{ij} = t_{j+1,i} - t_{ji}$  ( $j = \overline{1, k_i}$ ) – наработка между соседними отказами  $i$ -го изделия;  $t_{ij}$  – моменты отказов;  $k_i$  – количество отказов за время наблюдения  $T$   $i$ -го изделия. Найдем  $n$  через  $\hat{T}_{cp}$ .

Известно, что распределение случайной величины  $\hat{T}_{cp}$  согласно центральной предельной теореме [6] при неограниченном увеличении значения  $n$ , независимо от распределения случайной величины  $\bar{T}_i$ , асимптотически приближается к распределению Гаусса с математическим ожиданием  $T_{cp}$  и дисперсией  $D/n$ , где  $D$  – дисперсия величины  $\bar{T}_i$ , и при  $n > 10$  отличается от него уже столь незначительно, что этим различием на практике можно пренебречь [6]. Следовательно, вероятность того, что точечная оценка  $\hat{T}_{cp}$  будет отличаться от истинного значения  $T_{cp}$  меньше, чем

на величину  $\varepsilon_\beta$  (точность оценки  $\hat{T}_{\text{ср}}$ ). Выражение для  $P$  запишем через функцию Лапласа

$$\Phi\left(\frac{\varepsilon_\beta}{\sigma_{\hat{T}_{\text{ср}}} \sqrt{2}}\right) \quad [6]:$$

$$P\left(\hat{T}_{\text{ср}} - T_{\text{ср}} < \varepsilon_\beta\right) = \Phi\left(\frac{\varepsilon_\beta}{\sigma_{\hat{T}_{\text{ср}}} \sqrt{2}}\right) = \beta,$$

где  $\sigma_{\hat{T}_{\text{ср}}}$  – среднее квадратическое отклонение величины  $\hat{T}_{\text{ср}}$ ;  $\sigma_{\hat{T}_{\text{ср}}} = \sqrt{D/n}$ .

Тогда интервальную оценку параметра  $T_{\text{ср}}$  запишем в виде

$$\varepsilon_\beta = \sigma_{\hat{T}_{\text{ср}}} \sqrt{2} \Phi^{-1}(\beta) = \frac{1}{\sqrt{n}} \sigma \sqrt{2} \Phi^{-1}(\beta), \quad (2)$$

где  $\Phi^{-1}(\beta)$  – обратная функция Лапласа;  $\sigma = \sqrt{D}$ . Из выражения (2) получаем

$$n^{1/2} = \frac{1}{\varepsilon_\beta} \sigma \sqrt{2} \Phi^{-1}(\beta). \quad (3)$$

Однако в момент планирования испытаний (ПЭ) величины  $\sigma$  и  $\varepsilon_\beta$  неизвестны. В [7] предложено задавать  $\sigma$  и  $\varepsilon_\beta$  в независимых единицах как отклонение от математического ожидания (например,  $\sigma = 10, \varepsilon_\beta = 6$ ). Однако это неудобно, так как нет определенности в выборе конкретных значений этих величин.

Введем новую величину  $v = \varepsilon_\beta / \sigma$ , которая представляет собой относительную погрешность оценки величины  $T_{\text{ср}}$ . Тогда выражение (3) запишем в виде

$$n = \frac{1}{v^2} \left[ \sqrt{2} \Phi^{-1}(\beta) \right]^2. \quad (4)$$

Задавая значения величин  $\beta$  и  $v$ , можно определить объем выборки  $n$  из соотношения (4). На практике чаще всего выбирают  $\beta = 0,8 \dots 0,9$  [8]. При выборе величины  $v$  необходимо исходить из требований к точности, предъявляемых к интервальным оценкам, т.е. необходимо задать: какую часть ( $v$ ) от разброса случайной величины  $\bar{T}_i$  (от  $\sigma$ ) должен составлять доверительный интервал  $\varepsilon_\beta$ . Чем точнее надо иметь оценку  $\hat{T}_{\text{ср}}$  ( $\varepsilon_\beta \rightarrow 0$ ), тем меньше необходимо выбирать величину  $v$ .

На рис. 1 приведены зависимости  $n = f(v)$  для различных значений  $\beta$ , позволяющие проиллюстрировать количественные зависимости объемов подконтрольных выборок, требуемых для получения оценок ПН с относительной погрешностью, не превышающей величины  $v$  с априорно заданной достоверностью  $\beta$ .

Более высокие требования к достоверности ( $\beta \rightarrow 1$ ) и точности оценок, т.е. к величине относительной погрешности ( $v \rightarrow 0$ ), получаемой по экспериментальным данным, приводят к необходимости увеличения объема выборки. Следует отметить, что стремление уменьшить объем выборки, снизив тем самым затраты, наталкивается не только на возможное увеличение относительной погрешности  $v$  при фиксированной  $\beta$ , но и на некоторую область  $n < 10$ , не вызывающую особого доверия, поскольку в этом случае начинает существенно сказываться влияние априорно неизвестных законов распределения случайных величин  $\bar{T}_i$ , входящих в выражение для  $\hat{T}_{\text{ср}}$ . По-

этому представленным на рисунке кривым можно доверять на отрезке  $[0, v_0]$ , где  $10 = f(v_0)$ , т.е. существует некоторое предельное значение относительной погрешности  $v_0$ , при превышении которой сложно что-либо сказать о правильном определении объема выборки.

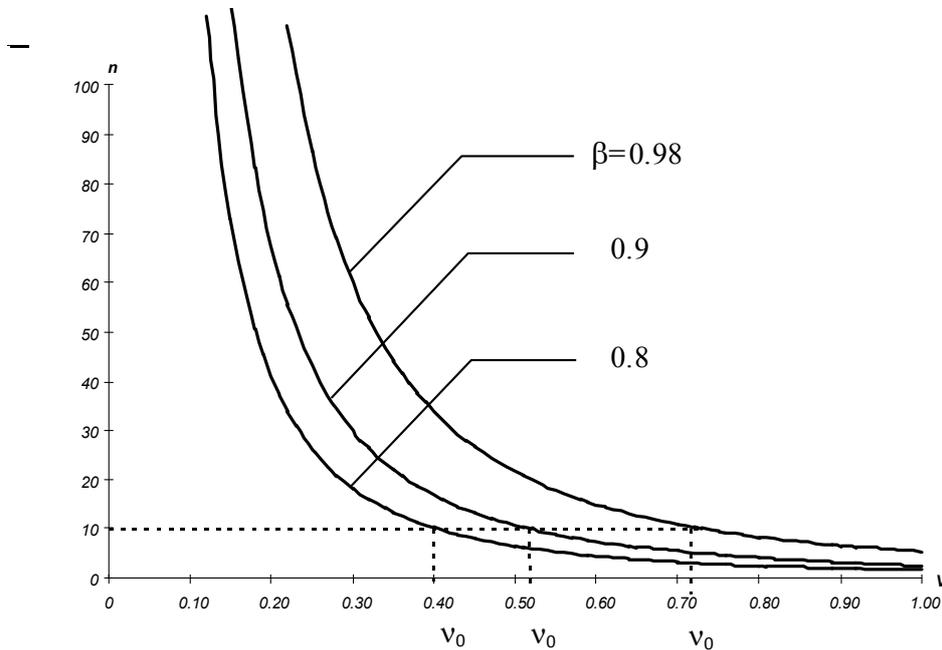


Рис. 1

Таким образом, выражение (4) на практике может быть применено в допустимой области  $v < v_0$  для расчета ПН с доверительной вероятностью  $\beta$  и относительной погрешностью  $v$ , но с различной абсолютной точностью (величиной интервальной оценки  $2\epsilon_\beta$  искомого ПН) из-за различных значений  $\sigma$ .

На основании изложенного получаем методику определения количества образцов электронного изделия для оценки его ПН по результатам опытной эксплуатации при неизвестном законе распределения наработки на отказ, сводящуюся к следующему:

- задается степень доверия (доверительная вероятность) к интервальной оценке параметра  $T_{cp}$ , которая будет определяться по экспериментальным данным –  $\beta$ ;
- выбирается величина относительной погрешности оценки (точность) параметра  $T_{cp}$  как некоторая доля разброса (среднего квадратического отклонения) случайной величины  $\bar{T}_i - v$ ;
- из выражения (4) определяется количество испытываемых образцов  $n$ .

Таким образом, предложенная методика позволяет определить  $n$  более простым, по сравнению с известными, методом через легко задаваемые в момент планирования опытной эксплуатации величины  $\beta$  и  $v$ , а также не зависит от конкретных законов распределения случайной величины  $\bar{T}_i$ . При этом из практических соображений рекомендуется ограничение  $n_{min} = 10$ .

Предложенная методика определения  $n$  эффективна для условий, когда возможна постановка в опытную эксплуатацию более 10 образцов изделия. Однако для мелкосерийного производства нередки случаи, когда такой возможности нет.

Известные методы математической статистики, применяемые для оценки  $n$  в этом случае, описанные в [6, 8, 9], основаны на том, что случайные величины, подвергающиеся наблюдениям, имеют априорно распределение Гаусса. Тогда  $n$  находится через  $t$ -распределение Стьюдента. Однако в большинстве случаев случайная величина  $\bar{T}_i$  распределена по экспоненциальному закону [10, 11]. Как определить  $n$  в этом случае? Ниже предложена методика расчета количества образцов исходя из заданных величин точности, достоверности оценок ПН и расчетного значения средней наработки на отказ, взятого из ТУ на изделия, при ограничении десятью образцами.

Известно [6, 10–13], что в этом случае на вид и параметры распределения оценки средней наработки на отказ

$$\hat{T}_{cp} = n^{-1} \sum_{i=1}^n \bar{T}_i$$

будет оказывать значительное влияние закон распределения случайной величины  $\bar{T}_i$ . Как было отмечено, на практике в большинстве случаев встречается экспоненциальное распределение  $\bar{T}_i$ .

Тогда оценка  $\hat{T}_{cp}$  будет иметь  $\gamma$ -распределение [6, 8, 10, 11] с плотностью вероятности

$$\varphi_n(\hat{T}_{cp}) = \left[ n^n / T_{cp}^n \Gamma(n) \right] \left[ \hat{T}_{cp}^{n-1} e^{-n(\hat{T}_{cp}/T_{cp})} \right],$$

где  $\Gamma(n)$  – стандартная гамма функция;  $T_{cp}$  – наработка на отказ.

Введя новую безразмерную относительную случайную величину

$$x = \hat{T}_{cp} / T_{cp},$$

можно записать зависимость доверительной вероятности  $\beta$  от доверительных границ  $T_1$  и  $T_2$  (точности оценки) и числа образцов  $n$  в виде

$$\beta = \gamma = P\left(T_1 < \hat{T}_{cp} < T_2\right) = \left[ n^n / \Gamma(n) \right] \int_{x_1}^{x_2} x^{n-1} e^{-nx} dx, \quad (5)$$

где  $x_1 = T_1 / T_{cp}$ ,  $x_2 = T_2 / T_{cp}$ .

Величины  $T_1$  и  $T_2$  необходимо задать исходя из требований к точности оценки. Величина  $T_{cp}$  априорно неизвестна. Однако в ТУ на изделия содержится ее расчетное значение  $T_{cp}^p$ , полученное исходя из предположения экспоненциального распределения наработки на отказ через справочные значения интенсивностей отказов  $\lambda$  комплектующих элементов. Тогда запишем

$$x_1 = T_1 / T_{cp}^p, x_2 = T_2 / T_{cp}^p. \quad (6)$$

Интеграл (5) табулирован в [14]. Для различных значений  $\beta$  составлена таблица зависимости объема выборки  $n$  от  $x_1$  и  $x_2$ , с помощью которой для заданных значений  $T_1$  и  $T_2$  отыскивается минимальное  $n$  такое, что  $\gamma \leq \beta$ . Следовательно, задавая относительные значения границ доверительного интервала  $(T_1, T_2)$  и величину доверительной вероятности  $\beta = \gamma$  из выражения (5) с помощью указанной таблицы определяется значение  $n$  (табл. 1).

Таблица 1

n	$\beta$							
	$X_1$				$X_2$			
	0,99	0,95	0,9	0,8	0,01	0,05	0,1	0,2
1	0,01	0,05	0,105	0,223	4,6	3,0	2,3	1,61
2	0,075	0,077	0,265	0,412	3,325	2,37	1,95	1,5
3	0,145	0,272	0,361	0,512	2,8	2,07	1,8	1,433
4	0,206	0,341	0,436	0,574	2,512	1,94	1,675	1,375
5	0,256	0,394	0,486	0,618	2,32	1,83	1,6	1,34
6	0,3	0,434	0,525	0,65	2,15	1,75	1,542	1,317
7	0,336	0,47	0,557	0,679	2,078	1,69	1,507	1,3
8	0,362	0,5	0,581	0,7	2,0	1,84	1,469	1,281
9	0,389	0,52	0,805	0,717	1,933	1,6	1,444	1,266
10	0,419	0,545	0,62	0,73	1,88	1,57	1,42	1,25

Другими словами, предлагается следующая методика определения требуемого объема подконтрольной выборки  $n$  в предположении экспоненциального распределения случайной величины  $\bar{T}_i$ :

- задается значение доверительной вероятности  $\beta$ ;
- выбираются доверительные границы оценки средней наработки на отказ  $T_1$  и  $T_2$  исходя из требований к точности оценки параметра  $T_{cp}$ ;
- вычисляются значения коэффициентов точности  $x_1$  и  $x_2$  из выражений (6) относительно величины  $T_{cp}^p$ , взятой из ТУ на изделие;
- определяется количество образцов  $n$  по таблице или из выражения (5);
- проводится корректировка данных.

Если  $n$  получилось больше 10, то можно увеличить значения коэффициентов точности  $x_1$  и  $x_2$ , т.е. расширить интервал  $(T_1, T_2)$ . При этом, естественно, происходит снижение точности.

Таким образом, разработанная методика дает возможность определить количество образцов изделия электроники  $n$  для проведения опытной эксплуатации до ее начала с использованием расчетного значения наработки на отказ  $T_{cp}^p$ , взятого из ТУ на изделие, для экспоненциального распределения  $\bar{T}_i$ . Используя настоящую методику при составлении плана испытаний, исследователь имеет возможность представить реальные значения интервальной оценки требуемого ПН исходя из требований к точности, достоверности, оперативности получения оценок, а также из экономических соображений обосновать количество образцов техники и длительность испытаний.

### Список литературы

1. ГОСТ 27.503-81 Надежность в технике. Система сбора и обработки информации. Методы оценки показателей надежности.
2. Заренин, Ю. Г. Определительные испытания на надежность / Ю. Г. Заренин, И. И. Стоянова. – М. : Изд-во стандартов, 1978. – 364 с.
3. Рябинин, И. А. Основы теории и расчета надежности судовых электроэнергетических систем / И. А. Рябинин. – Л. : Судостроение, 1967. – 184 с.
4. Шторм, Р. Теория вероятностей. Математическая статистика. Статистический контроль качества / Р. Шторм. – М. : Мир, 1970. – 215 с.
5. Половко, А. М. Основы теории надежности / А. М. Половко. – М. : Наука, 1964. – 346 с.
6. Вентцель, Е. С. Теория вероятностей / Е. С. Вентцель. – М. : Наука, 1969. – 212 с.
7. Джонсон, Н. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке. Методы обработки данных : пер. с англ. / Н. Джонсон, Ф. Лион ; под ред. Э. К. Лецкого. – М. : Мир, 1980. – 386 с.
8. Барлоу, Р. Математическая теория надежности : пер. с англ. / Р. Барлоу, Ф. Прошан ; под ред. Б. В. Гнеденко. – М. : Сов. радио, 1969. – 264 с.
9. Кендал М. Статистические выводы и связь : пер. с англ. / М. Кендал, А. Стьюарт. – М. : Наука, 1973.
10. Надежность технических систем : справочник / Ю. К. Беляев и др. ; под ред. И. А. Ушакова. – М. : Радио и связь, 1985. – 524 с.
11. 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. 75–79.
12. Юрков, Н. К. Концепция синтеза сложных наукоемких изделий / Н. К. Юрков // Надежность и качество : тр. Междунар. симп. : в 2 т. / под ред. Н. К. Юркова. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2012. – Т. 1. – С. 3–5.
13. Затылкин, А. В. Исследование влияния деформационной составляющей внешнего вибрационного воздействия на надежность радиоэлектронных средств / А. В. Затылкин, Д. А. Голушко, Д. А. Рындин // Надежность и качество : тр. Междунар. симп. : в 2 т. / под ред. Н. К. Юркова. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2013. – Т. 2. – С. 42–43.
14. Репкин, В. Ф. Основы надежности и эксплуатации радиоэлектронных систем / В. Ф. Репкин, А. С. Персиков, В. Ю. Лернер. – Киев : КВИРТУ ПВО, 1976. – 314 с.

УДК 621.3.049.77

Безродный, Б. Ф.

Оценка показателей надежности на основе определения объемов опытных партий изделий электроники / Б. Ф. Безродный, О. Ю. Шмелев, С. А. Майоров // Надежность и качество сложных систем. – 2014. – № 2(6). – С. 21–26.

**Безродный Борис Федорович**

доктор технических наук, профессор,  
главный инженер,  
Проектно-конструкторско-технологическое бюро  
железнодорожной автоматики и телемеханики  
(105082, Россия, г. Москва,  
Переведеновский пер., 21/9)  
(849-9)260-01-19  
E-mail: boris.bezrodny@yandex.ru

**Шмелев Олег Юрьевич**

кандидат технических наук,  
старший научный сотрудник (пенсионер)

**Майоров Сергей Алексеевич**

научный сотрудник,  
Межрегиональное общественное учреждение  
«Институт инженерной физики»  
(142210, Россия, Московская обл., г. Серпухов,  
Б. Ударный пер., 1 «А»)  
8(4967)35-31-93  
E-mail: info@iifrf.ru

**Аннотация.** Предложена методика определения количества образцов электронных устройств, необходимого для проведения испытаний и опытной эксплуатации с целью получения оценок показателей надежности по экспериментальным данным с заданной точностью и достоверностью.

**Ключевые слова:** электронное устройство, опытная эксплуатация, оценка показателей надежности.

**Bezrodnyy Boris Fedorovich**

doctor of technical sciences, professor,  
chief engineer,  
Design-technological bureau of railway automation  
and remote control  
(105082, 21/9 Perevedenskiy lane, Moscow, Russia)

**Shmelev Oleg Yur'evich**

candidate of technical sciences,  
senior staff scientist

**Mayorov Sergey Alekseevich**

research associate,  
Inter-regional public institution  
«Institute of engineering physics»  
(142210, 1»A» B. Udarniy lane, Moscow region,  
Serpukhov city, Russia)

**Abstract.** The technique of determining the number of samples devices for testing and trial poeration in order to obtain estimates of the reliability of the experimental data with a given precision and certainty.

**Key words:** electronic device, operation testing, estimation of parameters of reliability.

# ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

УДК 004.056.55

## БИОИНСПИРИРОВАННЫЕ АЛГОРИТМЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ КРИПТОАНАЛИЗА\*

Ю. О. Чернышев, А. С. Сергеев, Е. О. Дубров

**Введение.** В настоящее время при разработке компьютерных технологий, обеспечивающих информационную безопасность и защиту информации, широкое применение находят криптографические методы защиты. Для решения этой задачи, относящейся к классу NP-полных, в последние годы применяются алгоритмы, основанные на природных системах. К ним относятся методы моделирования отжига, генетические алгоритмы (ГА), эволюционные методы, алгоритмы роевого интеллекта и т.д. [1–3].

В моделях и алгоритмах эволюционных вычислений ключевым элементом является построение начальной модели и правил, по которым она может изменяться (эволюционировать). В течение последних лет были предложены разнообразные схемы эволюционных вычислений, в том числе генетический алгоритм, генетическое программирование, эволюционные стратегии, эволюционное программирование.

**Реализация криптоанализа симметричных алгоритмов шифрования.** Ранее в [1, 4] рассматривалась задача криптоанализа и приведены результаты криптоанализа классических криптографических алгоритмов с использованием методов эволюционной оптимизации и генетического поиска для симметричных шифров перестановок. Различают следующие шифры перестановок: простые шифрующие таблицы; шифрующие таблицы с одиночной перестановкой по ключу; шифрующие таблицы с двойной перестановкой по ключу; магические квадраты. Отметим, что методы шифрования с помощью простых шифрующих таблиц, с помощью одиночной перестановки по ключу, двойной перестановки описаны, например, в [1].

При использовании шифрующих таблиц ключом является перестановка  $(p_1, p_2, \dots, p_n)$ , поэтому хромосома в ГА должна также задавать перестановку. Основной вопрос при этом – как осуществить представление отдельных генов особи. В простейшем случае шифрование осуществляется путем присвоения отдельным генам соответствующих элементов ключа, т.е.  $i$ -м геном хромосомы  $P$  считать элемент  $p_i$ . Несмотря на недостатки такого подхода, отмеченные в [5], (например, гены получаются зависимыми друг от друга, что приводит к возможности получения нелегальных решений), такое определение генов интуитивно понятно и не требует дополнительных затрат на их формирование (вычисление).

Альтернативным подходом, отмеченным в [1, 5], является использование некоторого промежуточного представления, при котором набор генов задает некоторое правило или объект, из

\* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 14-01-00634 и № 12-01-00474).

которого формируется ключ. При этом основной задачей является нахождение промежуточного решения, задаваемого в виде битовой строки для применения стандартных генетических операторов. Отметим, что при реализации ГА криптоанализа использовался первый подход, т.е. в качестве генов особи рассматриваются элементы ключа. Для предотвращения получения нелегальных решений при десятичном кодировании хромосом используется правило: при появлении в хромосоме одинаковых генов второй повторяющийся ген заменяется на отсутствующий. В качестве функции приспособленности особей использовался факт совпадения открытого текста и шифр-текста при реализации криптоанализа 2-го типа для определения секретного ключа. В [5, 7] в качестве целевой функции предлагается использовать функцию Якобсена о распределении частот биграмм в открытых текстах. Отметим, что результаты эксперимента при реализации криптоанализа 2-го типа при бинарном и десятичном кодировании хромосом методов одиночной и двойной перестановки по ключу, а также простой перестановки, в котором ключом служит размер таблицы, приведены в [1, 3]. Результаты эксперимента свидетельствуют о возможности применения эволюционных методов для криптоанализа шифров, использующих шифрующие таблицы для столбцовых и строчных перестановок.

Наряду с использованием шифрующих таблиц широкое распространение для шифрования получили шифры маршрутной перестановки. В [1, 6] рассматриваются методы шифрования перестановками, использующие магические квадраты. Приводится ГА их построения и результаты эксперимента, которые свидетельствуют о возможности применения ГА для решения задач криптоанализа данных шифров перестановки при разработке систем обеспечения информационной безопасности и защиты информации. Отмечается, что существенным отличительным моментом является наличие случайного поиска, позволяющего получать новые результаты при каждой реализации ГА.

В [1, 6, 8] рассматривается применение данных подходов для реализации шифров простой и многоалфавитной замены. Сущность методов простой замены сводится к замене символов шифруемого текста символами того же или другого алфавита с заранее установленным правилом замены. В [1, 6, 8] рассматривается реализация криптоанализа шифров одноалфавитной замены на примере аффинного шифра Цезаря и системы Цезаря с ключевым словом при известной и неизвестной длине ключа, шифров блочной замены на примере шифра Плейфейра и шифра «двойной квадрат» Уитстона при известной и неизвестной длине кодового слова, а также шифра многоалфавитной замены на примере шифра Вижинера. В [1, 6, 8] приводятся описание ГА для реализации криптоанализа данных методов шифрования, результаты эксперимента, свидетельствующие об области применимости данных методов криптоанализа.

Однако, как отмечено в ряде работ, например в [9], структуры генетических алгоритмов являются «слепыми» поисковыми структурами с присущим им рядом недостатков. Поэтому представляет интерес применение эвристических методов, идеи которых заимствованы у живой природы или физических процессов, в которых решение задачи строится поэтапно путем добавления нового компонента к частично построенному решению. К методам данного вида относят и муравьиные алгоритмы. Отметим, что муравьиные алгоритмы исследуются с середины 90-х гг. и на сегодняшний день известны их применения к задаче о коммивояжере, квадратичной задаче о назначениях, задаче о раскраске графа, задаче маршрутизации в коммутационных сетях. Отметим, что в [9] приводится описание алгоритма «муравьиных колоний» для реализации криптоанализа шифров перестановки, и показано, как эта проблема может быть сведена к классической задаче о назначениях, решаемой с помощью алгоритма муравьиных колоний. Важно отметить, что отличительной особенностью применения алгоритмов «муравьиных колоний» является необходимость представления задачи в виде графовой модели, на которой муравьи могут строить решения.

Одной из последних разработок в области роевого интеллекта является алгоритм пчел, который довольно успешно используется для нахождения экстремумов сложных многомерных функций. Алгоритм криптоанализа шифров перестановок на основе пчелиного алгоритма рассматривается в [10]. Структура его включает следующие основные этапы:

- 1) формирование пространства поиска;
- 2) оценка целевой функции (ЦФ) пчел в популяции;
- 3) поиск агентами-разведчиками перспективных позиций для поиска в их окрестности;
- 4) выбор пчел с лучшими значениями ЦФ с каждого участка;
- 5) отправка пчел-фуражиров для случайного поиска и оценка их ЦФ;

- 6) формирование новой популяции пчел;
- 7) если условия окончания работы алгоритма выполняются, переход к 8, иначе к 2;
- 8) конец.

В [10] предлагается реализация основных этапов пчелиного алгоритма, а также приводится демонстрационный пример реализации алгоритма криптоанализа.

**Криптоанализ асимметричных алгоритмов шифрования.** Наряду с классическими симметричными алгоритмами шифрования сравнительно молодой областью является асимметричная криптография, которая включает криптосистемы с открытым ключом (для шифрования данных используется один ключ (открытый), а для расшифрования – другой (секретный)). Представителем ее является алгоритм RSA, криптостойкость которого определяется трудоемкостью факторизации больших чисел. Для проведения криптоанализа и определения секретного ключа необходимо разложение модуля  $N$  на простые множители  $P$  и  $Q$  (определение функции Эйлера  $f(N) = (P-1) \cdot (Q-1)$ ), а также определение секретного ключа  $K_{сек}$  из уравнения  $K_{откр} \cdot K_{сек} = 1 \bmod f(N)$ , где  $K_{откр}$  – известный открытый ключ (число, взаимно простое с числом  $f(N)$ ),  $K_{сек}$  – секретный ключ, подлежащий определению. Отметим, что ГА для решения задачи определения вариантов разложения заданного числа  $N$  на множители (нахождения делителей большого целого числа  $N$ ) описан в [11], где рассматривается процедура инициализации создания элемента популяции, применение основных генетических операций. Отметим, что ГА разложения заданного числа на множители рассмотрен в [12], экспериментальные результаты, представлены в табл. 1, 2.

Таблица 1

Экспериментальные результаты применения генетического алгоритма для факторизации числа

Длина ключа	Размер начальной популяции (в парах)	Количество итераций
32	2 000	134 664
	3 000	122 537
	8 000	99 571
48	8 000	3 400 274
	10 000	3 259 667
	20 000	2 564 448
64	20 000	84 092 423
	24 000	79 549 001
	48 000	81 663 284

Таблица 2

Экспериментальные результаты применения генетического алгоритма для нахождения простого делителя числа

Длина ключа	Размер начальной популяции (в парах)	Количество итераций
32	2 000	84 315
	3 000	80 448
	8 000	77 304
48	8 000	247 558
	10 000	210 589
	20 000	209 557
64	20 000	1 014 899
	24 000	1 144 346
	48 000	987 467

Алгоритм разложения числа на два взаимно простых сомножителя сформулируем в следующем виде:

- 1) задается число в десятичной форме;
- 2) задается популяция хромосом  $10000 \times 2$ , где первая часть соответствует первому сомножителю, вторая часть – второму (в двоичной форме);

3) выполняются генетические операции (кроссинговер, мутация, инверсия, элитная селекция). Применялся 4-х точечный кроссинговер между хромосомами, принадлежащими одной части (норма мутации 5 %, норма инверсии 10 %, количество потомков варьировалось в пределах 40–60 %);

4) подсчитывается целевая функция путем умножения соответствующих хромосом в двоичной форме с идентичными номерами из каждой части;

5) конец.

При криптоанализе асимметричных алгоритмов шифрования актуальной также является задача нахождения простого делителя заданного числа. Для проверки, является ли число простым, использовался тест Миллера–Рабина. Алгоритм нахождения простого делителя числа сформулируем следующим образом:

1) задается число в десятичной форме (32, 48 или 64 бита), переводится в двоичную форму;

2) случайным образом генерируется начальная популяция двоичных хромосом;

3) вычисляется целевая функция путем деления заданного числа на хромосому (деление производится в десятичной форме). В качестве целевой функции принимается остаток от деления;

4) в случае, если после деления получено целое число, переход к 6, иначе к 5;

5) выполняются генетические операции: 4-точечный кроссинговер случайно сформированных пар родителей, инверсия (норма – 10 %), мутация (норма – 5 %). Выполняется селекция для перехода к следующей генерации;

6) по алгоритму Миллера–Рабина проверяется, является ли число с высокой степенью вероятностью простым; если нет, то осуществляется переход к выполнению генетических операций (пункт 5);

7) конец.

Таким образом, представленные результаты свидетельствуют о возможности применения генетических алгоритмов для решения основных теоретико-числовых задач криптографии: факторизации числа и нахождения простого делителя числа.

Следует заметить, что в плане ликвидации отмеченных выше недостатков ГА актуальной является задача разработки биоинспирированных алгоритмов криптоанализа данных методов шифрования, ликвидирующих отмеченные выше недостатки ГА. В то же время основной проблемой при реализации ГА, описанного в [11], является проблема нахождения экстремума немонойтонной функции, т.е. функции, значение  $f(x)$  которой в каждой точке  $x$  является, по сути, случайной величиной и не дает информации о приближении к глобальному экстремуму. В этом плане отметим работы [3, 13], в которых приводится описание применения биоинспирированных методов для решения задачи криптоанализа асимметричных алгоритмов шифрования на основе факторизации составных чисел. Представлены алгоритмы муравьиных и пчелиных колоний для разложения составных чисел на множители путем определения делителя числа с заданной точностью в заданном интервале. Показано, как эта проблема может быть сведена к классической задаче нахождения кратчайшего пути в графе, решаемой с помощью алгоритма муравьиных колоний. Приводится алгоритм решения, а также пример работы муравьиного и пчелиного алгоритма. Экспериментальные результаты факторизации чисел с использованием алгоритма муравьиных колоний приведены в табл. 3. В данной таблице показаны начальные параметры, собственно само число, количество итераций, необходимых для получения сомножителей, и эти сомножители. Здесь  $[x, y]$  – координаты отрезка;  $M$  – количество муравьев;  $m$  – число вершин в маршруте;  $Q$  – параметр порядка длины оптимального пути.

Таблица 3

Экспериментальные результаты применения муравьиного алгоритма для факторизации числа

Число для разложения ( $N$ )	Полученные сомножители	Начальные параметры	Количество итераций
15 238 657	7 · 7 · 353 · 881	[5,2000], $M = 4, m = 4, Q = 4$	568
		[5,1000], $M = 5, m = 5, Q = 4$	550
		[5,1000], $M = 6, m = 6, Q = 4$	543
16 123 897	23 · 37 · 18947	[5,30000], $M = 4, m = 4, Q = 4$	611
		[5,20000], $M = 5, m = 5, Q = 4$	638
		[5,20000], $M = 6, m = 6, Q = 4$	599

Оба числа являются 24-битными. Простота числа проверялась с помощью алгоритма Миллера–Рабина.

При реализации пчелиного алгоритма проводилось разложение 32-битного числа. Результаты эксперимента представлены в табл. 4. Простота чисел также была проверена с помощью теста Миллера–Рабина.

Таблица 4

Экспериментальные результаты применения пчелиного алгоритма для факторизации числа.

Число для разложения ( $N$ )	Интервалы для проведения поиска	Полученные сомножители
4 154 963 851	[1, 250000], [250001, 500000], [500001, 750000], [750001, 1000000], [1000001, 1250000], [1250001, 1500000], [1500001, 1750000], [1750001, 2000000]	3943, 1053757

Отметим также, что в [1] описаны отличительные особенности методов шифрования, для которых доказана абсолютная криптографическая стойкость (например, метод Вернама и шифр гаммирования). Рассмотрены также методы генерации псевдослучайных чисел (метод фон Неймана, линейный конгруэнтный метод, методы золотого сечения и Фибоначчи). Отмечается также, что метод шифрования однократной случайной гаммой является, с одной стороны, нераскрываемым, но, с другой стороны, практическое использование данного метода сопряжено с рядом недостатков, связанных с необходимостью иметь огромные объемы данных, которые можно было бы использовать в качестве гаммы и их передачи по секретному каналу. Отмечается возможность атак на данные шифры, основанных в большинстве своем либо на факте значительного отклонения статистических характеристик гаммы от действительно случайного потока или на повторном использовании некоторых частей гаммы в процессе шифрования, а также на фальсификации шифров гаммирования в каналах с возможностью модификации (инвертирование бита в передаваемой последовательности приводит к инвертированию бита в декодированном тексте).

В заключение отметим некоторые новые оригинальные методы, используемые для криптоанализа и описанные в научных публикациях и в сети Интернет за последнее время. В этом плане можно отметить работы [5, 7, 14], посвященные применению ГА для криптоанализа шифров перестановок, шифров многоалфавитной замены, а также оригинального метода, опубликованного в [15] и отличающегося, по мнению авторов, «бесконечным» периодом гаммирования [16]. Следует заметить, что в данных публикациях наряду с описанием алгоритмов криптоанализа (способов кодирования решения, описания используемых генетических операций и демонстрационных примеров) приведены экспериментальные результаты криптоанализа, подтверждающие достоверность представленных подходов решения задачи криптоанализа.

Отметим также, что в ряде работ (в том числе в [5, 7, 14]) приводится описание нового подхода к решению задачи определения целевой функции приспособленности особей при решении задачи криптоанализа. В качестве фитнес-функции предлагается использовать функцию Якобсона  $F(k)$  о распределении частот биграмм в открытых текстах. Эта функция в общем случае вычисляется как:  $F(k) = \sum_{ij} |D_{ij}^k - E_{ij}|$ , где  $D_{ij}^k$  – частота встречаемости биграммы  $a_i a_j$  в тексте, полу-

ченном при расшифровании с помощью ключа  $k$ ,  $E_{ij}$  – среднестатистическая частота встречаемости этой биграммы. Среднестатистические частоты встречаемости биграмм являются заранее известными, и, как показывают приведенные в [5, 7, 14] примеры, применение целевой функции данного типа при криптоанализе дает результаты, достаточно близкие к оптимальным.

**Заключение.** Таким образом, в данной статье был проведен обзор авторских работ, посвященных решению задачи криптоанализа классических и асимметричных алгоритмов шифрования на основе новых технологий искусственного интеллекта – биоинспирированных методов, имитирующих процессы эволюции живой природы. Описаны основные отличительные особенности применения данных методов, приведены экспериментальные результаты, свидетельствующие о возможности применения данных методов для решения задач криптоанализа.

**Список литературы**

1. Криптографические методы и генетические алгоритмы решения задач криптоанализа : моногр. / Ю. О. Чернышев, А. С. Сергеев, Е. О. Дубров, А. В. Крупенин, О. П. Третьяков. – Краснодар : ФВАС, 2013. – 138 с.
2. Батаева, И. П. Защита информации и информационная безопасность / И. П. Батаева // Надежность и качество : тр. Междунар. симп. : в 2 т. / под ред. Н. К. Юркова. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2012. – Т. 1. – С. 116–118.
3. Зияутдинов, В. С. Эволюционные методы в решении задачи планирования расписаний / В. С. Зияутдинов, Н. В. Слепцов, Ю. А. Романенко // Надежность и качество : тр. Междунар. симп. : в 2 т. / под ред. Н. К. Юркова. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2012. – Т. 1. – С. 235–236.
4. Чернышев, Ю. О. Применение биоинспирированных методов оптимизации для реализации криптоанализа классических симметричных и асимметричных криптосистем / Ю. О. Чернышев, А. С. Сергеев, Е. О. Дубров // Системный анализ в проектировании и управлении : сб. науч. тр. 16-й Междунар. науч.-практ. конф. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – С. 112–122.
5. Городилов, А. Ю. Криптоанализ перестановочного шифра с помощью генетического алгоритма / А. Ю. Городилов // Вестник Пермского университета. Серия «Математика, механика, информатика». – 2007. – № 7. – С. 44–49.
6. Разработка методов криптоанализа шифров перестановок и замены в системах защиты информации на основе эволюционно-оптимизационных методов / Е. О. Дубров, А. Н. Рязанов, А. С. Сергеев, Ю. О. Чернышев // Радиоэлектронные устройства и системы для инфокоммуникационных технологий : материалы науч. конф., посвящ. Дню радио. – М., 2013. – С. 220–224.
7. Морозенко, В. В. Генетический алгоритм для криптоанализа шифра Вижинера / В. В. Морозенко, Г. О. Елисеев // Вестник пермского университета. Серия «Математика, механика, информатика». – 2010. – № 1. – С. 75–80.
8. Применение эволюционных методов оптимизации для реализации криптоанализа классических шифров замены / Ю. О. Чернышев, А. С. Сергеев, Е. О. Дубров, А. Н. Рязанов // Информатика: проблемы, методология, технологии : материалы XIII Междунар. науч.-метод. конф. ВГУ. – Воронеж : Изд. дом ВГУ, 2013. – С. 415–418.
9. Фатхи, В. А. Исследование возможности применения алгоритма муравьиных колоний для реализации криптоанализа шифров перестановок / В. А. Фатхи, А. С. Сергеев // Вестник ДГТУ. – 2011. – Т. 11, № 1 (52). – С. 10–20.
10. Исследование возможности применения бионических методов пчелиных колоний для реализации криптоанализа классических шифров перестановок / Ю. О. Чернышев, А. С. Сергеев, Е. О. Дубров, А. Н. Рязанов // Вестник ДГТУ. – 2014. – Т. 14, № 1 (76). – С. 62–75.
11. Сергеев, А. С. О возможности применения методов генетического поиска для реализации криптоанализа асимметричного алгоритма шифрования данных RSA / А. С. Сергеев // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2008. – № 3. – С. 48–52.
12. Чернышев, Ю. О. Применение биоинспирированных алгоритмов оптимизации для реализации криптоанализа классических и асимметричных криптосистем / Ю. О. Чернышев, А. С. Сергеев, Е. О. Дубров // Информатика: проблемы, методология, технологии : материалы XIV Междунар. науч.-метод. конф. ВГУ. – Воронеж : Изд. дом ВГУ, 2014. – С. 206–210.
13. Биоинспирированные методы криптоанализа асимметричных алгоритмов шифрования на основе факторизации составных чисел / А. С. Сергеев, О. П. Третьяков, А. Е. Васильев, Ю. О. Чернышев // Вестник ДГТУ. – 2011. – Т. 11, № 9 (60). – С. 1544–1554.
14. Городилов, А. Ю. Криптоанализ тригонометрического шифра с помощью генетического алгоритма / А. Ю. Городилов, А. А. Митраков // Вестник Пермского университета. Серия «Математика, механика, информатика». – 2011. – № 4. – С. 75–82.
15. Сизов, В. П. Пример попытки разработки криптоалгоритма / В. П. Сизов // Новый алгоритм шифрования. – URL: <http://mp.fizteh.urfu.ru>.
16. Грущанский, В. А. О формализации показателей эффективности и безопасности комплексных программ в условиях неопределенности и риска / В. А. Грущанский, Н. К. Юрков // Надежность и качество сложных систем. – 2013. – № 2. – С. 3–9.

**УДК 004.056.55****Чернышев, Ю. О.****Биоинспирированные алгоритмы решения задач криптоанализа / Ю. О. Чернышев, А. С. Сергеев, Е. О. Дубров // Надежность и качество сложных систем. – 2014. – № 2(6). – С. 27–33.**

**Чернышев Юрий Олегович**

доктор технических наук, профессор,  
заслуженный деятель науки РФ,  
кафедра автоматизации производственных процессов,  
Донской государственной технической университет  
(344000, Россия, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1)  
79185991645  
E-mail: myvnn@list.ru

**Сергеев Александр Сергеевич**

кандидат технических наук, доцент, докторант,  
Донской государственной технической университет  
(344000, Россия, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1)  
79287585719  
E-mail: Sergeev00765@mail.ru

**Дубров Евгений Олегович**

аспирант,  
кафедра автоматизации производственных процессов,  
Донской государственной технической университет  
(344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1)  
79185063103  
E-mail: dubrov@spark-mail.ru

**Аннотация.** Рассматривается задача криптоанализа на основе новых моделей искусственного интеллекта – биоинспирированных методов. Приводится обзор авторских работ, посвященных решению задачи криптоанализа классических криптографических методов, в том числе методов криптоанализа симметричных шифров перестановок, классических и блочных шифров замены, приводятся методика представления особи, предотвращения нелегальных решений, а также описание функции приспособленности (функция Якобсена). Также исследуются «алгоритм муравья» и алгоритм «колонии пчел» для реализации криптоанализа перестановочных шифров, а также для реализации криптоанализа асимметричных алгоритмов шифрования на основе решения теоретико-числовых задач криптографии наряду с экспериментальными результатами. Полученные экспериментальные результаты свидетельствуют о возможности применения биоинспирированных методов для реализации криптоанализа.

**Ключевые слова:** криптоанализ, биоинспирированные методы, генетический алгоритм, муравьиные алгоритмы, пчелиные алгоритмы, шифры перестановок, шифры замены.

**Chernyshov Yuriy Olegovich**

doctor of technical sciences, professor,  
honoured science worker of RF,  
sub-department of manufacturing processes automation,  
Don state technical university  
(344000, 1 Gagarin square, Rostov-on-Don, Russia)

**Sergeev Aleksandr Sergeevich**

candidate of technical sciences, associate professor,  
Don state technical university  
(344000, 1 Gagarin square, Rostov-on-Don, Russia)

**Dubrov Evgeniy Olegovich**

postgraduate student,  
sub-department of manufacturing processes automation,  
Don state technical university,  
(344000, 1 Gagarin square, Rostov-on-Don, Russia)

**Abstract.** The problem is considered of cryptanalysis based on new models of artificial intelligence – bioinspired methods. The review of the handiworks devoted to the solution of a problem of cryptanalysis of classical cryptographic methods, including methods of cryptanalysis of symmetric codes of shifts, classical and block codes of replacement is provided, the technique of representation of an individual, prevention of illegal decisions, and also the description of function of fitness (Jacobsen's function) are given. Also «the algorithm of an ant» and algorithm of «a colony of bees» for realization of cryptanalysis of permutable codes, and also for realization of cryptanalysis of asymmetric algorithms of enciphering on the basis of the solution of number-theoretic problems of cryptography along with experimental results are investigated. The received experimental results testify to possibility of application of the bioinspired methods for cryptanalysis realization.

**Key words:** the cryptanalysis, the bioinspired methods, genetic algorithm, ant algorithms, bee algorithms, codes of shifts, replacement codes.

## К ПРОБЛЕМЕ ОЦЕНКИ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ОБЪЕКТОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ АВТОМАТИКИ И ТЕЛЕМЕХАНИКИ

Б. Ф. Безродный, А. В. Орлов, А. С. Голубев, Д. Н. Болотский

Фактическую интенсивность отказов технических средств СЦБ следует рассматривать как случайную величину. Мгновенные значения фактической интенсивности отказов технических средств железнодорожной автоматики и телемеханики (ЖАТ) на рассматриваемом объекте (пероне или станции) определяют по формуле

$$\lambda_i = \frac{n^2}{m \cdot \sum_{i=1}^n T_i^o \cdot \sum_{i=1}^n \frac{1}{T_i^o}} \cdot \frac{1}{T_i^o}, \quad (1)$$

где  $n$  – количество отказов за период наблюдения;  $m$  – количество технических средств ЖАТ на объекте;  $T_i^o$  – наработка на  $i$ -й отказ.

Далее вычисляют среднее значение интенсивности отказов

$$\tilde{\lambda} = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i}{n}, \quad (2)$$

квадратическое отклонение фактической интенсивности отказов

$$\sigma_\lambda = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\lambda_i - \tilde{\lambda})^2}{n-1}}, \quad (3)$$

а затем определяют интервальную оценку параметра  $\tilde{\lambda}$ . При этом ширина доверительного интервала определяется доверительной вероятностью, с которой оцениваемая случайная величина фактической интенсивности отказов технических средств ЖАТ не выйдет за установленные доверительным интервалом границы.

При оценке доверительного интервала на практике достаточно задаться значением доверительной вероятности на уровне  $P_{\text{дов}} = 0,95$ . Интервальная оценка фактической интенсивности отказов технических средств ЖАТ при этом имеет вид

$$\tilde{\lambda} - 2 \cdot \sigma_\lambda \leq \tilde{\lambda} \leq \tilde{\lambda} + 2 \cdot \sigma_\lambda. \quad (4)$$

При оценке остаточного ресурса технических средств ЖАТ следует сопоставить фактическое значение интенсивности их отказов с допустимым, а также определить интервал времени от окончания интервала наблюдения до достижения фактической интенсивностью отказов допустимого значения. Этот интервал и является остаточным ресурсом. Интервал времени определяется как разницей между допустимым и фактическим уровнем интенсивности отказов технических средств ЖАТ на конкретном объекте, так и тенденцией в изменении их фактической интенсивности отказов.

Для оценки тренда фактической интенсивности отказов технических средств ЖАТ построим описывающую зависимость ее от времени линейную модель парной регрессии. Коэффициенты линейной модели рассчитываются по формулам:

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n (t_i \cdot \lambda_i) \cdot n - \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot \sum_{i=1}^n t_i}{\sum_{i=1}^n t_i^2 \cdot n - \left(\sum_{i=1}^n t_i\right)^2}, \quad b = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i - a \cdot \sum_{i=1}^n t_i}{n}, \quad (5)$$

где  $\lambda_i, t_i$  – мгновенные интенсивности отказов технических средств ЖАТ и соответствующие значения времени соответственно.

Геометрическая интерпретация параметров линейного тренда состоит в том, что коэффициент  $a$  характеризует угол наклона линии тренда, а коэффициент  $b$  – смещение линии тренда относительно начала координат по оси ординат вверх или вниз.

Для учета ширины поля статистической неопределенности осуществляют пересчет коэффициента  $b$ :

– минимальное значение (нижняя граница поля в начальный момент времени)

$$b_{\min} = b - 2 \cdot \sigma_\lambda; \quad (6)$$

– максимальное значение (верхняя граница поля в начальный момент времени)

$$b_{\max} = b + 2 \cdot \sigma_\lambda. \quad (7)$$

В качестве критерия предельного состояния технических средств ЖАТ необходимо использовать допустимое значение интенсивности их отказов  $\lambda_{\text{доп}}$  на рассматриваемом объекте, которое определяют исходя из нормативного значения коэффициента готовности для объекта инфраструктуры хозяйства автоматики и телемеханики  $[K_\Gamma]$  и регламентного значения среднего времени восстановления  $T_B$ :

$$\lambda_{\text{доп}} = \frac{1 - [K_\Gamma]}{T_B \cdot [K_\Gamma]}. \quad (8)$$

Исходными данными для оценки остаточного ресурса технических средств ЖАТ являются: значение их допустимой интенсивности отказов  $\lambda_{\text{доп}}$ , значение интервальной оценки фактической интенсивности отказов  $\tilde{\lambda}_{-2\sigma_\lambda}^{+2\sigma_\lambda}$  и тренды, характеризующие динамику фактической интенсивности отказов, проведенный от верхней и нижней границ поля статистической неопределенности:

$$\tilde{\lambda}_{\max}(t) = a \cdot t + b_{\max}; \quad \tilde{\lambda}_{\min}(t) = a \cdot t + b_{\min}. \quad (9)$$

Оценку остаточного ресурса производят согласно табл. 1.

Таблица 1

Оценка остаточного ресурса

Сравнение значений фактической и допустимой интенсивности отказов	Качественный результат оценки надежности	Расчетные формулы для оценки остаточного ресурса
1	2	3
$\tilde{\lambda}_{-2\sigma_\lambda} > \lambda_{\text{доп}}$	Требования по надежности не выполняются, технические средства ЖАТ находятся в предельном состоянии	$T_{\text{ост}} = 0$

Окончание табл. 1

1	2	3
$\lambda - 2 \cdot \sigma_\lambda \leq \lambda_{\text{доп}} \leq \lambda + 2 \cdot \sigma_\lambda$	Требования по надежности выполняются, устройства ЖАТ находятся на границе предельного состояния	$T_{\text{ост}} = 0$
$\tilde{\lambda} + 2 \cdot \sigma_\lambda < \lambda_{\text{доп}}$	Требования по надежности выполняются, текущий запас по надежности определяется величиной $\Delta\lambda^+ = \lambda_{\text{доп}} - (\tilde{\lambda} + 2 \cdot \sigma_\lambda)$ , остаточный ресурс технических средств ЖАТ не равен нулю $T_{\text{ост}} \neq 0$	– если $a \leq 0$ , то состояние технических средств ЖАТ с позиции надежности не ухудшается: $T_{\text{ост}} = T_{\text{набл}}$ , лет; – если $a > 0$ , то состояние технических средств ЖАТ с позиции надежности ухудшается: $T_{\text{ост}} = \begin{cases} \frac{\lambda_d - b_{\text{max}}}{a} - T_{\text{набл}} \geq 0, \text{ то } \frac{\lambda_d - b_{\text{max}} - T_{\text{набл}}}{8760}, \text{ лет;} \\ \frac{\lambda_d - b_{\text{max}}}{a} - T_{\text{набл}} < 0, \text{ то } 0, \text{ лет.} \end{cases}$

Если в результате расчета значение остаточного ресурса системы ЖАТ оказывается менее трех лет, то требуется осуществить ее дополнительное обследование с целью выявления видов технических средств, оказывающих наибольший вклад в результат.

Для этого все отказы системы ЖАТ разделяют в зависимости от вида отказавших технических средств и подсчитывают их количество. Затем упорядочивают виды технических средств ЖАТ по количеству отказов в порядке от наибольшего к наименьшему. Результат заносят в табл. 2, причем виды технических средств ЖАТ перечисляются сверху вниз в порядке убывания количества отказов.

Таблица 2

Ранжирование видов технических средств ЖАТ по количеству отказов

Вид технических средств СЦБ	Количество отказов
Стрелочный электропривод СП-3	4
...	...

Номера пунктов табл. 2 рассматривают как ранги, присваиваемые техническим средствам разных видов. Вид технических средств ЖАТ, имеющих ранг «1», вносит наибольший вклад.

Кроме того, могут проводиться натурные исследования технических средств ЖАТ, входящих в систему.

Помимо оценки остаточного ресурса, осуществляемой на основе табл. 1, проводится дополнительный факторный анализ. Для этого вычисляют параметры трендов, полученных в результате аналогичной обработки классифицированных выборок, включающих только отказы, вызванные анализируемой причиной: человеческим фактором либо техническими средствами. Параметры трендов записывают в табл. 3.

Таблица 3

Причина отказа	Обозначение параметра $a$	Значение параметра $a$	Обозначение параметра $b$	Значение параметра $b$
Человеческий фактор	$a_{\text{чф}}$	...	$b_{\text{чф}}$	...
Технические средства	$a_{\text{тс}}$	...	$b_{\text{тс}}$	...

Параметр  $a$  задает наклон линейного тренда. Положительным значениям соответствует рост фактической интенсивности отказов, а отрицательным – уменьшение. Параметр  $b$  показывает, насколько изначально влияет тот или иной фактор на результирующую фактическую интенсивность отказов технических средств СЦБ. Дальнейший анализ осуществляют в соответствии с табл. 4

Таблица 4

Анализируемые параметры	Результат сравнения	Вывод
$b_{\text{чф}}, b_{\text{тс}}$	$b_{\text{чф}} > b_{\text{тс}}$	В начале периода наблюдения отказы определялись влиянием человеческого фактора
$b_{\text{чф}}, b_{\text{тс}}$	$b_{\text{чф}} = b_{\text{тс}}$	В начале периода наблюдения отказы по причине человеческого фактора и по причине состояния технических средств СЦБ проявлялись в равной мере
$b_{\text{чф}}, b_{\text{тс}}$	$b_{\text{чф}} < b_{\text{тс}}$	В начале периода наблюдения отказы определялись состоянием технических средств СЦБ
$a_{\text{чф}}, a_{\text{тс}}$	$a_{\text{чф}} > 0$ $a_{\text{тс}} > 0$	Фактическая интенсивность отказов системы СЦБ возрастает, причем это происходит как по причине недостаточного качества работы персонала, так и по причине неудовлетворительного состояния входящих в систему технических средств СЦБ. Причем: – если $a_{\text{тс}} > a_{\text{чф}}$ – влияние состояния технических средств СЦБ на фактическую интенсивность отказов в интервале наблюдения увеличивается по сравнению с влиянием человеческого фактора; – если $a_{\text{тс}} = a_{\text{чф}}$ – влияние состояния технических средств СЦБ и человеческого фактора в интервале наблюдения в равной мере влияет на динамику фактической интенсивности отказов; – если $a_{\text{тс}} < a_{\text{чф}}$ – влияние человеческого фактора на фактическую интенсивность отказов в интервале наблюдения увеличивается по сравнению с влиянием состояния технических средств СЦБ
$a_{\text{чф}}, a_{\text{тс}}$	$a_{\text{чф}} > 0$ $a_{\text{тс}} \leq 0$	Качество работы персонала негативным образом влияет на фактическую интенсивность отказов технических средств СЦБ, однако текущее состояние технических средств СЦБ не ухудшается. Следовательно, если параметр $a$ результирующего тренда имеет значение: – $a \leq 0$ – отсутствие роста результирующей фактической интенсивности отказов системы СЦБ обусловлено тем, что технические средства СЦБ компенсируют недостаточное качество работы персонала; – $a > 0$ – рост результирующей фактической интенсивности отказов системы СЦБ обусловлен тем, что технические средства СЦБ не могут компенсировать недостаточное качество работы персонала
$a_{\text{чф}}, a_{\text{тс}}$	$a_{\text{чф}} \leq 0$ $a_{\text{тс}} > 0$	Собственное состояние технических средств СЦБ негативным образом влияет на результирующую фактическую интенсивность отказов системы СЦБ, однако качество работы персонала является достаточным. Следовательно, если параметр $a$ результирующего тренда имеет значение: – $a \leq 0$ – отсутствие роста результирующей фактической интенсивности отказов системы СЦБ обусловлено тем, что качество работы персонала компенсируют неудовлетворительное состояние технических средств СЦБ; – $a > 0$ – рост результирующей фактической интенсивности отказов системы СЦБ обусловлен тем, что несмотря на достаточное качество работы персонала, компенсации неудовлетворительного состояния технических средств СЦБ не происходит
$a_{\text{чф}}, a_{\text{тс}}$	$a_{\text{чф}} \leq 0$ $a_{\text{тс}} \leq 0$	Фактическая интенсивность отказов системы СЦБ не возрастает, причем это происходит как по причине достаточного качества работы персонала, так и по причине удовлетворительного состояния входящих в систему технических средств СЦБ. Причем: – если $a_{\text{тс}} > a_{\text{чф}}$ – влияние состояния технических средств СЦБ на фактическую интенсивность отказов в интервале наблюдения увеличивается по сравнению с влиянием человеческого фактора; – если $a_{\text{тс}} = a_{\text{чф}}$ – влияние состояния технических средств СЦБ и человеческого фактора в интервале наблюдения в равной мере влияет на динамику фактической интенсивности отказов; – если $a_{\text{тс}} < a_{\text{чф}}$ – влияние человеческого фактора на фактическую интенсивность отказов в интервале наблюдения увеличивается по сравнению с влиянием состояния технических средств СЦБ

**Список литературы**

1. Сапожников, В. В. Надежность систем железнодорожной автоматики, телемеханики и связи / В. В. Сапожников, В. В. Сапожников, В. И. Шаманов. – М. : Маршрут, 2003. – 284 с.
2. Козлов, Б. А. Справочник по расчету надежности аппаратуры радиоэлектроники и автоматики / Б. А. Козлов, И. А. Ушаков. – М. : Советское радио, 1975. – 472 с.
3. Надежность и эффективность в технике : справочник : в 10 т. / ред. совет: В. С. Авдудевский (предисл.) и др. – М. : Машиностроение, 1990. – 615 с.
4. Методика расчета показателей надежности, безопасности и оценки рисков функционирования горючих систем автоматики / Б. Ф. Безродный, А. В. Горелик, И. А. Журавлев, П. А. Неваров, А. В. Орлов, Н. А. Тарадин, Д. В. Шалягин. – М. : 2012. – 58 с.
5. Методы расчета показателей надежности и безопасности функционирования систем электрической и диспетчерской централизации / Б. Ф. Безродный, А. В. Горелик, И. А. Журавлев, П. А. Неваров, А. В. Орлов, Н. А. Тарадин, Д. В. Шалягин. – М., 2011. – 62 с.
6. Методика расчета показателей надежности, безопасности и оценки рисков функционирования систем интервального регулирования / Б. Ф. Безродный, А. В. Горелик, И. А. Журавлев, П. А. Неваров, А. В. Орлов, Н. А. Тарадин, Д. В. Шалягин. – М., 2012. – 49 с.
7. Принципы комплексного управления надежностью систем железнодорожной автоматики и телемеханики / Б. Ф. Безродный, А. В. Горелик, И. А. Журавлев, Е. А. Михеев, П. А. Неваров, А. В. Орлов, Н. А. Тарадин, К. Д. Хромушкин, Д. В. Шалягин. – М., 2010. – 518 с.
8. Статистическая оценка остаточного ресурса устройств железнодорожной автоматики и телемеханики / Б. Ф. Безродный, Д. Н. Болотский, А. С. Голубев, А. В. Горелик, И. А. Журавлев, П. А. Неваров, А. В. Орлов, П. В. Савченко, Н. А. Тарадин, Д. В. Шалягин. – М., 2013. – 46 с.
9. Горячев, Н. В. Тепловая модель сменного блока исследуемого объекта / Н. В. Горячев // Надежность и качество : тр. Междунар. симп. : в 2 т. / под ред. Н. К. Юркова. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2012. – Т. 1. – С. 263–263.
10. Наумова, И. Ю. Повышение качества образовательных технологий за счет использования интерактивной доски / И. Ю. Наумова, Е. В. Конакова // Надежность и качество : тр. Междунар. симп. : в 2 т. / под ред. Н. К. Юркова. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2012. – Т. 1. – С. 387–387.
11. 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. 75–79.

**УДК 656.26**

**К проблеме оценки остаточного ресурса объектов железнодорожной автоматики и телемеханики** / Б. Ф. Безродный, А. В. Орлов, А. С. Голубев, Д. Н. Болотский // Надежность и качество сложных систем. – 2014. – № 2(6). – С. 34–39.

**Безродный Борис Федорович**

доктор технических наук, профессор,  
главный инженер,  
Проектно-конструкторско-технологическое бюро  
железнодорожной автоматики и телемеханики  
(105082, Россия, г. Москва,  
Переведеновский пер., 21/9)  
(849-9)260-01-19  
E-mail: boris-bezrodny@yandex.ru

**Bezrodnyy Boris Fedorovich**

doctor of technical sciences, professor,  
chief engineer,  
Design-technological bureau of railway automation  
and remote control  
(105082, 21/9 Perevedenskiy lane, Moscow, Russia)

**Орлов Александр Васильевич**

кандидат технических наук, доцент,  
Российская открытая академия транспорта,  
Московский государственный университет  
путей сообщения  
(127994, Россия, г. Москва, ул. Часовая, 22/2)  
(495) 799-95-29  
E-mail: orlov\_av@mail.ru

**Orlov Aleksandr Vasil'evich**

candidate of technical sciences, associate professor,  
Russian open academy of transport engineering,  
Moscow State University of railways  
(127994, 22/2 Chasovaya street, Moscow, Russia)

**Голубев Андрей Сергеевич**

научный сотрудник,  
Межрегиональное общественное учреждение  
«Институт инженерной физики»  
(142210, Россия, Московская обл., г. Серпухов,  
Б. Ударный пер., 1«А»)  
(4967) 35-31-93  
E-mail: info@iifrf.ru

**Болотский Дмитрий Николаевич**

научный сотрудник  
Межрегиональное общественное учреждение «Ин-  
ститут инженерной физики»  
(142210, Россия, Московская обл., г. Серпухов,  
Б. Ударный пер., 1«А»)  
(4967) 35-31-93  
E-mail: info@iifrf.ru

**Аннотация.** Для оценки надежности технических средств железнодорожной автоматики и телемеханики (ЖАТ) ведется непрерывный мониторинг фактической интенсивности их отказов. Однако на практике требуется оценка остаточного ресурса объекта ЖАТ (перегоне или станции). Для этих целей предлагается рассматривать фактическую интенсивность отказов технических средств ЖАТ как случайную величину и, используя данные о мгновенных ее значениях на рассматриваемом объекте, построить регрессионную зависимость, описывающую ее тренд во времени. Временной отрезок от момента наблюдения до пересечения линии тренда с допустимым значением интенсивности отказов можно принять за оценку остаточного ресурса объекта ЖАТ.

**Ключевые слова:** остаточный ресурс, железнодорожная автоматика и телемеханика, линейные модели регрессии.

**Golubev Andrey Sergeevich**

research associate,  
Inter-regional public institution  
«Institute of engineering physics»  
(142210, 1«A» B. Udarniy lane, Moscow region,  
Serpukhov city, Russia)

**Bolotskiy Dmitriy Nikolaevich**

research associate,  
Inter-regional public institution «Institute of engineering physics»  
(142210, 1«A»), B. Udarniy lane, Moscow region,  
Serpukhov city, Russia)

**Abstract.** To assess the reliability of the equipment of railway automatics and telemechanics (ATC) maintains a continuous monitoring of the actual intensity of their denials. In practice, however, requires the evaluation of residual resources of ATC (stretch or stations). For this purpose it is suggested that the actual failure rate of ATC as a random variable and using the instant its values on the object, construct a regression correlation, describing its trend over time. Time interval from the moment of observation before crossing trend line with a valid value of the failure rate can be taken for assessment of residual resource of the ATC.

**Key words:** residual resource, railway automation and telemechanics, linear regression model.

## ВЗГЛЯД НА ТЕОРИЮ АЛГОРИТМОВ С ПОЗИЦИЙ ФИЛОСОФИИ

Н. К. Юрков, Е. Ю. Русяева, А. В. Полтавский

### *Введение*

В настоящий период времени все более актуальными являются инновационные вопросы в алгоритмизации различных систем, объектов, явлений и процессов. С позиций гносеологии сущность такого подхода не случайна и связана с активным развитием информационных технологий как категории научного познания окружающей нас действительности. В статье рассматриваются некоторые философские аспекты в теории разработки алгоритмов, приводятся их основные разновидности и смысл. Философские категории, свойства, сущность, а также значение алгоритмов необходимы в проблеме инноваций и соотношении человек-машина.

Понятие алгоритма принадлежит к числу основных понятий математики. Термин «алгоритм» (или «алгорифм») происходит от имени средневекового узбекского математика Хорезми (по-арабски Аль-Хорезми), который еще в IX в. определил правила выполнения четырех арифметических действий по десятичной системе счисления (простейшие алгоритмы). По имени Аль-Хорезми совокупность этих правил стала называться в Европе словом «алгоризм». Затем (повидимому, вследствие смешения с греческим словом αριθμός – число) это название было переделано в «алгоритм». Под алгоритмом понимают точное предписание о выполнении в определенном порядке некоторой системы операций для решения всех задач некоторого данного типа [1–3]. Другое определение: алгоритм – расчлененный на дискретные элементарные шаги рецепт, предписывающий совершенно однозначный путь от варьируемых условий задачи к результату; это общий метод решения целого класса задач или, иначе говоря, способ разрешения массовой проблемы.

Другие наименования алгоритма – разрешающая процедура, разрешающий метод как способ задания алгоритма.

#### **Способы задания алгоритма:**

- 1) словесные предписания;
- 2) формулы;
- 3) схемы (блок-схемы).

Например, это алгоритм Евклида, служащий для разыскания общего делителя двух чисел.

**Свойства алгоритмов.** Любому алгоритму присущи следующие основные черты: определенность и массовость, а также определенность или детерминированность алгоритма. Требуется, чтобы метод решения (принятия решения) можно было сообщить другому лицу в виде конечного числа указаний, как действовать на отдельных стадиях принятия решения. При этом решение представляет собой определенный набор и порядок некоторой системы операций, который может быть в любое время повторен и выполнен с тем же успехом и другим лицом. Элемент произвола и случайности не допускается, но рассмотрение таких предписаний, в которых заранее предусматриваются акты случайного выбора, представляют большой теоретический и практический, а также инновационный интерес, особенно в современной теории игр. Алгоритм – это единое предписание, определяющее процесс, который может начинаться от различных исходных данных и ведет во всех случаях к соответствующему результату. Иными словами, алгоритм решает не одну лишь индивидуальную задачу, а некоторую серию однотипных задач [1–3].

**Разновидности алгоритмов.** Задачи могут быть математическими и логическими. Алгоритмы для решения большинства математических задач обычно называют численными алгоритмами [1–3]. Под численными алгоритмами понимают алгоритмы, в соответствии с которыми решение поставленных задач сводится к четырем арифметическим действиям. Широкое распространение численных алгоритмов обуславливается тем, что к четырем арифметическим действи-

ям можно свести очень многие другие операции в системе человек-машина. Численные алгоритмы играют важную роль в самых разнообразных областях как элементарной, так и высшей математики. В простейших случаях алгоритм решения математической задачи – это последовательность арифметических операций, которые надо провести над исходными данными и над результатами промежуточных вычислений, чтобы получить конечный ответ. Однако иногда по ходу вычислений, в зависимости от промежуточных результатов, надо решить, как дальше вести вычисления. В алгоритм решения этой задачи входит особое действие – выбор. Последнее действие имеет следующий вид: если из двух несовместимых возможностей  $A$  и  $B$  реализуется  $A$ , то дальше реализуется процесс вычисления  $S_1$ , а если  $B$ , то  $S_2$ . Это уже не есть арифметическое действие, а логический акт. Стало быть алгоритм решения этой задачи состоит не только из арифметических, но и из логических актов и в зависимости от логических условий может разветвляться. Такой особенностью обладает почти каждый сколько-нибудь сложный алгоритм. Мы привели пример элементарной альтернативы в качестве логического условия (принятия решений), но часто альтернатива зависит от ряда логических условий, и для ее решения надо провести комплекс логических действий.

Таким образом, все элементарные операции (или акты), производимые в процессе выполнения алгоритмов, распадаются на две основные группы операций, которые обычно называют *арифметическими* и *логическими операциями*. **Связь логики и математики – фундаментальный философский вопрос** [4]. Арифметические операции осуществляют непосредственное преобразование (переработку) информации (данных). Логические операции определяют выбор и дальнейшее направление счета машины, т.е. определяют последовательность выполнения арифметических операций вычислительной системы. Число операций, предписываемых алгоритмом, вообще говоря, заранее не бывает известным. Оно зависит от конкретного выбора условий задачи и выясняется лишь в процессе самого решения. Как правило, конечный алгоритм решает задачи приближенно, но позволяет получить приближение любой степени точности. Алгоритмы для решения логических задач уже не являются численными.

**Значение алгоритмов.** В математике серия задач определенного типа считается решенной, когда для ее решения установлен определенный алгоритм, т.е. указан однозначный процесс вычисления искомых величин. Во всех случаях, где это возможно, нахождение таких алгоритмов является естественной целью математики. Если же математика не обладает алгоритмом для решения всех задач данного типа, то хотя порою и удается решить некоторые единичные задачи этого типа, но в отдельных случаях приходится придумывать специальную процедуру, т.е. индивидуальный прием, непригодный уже для большинства других случаев. Несмотря на большое значение алгоритмов в математике, последняя отнюдь не «сводится» к построению алгоритмов, так как, кроме того, рассматривает искусственные способы решения частных задач, которые не могут быть решены непосредственно алгоритмически. Алгоритмы, составленные специально для вычислительных машин и систем с автоматическим управлением [5], называются обычно программами (машинными, или реализующими алгоритмами). Программа есть описание алгоритма решения задачи на машинном языке, т.е. в терминах элементарных операций машины или вычислительной системы. Благодаря заложенным в них алгоритмам вычислительная машина или система способна найти требуемую переработку информации. Все современные автоматические вычислительные машины и системы работают алгоритмически. Очень широкий круг задач решается алгоритмически и очень многие процессы управления объектами могут быть (точно или приблизительно) алгоритмически описаны. Область применения алгоритмических процессов весьма широка, и к ней относятся не только вычислительные процессы, встречающиеся в математике, информатике, физике и других науках, но и многие процессы, которые обычно принято считать очень трудными и сложными, для которых можно теоретически построить алгоритмы, являющиеся по своей идее достаточно простыми; практические же трудности встречаются при реализации этих процессов, связанные с тем, что указанные алгоритмы являются очень длинными и требуют совершения огромного числа операций (хотя эти операции сами по себе простые). Это замечание относится, в частности, к процессам игровых задач, где успех во многом зависит от умения обозреть большее число вариантов для выбора оптимального варианта (тактики, приема и т.п.). С созданием быстродействующих вычислительных систем мы значительно расширили число практически осуществимых алгоритмов. Применение вычислительных машин и систем, реализующих

алгоритмы, освобождает человеческий интеллект от выполнения функций и тем самым освобождает его для решения новых задач, экономно расходуя его творческие возможности.

**Сущность теории алгоритмов.** Потенциальная и практическая осуществимость алгоритма состоит в том, какие виды умственной работы могут выполнять автоматические вычислительные машины и системы, с определенной точки зрения рассматривается и решается в современной теории алгоритмов, являющейся важной ветвью математической логики.

Все известные до сих пор алгоритмы, а также все те, которые разрабатываются при современном состоянии науки, в принципе реализуемы в автоматических машинах. Но так как память у современных машин имеет ограниченный объем, то алгоритм может оказаться при известных условиях практически неосуществимым (отсюда задача – составлять наиболее короткие, простые и удобные для вычислений алгоритмы).

В подобных случаях процесс применения алгоритма рассматривается как потенциально осуществимый процесс, ведущий после конечного (хотя бы и очень большого) числа шагов к искомому результату. Говоря же о потенциальной возможности осуществления алгоритма в машине, имеют в виду потенциальную возможность неограниченного увеличения объема памяти в машине. Английский математик А. Тьюринг предложил самую общую и вместе с тем самую простую концепцию автоматической вычислительной машины. Машина Тьюринга представляет собой идеализированную схему, отображающую потенциальную возможность увеличения объема памяти. Понятие вычислительной машины Тьюринга является основным понятием теории алгоритмов. Каждая физически осуществимая вычислительная машина может быть рассматриваема лишь как некоторая приближенная модель машины Тьюринга (сравните категории соотношения между абсолютной и относительной истиной), в реальных вычислительных машинах и системах объем памяти ограничен. Разумеется, пока техническое осуществление неограниченной памяти невозможно. Принципиальное различие между реальной вычислительной машиной и машиной Тьюринга, представляющей собой некоторую абстрактную, идеализированную машину, является неустранимым. Вместе с тем важно отметить, что в реальной вычислительной машине объем памяти можно неограниченно увеличивать без изменения конструкции машины (сравните соотношение между возможностью и действительностью). Именно в этом направлении наращивания объема памяти и скорости вычисления можно ожидать дальнейших больших успехов в развитии вычислительных автоматов [6, 7].

Естественным является стремление многих математиков и исследователей создавать все более и более мощные алгоритмы, решающие по возможности все более и более обширные классы задач (задачи весьма широкого и общего типа). Возникает общая проблема: построить такой алгоритм, который позволит решать любую математическую задачу. Еще великий немецкий математик и философ Лейбниц мечтал о создании всеобщего метода, позволяющего эффективно решать любую задачу. В дальнейшем сама проблема получила определенное уточнение в виде одной из важнейших проблем математической логики, а именно: проблемы распознавания выводимости результатов.

Проблему распознавания выводимости можно сформулировать так: для любых двух формул  $R$  и  $S$  в логическом исчислении узнать, существует ли дедуктивная цепочка, ведущая от  $R$  и  $S$ , или нет. Создание такого алгоритма позволило бы улучшить общий разрешающий метод для автоматического решения самых разнообразных задач из всех математических теорий, которые построены аксиоматически, т.е. почти всех современных математических теорий.

В 1936 г. американский математик и философ А. Черч получил следующий результат, он известен нам под названием теоремы Черча [3]: проблема распознавания выводимости алгоритмически неразрешима. К числу алгоритмически неразрешимых проблем относятся также проблема эквивалентности слов в ассоциативном исчислении (советский математик А. А. Марков и американский математик Э. Пост, 1946–1947 гг.), проблема-тождества в теории групп (советский математик П. С. Новиков, 1955 г.) и ряд других логических и математических проблем. Эти наглядные примеры свидетельствуют о невозможности до конца «формализовать» математику.

**Соотношение вычислительной машины и мышления.** В соотношении человека и машины опишем две основные точки зрения о границах машинной вычислительной математики и соотношении человека и машины.

**Первая точка зрения** (взгляд по А. А. Маркову).

1. Всякая математическая машина может быть рассматриваема как приспособление для осуществления некоторого алгоритма; следовательно, машин, которые работали бы неалгоритмически и имели бы большие возможности, чем алгоритмические, не существует. Если невозможен алгоритм, решающий любую единичную задачу данного класса, то невозможны и машины, решающие всякую такую задачу.

2. Существуют задачи, которые не способен решать никакой автомат. Это класс задач, для решения которых нет алгоритма. И есть задачи, для которых еще не найден алгоритм, хотя он и может быть найден.

3. Человек способен и умеет решать алгоритмически неразрешимые задачи. Исследовательские, творческие функции, т.е. функции, выполняемые неалгоритмически, принадлежат исключительно человеку, и в этом заключается его превосходство над машиной, исследовательские, познавательные функции в математике никогда не будут переданы машинам. Все это опровергает сказки о машинах, способных решать любую задачу, и об автоматах, заменяющих ученого, ибо машина решает многие проблемы, которые перед ней поставлены, но никогда не сможет сама ставить перед собой проблемы.

Таким образом, если для решения данной задачи нет алгоритма или он не задан, то она не может быть решена никакой вычислительной машиной или технической системой. Принятие этой точки зрения дало бы основание отказаться от всех попыток моделирования систем и творческих процессов, а также от попыток синтеза систем с возможностями, большими, чем машина Тьюринга. Эта точка зрения достаточно широко распространена, но все же не является единственной и общепризнанной.

**Вторая точка зрения** (взгляд по А. А. Ляпунову, С. Л. Соболеву и Г. Клаусу).

Достаточно мощные электронные вычислительные машины и системы могут решать специфические задачи из класса алгоритмически неразрешимых. Человеческий интеллект может среди таких массовых задач находить разрешимые общие случаи. Вот эту задачу разыскания ответа среди множества случайных попыток может, по-видимому, решать и очень мощная вычислительная машина или система.

Эта точка зрения основывается на следующих посылах:

1. Всякий алгоритм эквивалентен некоторой функциональной схеме Тьюринга, что является выражением основной гипотезы теории алгоритмов.

2. Всякая техническая система обработки информации эквивалентна машине Тьюринга с конечной памятью. Машины, имевшие большие возможности, чем машина Тьюринга, невозможны, т.е. машина Тьюринга – это своего рода предел, к которому приближаются реальные вычислительные машины и который (в связи с бесконечностью памяти) никогда не может быть достигнут (**парадокс бесконечности**).

Это последнее положение вызывает сомнения в машине Тьюринга и постепенно приводит исследователя к техническим системам вообще. Но что такое «техническая система»? Например, эта техническая система создана в производственном процессе человеком. Технические системы – это такие системы, которые состоят, в основном, из небиологических компонентов.

Под метатермином «машина» может подразумеваться и материальная система, способная функционировать, и логическая алгоритмическая схема (машина Тьюринга).

Рассмотренные две точки зрения на соотношение человека и машины сходятся, однако в том, что *мышление человека признается не полностью алгоритмическим*. Но существует отличная от этого понимания и другая точка зрения, которую иногда называют алгоритмической. Алгоритмической точки зрения придерживается сам А. Тьюринг, который в своей работе «*Может ли машина мыслить?*» разбирает следующее возражение против своей точки зрения, связанное с признанием неформальности поведения человека: работа машины определяется некоторым набором правил, а деятельность человека не определяется совокупностью правил, поэтому *человек не машина*. Основной аргумент, который приводит А. Тьюринг для опровержения этой точки зрения, состоит в предложении перейти от рассмотрения «правил действия» к «естественным законам поведения». При этом сам А. Тьюринг формулирует такой тезис: «Мы убеждены не только в том, что быть управляемыми законами поведения – значит, быть некоторым родом машиной..., но что и, наоборот, быть такой машиной – означает быть управляемым законами поведения».

Однако эти подходы к соотношению человеческого мозга и машины нельзя абсолютизировать: чисто функциональный критерий не исчерпывает всех аспектов мышления человека. История научного познания свидетельствует, что чисто количественный формально-функциональный подход к объектам, процессам и явлениям, как правило, с развитием науки дополняется содержательным, отчасти субъективно-индивидуальным подходом. Наконец, сам А. Тьюринг признает, что существо трудностей машинного воспроизведения мышления человека связано не только с инженерными задачами (которые, конечно, сами по себе исключительно сложны), а непосредственно с механизмом программирования. А. Тьюринг предполагает, что эти трудности могут быть преодолены, если учесть способность кибернетических машин к обучению и, собственно, к самообучению. В этом случае мы можем так поставить задачу: сначала строим машину-ребенка, а потом ее обучаем. Но в такой постановке задачи А. Тьюринг недооценивает качественного отличия ребенка от машины. Во-первых, ребенок – это не только приемник внешней информации / *tabula rasa*; он уже содержит в себе гигантский и возрастающий от поколения к поколению запас информации. Во-вторых, у ребенка прижизненная информация, полученная на основе обучения, вплетается в наследственную и социально-культурную программу, являющуюся катализатором, поэтому и сам процесс обучения ребенка качественно отличается от процесса накопления запаса информации в вычислительной машине или системе. *Признание способности вычислительных машин и систем к самообучению еще не устраняет качественного отличия машин от людей.*

Вполне очевидно, что рациональные зерна и материалистические моменты в этих идеях несомненно имеются. Однако здесь мы имеем дело лишь с моделями – аналогиями, абсолютизировать сходство с моделируемыми объектами, конечно, нет достаточных оснований. Обучение человека – это познание им объективного окружающего мира и самого себя, что является сознательным и социально-культурным обусловленным процессом выработки и закрепления определенных воззрений на окружающий мир, а также полученных знаний, навыков и различных форм поведения. Об этом особенно важно помнить ученым и исследователям, когда *устанавливается изоморфность* явлений и процессов окружающей действительности, а также объектов, относящихся к различным формам движения материи.

**Выводы.** Теория познания окружающего нас мира базируется на фундаментальных законах философии и ее основных категориях, естественным является изучение и построение на платформе философских воззрений современной теории алгоритмов (в целях организации деятельности и познания окружающей действительности, данной нам в ощущениях). Инновационная деятельность специалиста-практика может быть направлена на объективно новый, так и на субъективно новый (для данного специалиста или для данного предприятия, учреждения) результат. Любая научно-исследовательская деятельность, если она осуществляется более или менее грамотно, по определению всегда направлена на объективно новый результат [8–12]. При этом остается открытой для дальнейших исследований проблема методологии философской деятельности (хотя условно можно считать, что философия является одновременно и отраслью науки и на нее, в частности, может быть распространена методология научной деятельности). Вместе с тем любой инновационный проект и разработка для него алгоритмов потребуют базиса интеллектуальных инвестиций, а в данном направлении потребует непосредственная связь «инвестиционного портфеля» с философией как фундаментальной основы всех научных воззрений с ее основными категориями.

#### Список литературы

1. Философия и методология науки : учеб. пособие для студентов вузов / под ред. В. И. Кузнецова. – М. : Аспект пресс, 1996. – 516 с.
2. Философская энциклопедия : в 5 т. – М. : Сов. энциклопедия, 1965–1968.
3. Чермен, У. Введение в исследование операций / У. Чермен. – М. : Наука, 1968. – 414 с.
4. Энгельс, Ф. Диалектика природы / Ф. Энгельс. – М., 1958. – 206 с.
5. Берг, А. И. Проблемы управления и кибернетики / А. И. Берг. – М., 1961. – 257 с.
6. Трахтенгерц, Э. А. Программное обеспечение параллельных процессов / Э. А. Трахтенгерц ; Академия наук СССР Ордена Ленина Институт проблем управления. – М. : Наука, 1987. – 271 с.
7. Айзерман, М. А. Логика, автоматы, алгоритмы / М. А. Айзерман, Л. А. Гусев, Л. И. Розеноэр. – М. : Физмат, 1963. – 615 с.
8. Новиков, А. М. Методология / А. М. Новиков, Д. А. Новиков. – М. : СИНТЕГ, 2007. – 660 с.

9. Эшби, У. Р. Что такое разумная машина? / У. Р. Эшби // Зарубежная радиоэлектроника. – М., 1962. – 37 с.
10. Горячев, Н. В. Исследование и разработка средств и методик анализа и автоматизированного выбора систем охлаждения радиоэлектронной аппаратуры / Н. В. Горячев, М. К. Танатов, Н. К. Юрков // Надежность и качество сложных систем. – 2013. – № 3. – С. 70–75.
11. Лысенко А. В. Анализ современных систем управления проектами / А. В. Лысенко // Надежность и качество : тр. Междунар. симп. : в 2 т. / под ред. Н. К. Юркова. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2012. – Т. 1. – С. 371–372.
12. Затылкин А. В. Алгоритм проведения проектных исследований радиотехнических устройств опытно-теоретическим методом / А. В. Затылкин, И. И. Кочегаров, Н. К. Юрков // Надежность и качество : тр. Междунар. симп. : в 2 т. / под ред. Н. К. Юркова. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2012. – Т. 1. – С. 365–366.

УДК 004.42

**Юрков, Н. К.**

**Взгляд на теорию алгоритмов с позиций философии** / Н. К. Юрков, Е. Ю. Русяева, А. В. Полтавский // Надежность и качество сложных систем. – 2014. – № 2(6). – С. 40–45.

**Юрков Николай Кондратьевич**

доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой,  
кафедра конструирования  
и производства радиоаппаратуры,  
Пензенский государственный университет  
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
(8412) 56-43-46  
E-mail: yurkov\_NK@mail.ru

**Русяева Елена Юрьевна**

кандидат философских наук,  
старший научный сотрудник,  
Институт проблем управления  
Российской академии наук им. В. А. Трапезникова  
(117997, Россия, г. Москва, ул. Профсоюзная, 65)

**Полтавский Александр Васильевич**

доктор технических наук,  
старший научный сотрудник,  
Институт проблем управления  
Российской академии наук им. В. А. Трапезникова  
(117997, Россия, г. Москва, ул. Профсоюзная, 65)  
334-84-79  
E-mail: avp57avp@yandex.ru

**Аннотация.** Философия как система и наука взглядов на окружающий мир является фундаментальной основой, она связана с созданием множества категорий, которые имеются во всех сферах деятельности человека. Теория алгоритмов как один из фундаментальных разделов математики также базируется на исследованиях гносеологии, поскольку направлена на получение истинности научной картины знаний и мира. С позиций гносеологии современные инновационные проекты немыслимы без разработки программ, алгоритмов и учета соотношений в системе человек-машина, которые следует учитывать при постановке задач.

**Ключевые слова:** алгоритм, вычислительная система, машина, категории.

**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)

**Rusyaeva Elena Yur'evna**

candidate of philosophy sciences, senior staff scientist,  
Institute of management problems  
of Russian academy of sciences  
named after V. A. Trapeznikov  
(117997, 65 Profsoyuznaya street, Moscow, Russia)

**Poltavskiy Aleksandr Vasil'evich**

doctor of technical sciences, senior staff scientist,  
Institute of management problems  
of Russian academy of sciences  
named after V. A. Trapeznikov  
(117997, 65 Profsoyuznaya street, Moscow, Russia)

**Abstract.** Philosophy of science as a system of views on the world around us is fundamental, it is related to the set of categories that can be found in all spheres of human activity. Theory of algorithms, as one of the fundamental topics of mathematics, is also based on research on epistemology, as sent to receive the truth of scientific knowledge and the paintings of the world. From the perspective of epistemology, modern innovative design are unthinkable without programming, algorithms, and accounting ratios in man-machine system, which should be taken into account in assigning tasks.

**Key words:** algorithm, a computer system, the machine, category.

## ИНТЕГРАЦИИ СИГНАЛОВ КОГЕРЕНТНОЙ СИСТЕМЫ ГЛОНАСС/GPS

А. В. Полтавский

Основные положения и теории марковского случайного процесса позволяют оценить совокупность наблюдаемых сигналов с приемников навигационных спутниковой системы ГЛОНАСС/GPS в дифференциальном режиме работы в задачах определения координат местоположения подвижного объекта управления (ОУ)  $Y_1(t), \dots, Y_n(t)$ , которые будем рассматривать как компоненты  $n$ -мерного векторного процесса  $Y(t)$ . Случайный векторный процесс сигналов с приемников навигационных спутников ГЛОНАСС/GPS  $Y(t)$  должен быть таким, чтобы при непрерывном изменении аргумента  $t$  за любой малый промежуток времени  $\Delta t$  его компоненты  $Y_i(t)$  изменялись на величину порядка  $\sqrt{\Delta t}$  и все траектории каждой компоненты были непрерывны с вероятностью единица в обычном смысле понятия непрерывности функций. Считаем, что большие изменения компонент рассматриваемого случайного процесса маловероятны, конечные скачки имеют нулевую вероятность, а также в последовательные моменты времени  $t_1 < t_2 < \dots < t_m$ , взятые в интервале существования рассматриваемого случайного процесса, будут известны значения его компоненты в виде

$$Y_1(t_1), \dots, Y_n(t_1); \dots; Y_1(t_m), \dots, Y_n(t_m).$$

Рассмотрим совокупность значений многомерного случайного процесса в моменты времени  $t_{h-1}, t_h$  при  $t_{h-1} < t_h$ :  $Y_1(t_{h-1}), \dots, Y_n(t_{h-1}); Y_1(t_h), \dots, Y_n(t_h)$ . Из теории вероятностей известно [2], что многомерный случайный процесс является марковским, если закон распределения системы случайных величин  $Y_1(t_h), \dots, Y_n(t_h)$ , вычисленный при условии, что известны значения их  $t = t_{h-1}$ :  $Y_1(t_{h-1}), \dots, Y_n(t_{h-1})$ , не зависит от того, какие значения случайные функции  $Y_1(t), \dots, Y_n(t)$  принимали в моменты времени, предшествовавшие моменту времени  $t_{h-1}$ . Сформулированное положение выражается формулой, которая принимает вид записи для скалярного аргумента как

$$\begin{aligned} f(y_1(t_h), \dots, y_n(t_h) | y_1(t_1), \dots, y_n(t_1); \dots; y_1(t_{h-1}), \dots, y_n(t_{h-1})) &\equiv \\ &\equiv f(y_1(t_h), \dots, y_n(t_h) | y_1(t_{h-1}), \dots, y_n(t_{h-1})). \end{aligned} \quad (1)$$

Данную формулу можно записать для векторного аргумента в следующей форме:

$$f(y(t_h) | y(t_1), \dots, y(t_{h-1})) = f(y(t_h) | y(t_{h-1})).$$

Из теории вероятностей также следует, что исчерпывающей характеристикой для *многомерного* ( векторного ) *случайного марковского процесса*, подобно тому, как это имеет место для одномерного процесса, является вторая функция плотности вероятности

$$f_2(y(t_1), y(t_2)) = f_2(y_1(t_1), \dots, y_n(t_1); y_1(t_2), \dots, y_n(t_2)) \quad (2)$$

или первая функция плотности вероятности  $f_1(y(t_1))$  и функция вероятности перехода  $f(y(t_2) | y(t_1))$  определяются равенствами как

$$\begin{aligned} f_1(y(t_1)) &= f_1(y_1(t_1), \dots, y_n(t_1)), \\ f(y(t_2) | y(t_1)) &= f(y_1(t_2), \dots, y_n(t_2) | y_1(t_1), \dots, y_n(t_1)). \end{aligned} \quad (3)$$

Функции  $f_1(y(t_1))$  и  $f(y(t_2)|y(t_1))$  выражаются через  $f_2(y(t_1), y(t_2))$  в следующем виде:

$$f_1(y(t_1)) = \int_{-\infty}^{\infty} f_2(y(t_1), y^*(t_2)) dy^*,$$

$$f(y(t_2)|y(t_1)) = \frac{f_2(y(t_2), y(t_1))}{f_1(y(t_1))}. \quad (4)$$

Условная функция плотности вероятности  $f(y(t_2)|y(t_1))$  в многомерном процессе неотрицательна и нормирована к единице, как и для одномерного, и обращается в дельта-функцию при совпадении моментов во времени  $t_1 = t_2 = t$ :

$$f(y^*(t)|y(t)) = \delta(y^* - y) = \delta(y_1^* - y_1) \dots \delta(y_n^* - y_n). \quad (5)$$

Плотность вероятности перехода  $f(y(t_2)|y(t_1))$  для многомерного марковского случайного процесса также удовлетворяет и интегральному уравнению Смолуховского–Колмогорова–Чепмена при наблюдении в диапазоне времени  $t_1 < t' < t_2$ :

$$f(y(t_2)|y(t_1)) = \int_{-\infty}^{\infty} f(y(t_2)|y'(t')) f(y'(t')|y(t_1)) dy'. \quad (6)$$

Уравнение (6) получается путем простого обобщения на многомерный векторный процесс уравнения Маркова или на основании соотношения

$$f_h(y(t_1), \dots, y(t_h)) = \int_{-\infty}^{\infty} f_{h+1}(y(t_1), \dots, y(t_h), y'(t')) dy'.$$

Применив эту формулу для  $h = 2$ , полагая, что  $t_1 < t' < t_2$ :

$$f_2(y(t_1), y(t_2)) = \int_{-\infty}^{\infty} f_3(y(t_1), y'(t'), y(t_2)) dy' \quad (7)$$

и подставляя в эту формулу выражения для плотностей вероятности марковского процесса

$$f_2(y(t_1), y(t_2)) = f_1(y(t_1)) f(y(t_2)|y(t_1)),$$

$$f_3(y(t_1), y'(t'), y(t_2)) = f_1(y(t_1)) f(y(t_2)|y'(t')) \times f(y'(t')|y(t_1)), \quad (8)$$

получим выражение в виде

$$f_1(y(t_1)) f(y(t_2)|y(t_1)) = \int_{-\infty}^{\infty} f_1(y(t_1)) f(y(t_2)|y'(t')) f(y'(t')|y(t_1)) dy'. \quad (9)$$

Для многомерного марковского непрерывного процесса вводятся соответствующие две характеристические функции. Функции при  $n$ -мерном случайном марковском процессе  $Y(t)$  для векторного аргумента  $\lambda(\lambda_1, \dots, \lambda_n)$  записываются в виде

$$g_1(\lambda, t) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{i\lambda^T y} f_1(y, t) dy,$$

$$g(\lambda, t | y', t') = \int_{-\infty}^{\infty} e^{i\lambda^T y} f(y, t | y', t') dy, \quad (10)$$

где  $\lambda^T y$  – скалярное произведение векторов  $\lambda$  и  $y$ . Так как многомерные плотности вероятности являются также интегрируемыми в бесконечных пределах неотрицательными функциями, то существует и преобразование Фурье, определяющее эти функции через соответствующие характеристические функции:

$$f_1(y, t) = \frac{1}{(2\pi)^n} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i\lambda^T y} g_1(\lambda, t) d\lambda, \quad (11)$$

$$f(y, t \mid y', t') = \frac{1}{(2\pi)^n} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i\lambda^T y} g(\lambda, t \mid y', t') d\lambda.$$

Характеристические же функции векторных случайных функций обладают свойствами, как и для одномерных случайных процессов.

Далее, если в  $n$ -мерном векторном аргументе часть компонент полагать равными нулю, то получим характеристическую функцию случайного векторного процесса уменьшенного порядка как

$$g_1(\lambda_1, \dots, \lambda_m, 0, \dots, 0, \lambda_n, t) = g_1(\lambda_1, \dots, \lambda_m, \lambda_n, t).$$

В векторной форме марковские процессы имеют вид

$$\begin{aligned} g_1(\lambda, t) &= 1 + \sum_{k=1}^n i\lambda_k M[Y_k(t)] + \frac{1}{2!} \sum_{k,\ell=1}^n i^2 \lambda_k \lambda_\ell M[Y_k(t)Y_\ell(t)] + \\ &+ \frac{1}{3!} \sum_{k,\ell,r=1}^n i^3 \lambda_k \lambda_\ell \lambda_r M[Y_k(t)Y_\ell(t)Y_r(t)] + \dots, \\ g(\lambda, t \mid y', t') &= 1 + \sum_{k=1}^n i\lambda_k M[Y_k(t) \mid y'] + \frac{1}{2!} \sum_{k,\ell=1}^n i^2 \lambda_k \lambda_\ell M[Y_k(t)Y_\ell(t) \mid y'] + \\ &+ \frac{1}{3!} \sum_{k,\ell,r=1}^n i^3 \lambda_k \lambda_\ell \lambda_r M[Y_k(t)Y_\ell(t)Y_r(t) \mid y'] + \dots, \end{aligned} \quad (12)$$

где  $M[Y_k(t)Y_\ell(t)\dots]$  – начальные моменты, а  $M[Y_k(t)Y_\ell(t)\dots \mid y']$  – условные начальные моменты случайного векторного процесса  $Y(t)$ .

Многомерный непрерывный марковский процесс так же, как и одномерный, может быть полностью описан *локальными* характеристиками. Этими локальными характеристиками являются условные математические ожидания, а также условные корреляционные моменты приращений компонент  $Y_k(t)$  марковского случайного процесса при изменении аргумента на малый диапазон времени  $\Delta t$  :

$$\begin{aligned} \Delta m_k(y, t) &= M[Y_k(t + \Delta t) - Y_k(t) \mid y, t] = A_k(y, t)\Delta t + 0(\Delta t), \\ \Delta m_{kl}(y, t) &= M[(Y_k(t + \Delta t) - Y_k(t))(Y_l(t + \Delta t) - Y_l(t)) \mid y, t] = B_{kl}(y, t)\Delta t + 0(\Delta t) \quad (k, l = 1, 2, \dots), \end{aligned} \quad (13)$$

где  $A_k(y, t)$  – компоненты вектора  $A(y, t)$  и  $B_{kl}(y, t)$  – компоненты матрицы  $B(y, t)$ , являются непрерывными функциями, рассматриваемые вместе со своими производными. Условные моменты  $\Delta m_{klr}, \Delta m_{klrs}, \dots$  выше второго имеют порядок малости  $0(\Delta t)$  более  $\Delta t$  в соответствии с определением для непрерывного марковского случайного процесса.

С помощью введенных локальных характеристик для многомерного марковского процесса запишем условную характеристическую функцию приращений  $\Delta Y(t)$  процесса  $Y(t)$  за время наблюдения  $\Delta t$  :

$$g_{\Delta y}(\lambda, t + \Delta t \mid y, t) = 1 + \sum_{k=1}^n i\lambda_k \Delta m_k(y, t) + \frac{1}{2!} \sum_{k,l=1}^n i^2 \lambda_k \lambda_l \Delta m_{kl}(y, t) + \frac{1}{3!} \sum_{k,l,r=1}^n i^3 \lambda_k \lambda_l \lambda_r \Delta m_{klr}(y, t) + \dots, \quad (14)$$

где  $\Delta m_k(y, t) = M[\Delta Y_k(t) \mid y]$  – условные моменты первого порядка приращений  $\Delta Y_k(t)$  координат;  $\Delta m_{kl}, \Delta m_{klr}$  и т.д. – условные моменты высших порядков приращений координат.

Изложенный системный подход в математическом моделировании многомерного марковского (нормально распределенного) может рассматриваться как характеризующий процесс блуж-

дания векторов положения координат и скорости центра масс подвижного объекта, например беспилотного летательного аппарата (БЛА) в результате обработки сигналов с  $n$ -приемников от спутниковой системы ГЛОНАСС/GPS, расположенных по периметру летательного аппарата. Для анализа этого процесса уравнения следует рассматривать как векторные. Компоненты данного векторного винеровского процесса независимы. Поэтому для каждой компоненты здесь можно повторить выкладки для соответствующего диффузионного процесса. В результате предлагаемого подхода в имитационном моделировании, например, первая плотность вероятности двумерного векторного процесса принимает вид

$$f_1(y_1, y_2, t) = \frac{1}{2\pi Gt} e^{-\frac{y_1^2 + y_2^2}{2Gt}}. \quad (15)$$

Для решения прикладных задач имитационного моделирования в лабораторных условиях было изготовлено шесть приемников от спутниковой навигации ГЛОНАСС/GPS в модели бортового комплекса (БКУ) многофункционального БЛА двойного назначения (рис. 1).

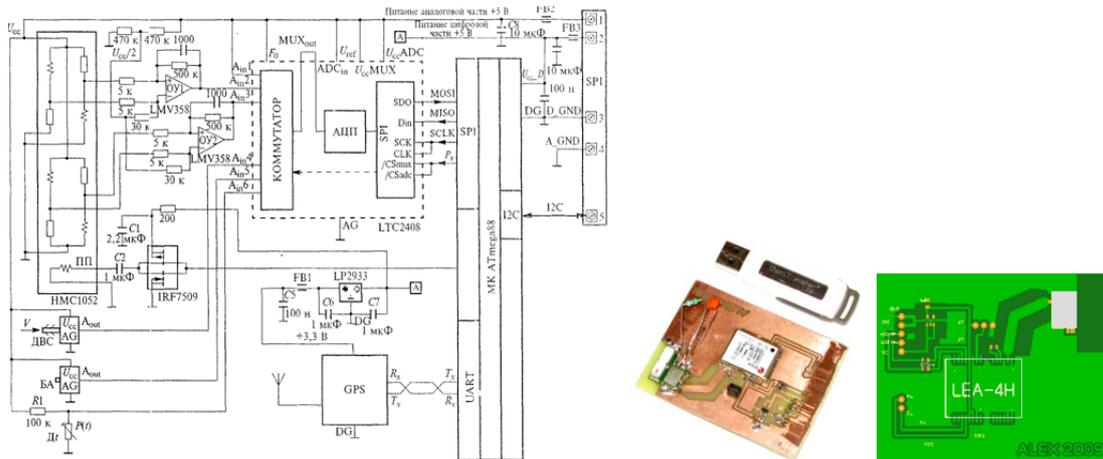


Рис. 1. Внешний вид и топология схемы спутникового канала ГЛОНАСС/GPS в многоканальной структуре имитационных моделей БКУ БЛА экспериментальных исследований. Техническое решение впервые выполнено в НИР «КОМПЛЕКС-1» ИПУ РАН 14.06.2009 г.

На рис. 2 показан фрагмент имитационного моделирования в целях получения средней квадратической ошибки (СКО)  $\eta$  определения координат местоположения центра масс БЛА. Из графика видим, что устойчивость случайного процесса уже наблюдается при установке 6–8 приемников ГЛОНСС/GPS по периметру на подвижном объекте.

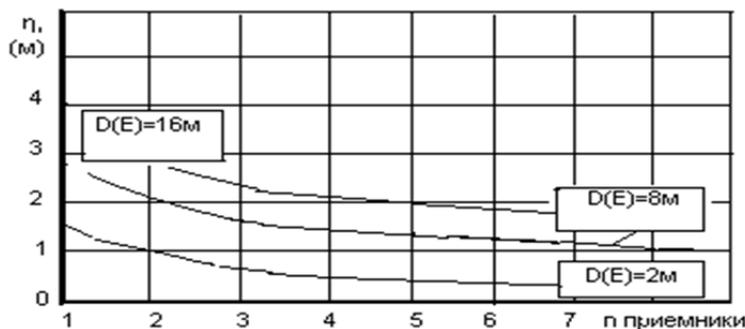


Рис. 2. Изменения СКО от числа приемников спутникового канала ГЛОНАСС/GPS

**Список литературы**

1. Казаков, И. Е. Методы оптимизации стохастических систем / И. Е. Казаков, Д. И. Гладков. – М. : Наука, 1987. – 246 с.

2. Теоретические основы проектирования информационно-управляющих систем космических аппаратов / В. В. Кульба, Е. Н. Микрин, Б. В. Павлов, В. Н. Платонов ; Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН. – М. : Наука, 2006. – 579 с.
3. Казаков, И. Е. Анализ стохастических систем в пространстве состояний / И. Е. Казаков, С. В. Мальчиков. – М. : Наука, 1983. – 516 с.
4. Красильщиков, М. Н. Бортовые информационно-управляющие средства оснащения ЛА / М. Н. Красильщиков, Р. В. Мубарашкин, Н. В. Ким. – М. : МАИ, 2003. – 496 с.
5. Полтавский, А. В. Управление безопасностью движения беспилотного ЛА / А. В. Полтавский // Датчики и системы. – 2008. – № 9. – С. 4–8.
6. Полтавский, А. В. Модель измерительной системы в управлении БЛА / А. В. Полтавский // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2009. – № 10. – С. 73–77.
7. Лысенко, А. В. Способ снижения величины вибрационных нагрузок в несущих конструкциях ЭС и методика его реализующая / А. В. Лысенко // Надежность и качество сложных систем. – 2013. – № 4. – С. 41–44.
8. Затылкин, А. В. Алгоритм проведения проектных исследований радиотехнических устройств опытно-теоретическим методом / А. В. Затылкин, И. И. Кочегаров, Н. К. Юрков // Надежность и качество : тр. Междунар. симп. : в 2 т. / под ред. Н. К. Юркова. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2012. – Т. 1. – С. 365–367.
9. Гришко, А. К. Оценка качества математических моделей расчета электроакустических полей и моделей расчета дальности действия радиолокационных систем методом последовательного анализа / А. К. Гришко // Надежность и качество : тр. Междунар. симп. : в 2 т. / под ред. Н. К. Юркова. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2012. – Т. 1. – С. 244–245.

УДК 629.7.017

*Полтавский, А. В.*

**Интеграция сигналов когерентной системы Глонасс/GPS / А. В. Полтавский // Надежность и качество сложных систем. – 2014. – № 2(6). – С. 46–50.**

***Полтавский Александр Васильевич***

доктор технических наук,  
старший научный сотрудник,  
Институт проблем управления  
Российской академии наук им. В. А. Трапезникова  
(117997, Россия, г. Москва, ул. Профсоюзная, 65)  
334-84-79  
E-mail: avp57avp@yandex.ru

***Аннотация.*** Рассматривается один из подходов в прикладных задачах математического моделирования многоканальных систем управления подвижными объектами в случае использования информации от приемников спутниковой навигационной системы ГЛОНАСС/GPS.

***Ключевые слова:*** навигационная спутниковая система, марковский процесс, беспилотные летательные аппараты.

***Poltavskiy Aleksandr Vasil'evich***

doctor of technical sciences, senior staff scientist,  
Institute of management problems  
of Russian academy of sciences  
named after V. A. Trapeznikov  
(117997, 65 Profsoyuznaya street, Moscow, Russia)

***Abstract.*** Under consideration is one of the approaches in the tasks of the mathematical modeling of multichannel control systems of moving objects in case of using signals from receivers for satellite navigational systems GLONASS/GPS.

***Key words:*** satellite navigational system, Markov process, unmanned aircraft vehicles.

# ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ

УДК 621.396.6.07.019.3

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ЭЛЕМЕНТАМИ НАСТРОЙКИ\*

О. В. Абрамов

Важное место в общем комплексе мер, направленных на обеспечение требуемых или экстремальных значений показателей качества и надежности технических объектов, занимает настройка и регулировка параметров этих объектов.

Несмотря на естественное стремление создавать технические объекты, не требующие настройки и регулировки, обойтись без настройки для широкого класса технических устройств и систем не удастся, и тенденции развития техники не позволяют надеяться, что в обозримом будущем эта проблема будет решена положительно. К числу технических объектов, в которых широко используются настройка и регулировка, относятся радиоэлектронные устройства (аппаратура связи, средства радиолокации и гидроакустики, измерительные приборы и системы), системы автоматического управления и регулирования, средства мехатроники. Важное место занимает настройка и при управлении технологическими процессами.

В большинстве случаев настройка призвана скомпенсировать отклонения параметров технических объектов от расчетных значений, вызванных наличием производственных (технологических) разбросов, нестабильностью параметров, изменениями внешних условий и других воздействий.

В настоящее время известен ряд конструктивных подходов и результатов, связанных с решением задач оптимального проектирования с учетом возможных параметрических возмущений и требований надежности. Однако они относятся главным образом к проектированию не настраиваемых объектов. Вместе с тем предлагаемые методы зачастую не обеспечивают требуемый уровень надежности в условиях имеющихся ресурсов. Причинами этого могут быть, например, жесткие ограничения, накладываемые на выходные параметры устройства техническими условиями, значительный разброс параметров некоторых элементов, низкая временная стабильность параметров, высокие требования к срокам эксплуатации (времени безотказной работы) и т.д.

В этих условиях введение элементов настройки часто оказывается наиболее предпочтительным, а иногда и единственно возможным способом обеспечения требуемых значений показателей качества и надежности. При этом иногда удается существенно ослабить требования к параметрам не настраиваемых элементов и вместе с тем достаточно точно устанавливать в процессе настройки требуемые значения выходных параметров устройства.

---

\* Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ, проект №14-08-00149а.

Рассмотрим более подробно содержание задач настройки параметров и их взаимосвязь с задачей оптимального параметрического синтеза [1–3].

Проектирование технических систем с учетом закономерностей технологических и эксплуатационных вариаций их параметров можно представить в виде последовательности взаимосвязанных этапов.

На *первом* этапе при выбранной структуре системы осуществляется расчет (поиск) параметров ее элементов, при которых обеспечивается выполнение условий работоспособности.

*Вторым* этапом является анализ работоспособности системы при возможных отклонениях параметров от расчетных значений. Поскольку такие отклонения носят случайный характер, оценка степени выполнения условий работоспособности будет вероятностной (вероятность выполнения условий работоспособности в заданный момент времени или в течение некоторого промежутка времени, среднее время сохранения работоспособного состояния и т.д.).

Если вероятность выполнения условий работоспособности окажется ниже требуемой, то переходят к *третьему* этапу – выбору номинальных значений параметров, при которых обеспечивается максимальная гарантия работоспособности (задача оптимального параметрического синтеза).

Рассмотренные этапы отражают процесс проектирования системы в безнастроечном варианте.

Следующий *четвертый* этап состоит в проектировании системы, для обеспечения работоспособности которой необходимы настроечные параметры. Этот этап сводится, в свою очередь, к решению следующих взаимосвязанных задач:

- анализ необходимости производственной (однократной) и эксплуатационной (многократной) регулировки параметров системы;
- выбор совокупности параметров, которыми наиболее целесообразно осуществлять настройку;
- определение необходимых диапазонов изменения параметров настройки;
- определение моментов времени, в которые необходимо осуществлять эксплуатационные регулировки;
- выбор оптимальных значений параметров, устанавливаемых в процессе настройки, с учетом последующих временных изменений параметров системы.

Один из основных вопросов, возникающих при проектировании технических систем с элементами настройки, состоит в выборе переменных параметров (параметров, которыми наиболее целесообразно осуществлять настройку). Для решения этой задачи необходимо, прежде всего, выбрать критерий оценки настроечной способности (НС) параметров системы.

В качестве такого критерия можно использовать вероятность успешной настройки системы выбранным параметром или группой параметров [4].

Пусть  $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  – вектор параметров элементов (внутренних параметров) системы. Условия и ограничения, накладываемые на возможные изменения внутренних параметров (например, условия физической реализуемости, ограничения на возможные производственные и эксплуатационные отклонения параметров) зададут в пространстве параметров некоторую область  $\Omega$ , которой должен принадлежать вектор  $\mathbf{x}$  и которую назовем областью возможных значений внутренних параметров.

Пусть  $D \in E^n$  – область допустимых изменений внутренних параметров, т.е. множество таких значений внутренних параметров, при которых выполняются условия работоспособности (область работоспособности). Если  $\Omega \subset D$ , то это означает, что при любых возможных отклонениях параметров от расчетных значений (при любых возможных эксплуатационных и производственных вариациях внутренних параметров) объект будет находиться в работоспособном состоянии и, следовательно, его настройка не требуется.

Необходимость настройки возникает, когда часть векторов  $\mathbf{x} \in \Omega$  оказываются за пределами области работоспособности  $D$ .

Предположим, что каким-то образом определены (или заданы) параметры, которыми предполагается осуществлять настройку  $\mathbf{r} = \{r_1, \dots, r_k\}$ . Настройка будет состоять в изменении параметров  $r_1, \dots, r_k$  с целью нахождения таких значений, при которых объект будет работоспособ-

ным. Другими словами, для каждого из векторов  $\mathbf{x} \in \Omega$ , находящихся вне области  $D$ , необходимо путем изменения (коррекции) вектора регулировочных параметров добиться, чтобы

$$\mathbf{x}^* = (\mathbf{x}_s + \mathbf{r}^*) \in D, \quad (1)$$

где  $\mathbf{x}^*$  – скорректированный (настроенный) вектор внутренних параметров;  $\mathbf{r}^*$  – вектор переменных (настроечных) параметров после настройки. В дальнейшем будем для простоты записывать результаты настройки в виде  $\mathbf{x} + \mathbf{r}$ .

Может оказаться, что при выбранных настроечных параметрах  $\mathbf{r}$  не для всех точек (векторов)  $\mathbf{x} \in \Omega$  удастся обеспечить выполнения условия (1), т.е. некоторые векторы  $\mathbf{x}$  не будут настраиваться совокупностью параметров  $r_1, \dots, r_k$ .

Будем говорить, что вектор  $\mathbf{x}$  *настраиваем* с помощью  $\mathbf{r}$ , если существуют такие значения настроечных параметров, что  $(\mathbf{x} + \mathbf{r}) \in D$ .

В зависимости от того, каково множество векторов  $\mathbf{x} \in \Omega$ , настраиваемых с помощью выбранной совокупности настроечных параметров, можно говорить о *настроечной способности* данной совокупности параметров  $\mathbf{r}$ . В частности, если все  $\mathbf{x} \in \Omega$  настраиваемы с помощью  $\mathbf{r}$ , то выбранная совокупность настроечных параметров обеспечивает *полную настраиваемость* и, следовательно, обладает наибольшей НС. Очевидно, необходимо ввести некоторый критерий, позволяющий оценить численно настроечную способность любой выбранной совокупности настроечных параметров. Как показано в работе [2], для того чтобы вектор  $\mathbf{x}$  был настраиваем, необходимо и достаточно, чтобы его проекция на подпространство ненастраиваемых параметров  $S$  принадлежала проекции области работоспособности  $D$  на это же подпространство:  $\text{Пр}_S \mathbf{x} \in \text{Пр}_S D$ .

Вектор  $\mathbf{x}$  может принимать любые значения внутри области  $\Omega$ . Пусть известно распределение вероятностей этого вектора, заданное плотностью распределения вероятностей  $f(x_1, x_2, \dots, x_n) = f(\mathbf{x})$ .

Будем считать, что необходимость введения настроечных элементов обусловлена низким значением серийно-пригодности  $P_0$ , т.е. вероятности выхода работоспособных изделий без настройки их параметров:

$$P_0 = \underbrace{\int \dots \int}_D f(x_1, x_2, \dots, x_n) dx_1 \dots dx_n < P_{\text{тр}},$$

где  $P_{\text{тр}}$  – требуемое значение серийно-пригодности.

В случае, когда часть параметров отнесена к числу настроечных (выбран вектор настроечных параметров  $\mathbf{r} = \{r_1, \dots, r_k\}$ ), случайными остаются лишь ненастраиваемые параметры. Можно говорить, что случайная величина  $\mathbf{X}$  порождает случайную величину  $\mathbf{X}_S$ , где  $\mathbf{X}_S = \text{Пр}_S \mathbf{X}$  и  $\mathbf{X}_S \in \text{Пр}_S \Omega$ .

Плотность распределения ненастраиваемых параметров

$$\phi(\mathbf{x}_S) = \underbrace{\int \dots \int}_k f(x_1, x_2, \dots, x_n) dx_{\alpha_1} dx_{\alpha_2} \dots dx_{\alpha_k}.$$

В качестве количественной характеристики настроечной способности выбранной совокупности настроечных параметров (вектора  $\mathbf{r}$ ) естественно принять вероятность того, что случайный вектор  $\mathbf{x}$  настраиваем данным вектором настроечных параметров. Назовем ее *вероятностью успешной настройки* (ВУН) и будем обозначать  $H_{\mathbf{r}}$ . Можно показать, что

$$H_{\mathbf{r}} = P(\text{Пр}_S \mathbf{x} \in \text{Пр}_S D = \underbrace{\int \dots \int}_{\text{Пр}_S D} \phi(x_{S_1}, \dots, x_{S_{n-k}}) dx_{S_1} \dots dx_{S_{n-k}}).$$

Введение понятия настроечной способности и ВУН позволяет количественно оценить, насколько тот или иной параметр (группа параметров) пригоден для компенсации возможных

случайных отклонений параметров, сравнивать НС отдельных параметров или группы параметров, выбирать настроечные параметры, обеспечивающие требуемую или максимальную настраиваемость. Вместе с тем необходимо учитывать, что сделать переменными (регулируемыми) одни параметры легче, другие – труднее, а некоторые (например, параметры микросхем и других активных компонентов РЭА, паразитные параметры) – практически невозможно, даже если они обладают высокой НС. Кроме того, как известно, введение настроек увеличивает производственные и эксплуатационные расходы, приводит к некоторому снижению надежности по внезапным отказам и т.д. Все это необходимо учитывать при выборе той или иной совокупности настроечных параметров.

Если ввести некоторую функцию потерь, связанную с выбором той или иной совокупности настраиваемых параметров  $c(\mathbf{r}) = c(x_{\alpha_1}, \dots, x_{\alpha_k})$ , то задачу выбора оптимальной совокупности настроечных параметров можно сформулировать следующим образом.

**Задача 1.** При ограничении снизу на вероятность успешной настройки  $H_{\mathbf{r}} \geq H_{\text{тр}}$  выбрать такие настроечные параметры, при которых функция потерь минимальна, т.е. найти

$$\mathbf{r} = \arg \min \{c(x_{d_1}, \dots, x_{d_k}) / H_{\mathbf{r}} \geq H_{\text{тр}}\}, k \in [\overline{1, n}],$$

где  $(d_1 \dots d_k)$  – подмножества, по которым находится экстремум;  $H_{\text{тр}}$  – требуемое значение вероятности успешной настройки.

**Задача 2** (двойственная 1). Найти такие настроечные параметры  $r_1, \dots, r_k$ , которые обеспечивают максимум вероятности успешной настройки при заданных ограничениях на функцию потерь:

$$\mathbf{r} = \arg \max \{H_{\mathbf{r}} / c(x_{d_1}, \dots, x_{d_k}) \leq c_0\}.$$

Если хотя бы один из параметров, входящих в рассматриваемый набор, сделать настраиваемым невозможно, функцию потерь для данного набора можно положить равной  $+\infty$ .

Во многих случаях функцию потерь можно считать аддитивной

$$c(\mathbf{r}) = \sum_{i=1}^k c(x_{d_i}).$$

Если при этом параметры  $x_{d_1}, \dots, x_{d_k}$ , с помощью которых предполагается производить настройку, однородны, т.е. можно считать, что связанные с их использованием в качестве настроечных функции потерь одинаковы, то  $c(\mathbf{r}) = kc$ , и задача 1 сводится к задаче нахождения минимальной совокупности настроечных параметров, обеспечивающих заданные требования к ВУН.

Следует отметить, что на практике уже на этапе предварительного анализа удается отбросить принципиально нерегулируемые параметры (элементы) и тем самым существенно ограничить множество параметров, которые могут использоваться в качестве настроечных. На множестве таких параметров функция потерь строго возрастает с увеличением числа переменных параметров. При этом «усилия», затрачиваемые на то, чтобы сделать параметры переменными, как правило, значительно меньше потерь, вызванных необходимостью настройки большим числом параметров. Все это в большинстве случаев позволяет свести исходную задачу к задаче минимизации числа настроечных параметров [5].

В данной работе была предпринята попытка классификации и формализации некоторых задач, возникающих в процессе оптимального параметрического синтеза технических устройств и систем, для обеспечения необходимого качества функционирования и надежности которых необходимы элементы настройки. Введение количественного критерия оценки настроечной способности параметров – настроечного ресурса – позволяет выбрать рациональное число элементов настройки и дать оценку настраиваемости исследуемых систем.

Основная проблема при практической реализации сформулированных выше задач состоит в высокой вычислительной трудоемкости многократного расчета настроечной способности параметров (вероятности успешной настройки), а также возникающих в процессе поиска решения оптимизационных задач. Вместе с тем в последние годы стал активно развиваться достаточно ради-

кальный путь преодоления проблемы трудоемкости решения сложных вычислительных задач, в основе которого лежит идея распараллеливания процессов поиска конечного результата. Параллельные алгоритмы многовариантного анализа, статистического моделирования и поисковой оптимизации, приведенные в работах [2, 6–8], могут оказаться полезными и при решении задачи синтеза настраиваемых систем.

### Список литературы

1. Абрамов, О. В. Методы и алгоритмы параметрического синтеза стохастических систем / О. В. Абрамов // Проблемы управления. – 2006. – № 4. – С. 3–8.
2. Абрамов, О. В. Об использовании параллельных вычислений в задачах оптимального параметрического синтеза / О. В. Абрамов // Надежность и качество : тр. Междунар. симп. : в 2 т. / под ред. Н. К. Юркова. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2009. – Т. 1. – С. 49–52.
3. Абрамов, О. В. Некоторые особенности задачи оптимального параметрического синтеза / О. В. Абрамов // Надежность и качество : тр. Междунар. симп. : в 2 т. / под ред. Н. К. Юркова. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2011. – Т. 1. – С. 3–5.
4. Таньков, Г. В. К вопросу оценки погрешности цифрового моделирования упругих деформаций тел вращения / Г. В. Таньков // Надежность и качество : тр. Междунар. симп. : в 2 т. / под ред. Н. К. Юркова. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2012. – Т. 1. – С. 248–249.
5. Абрамов, О. В. Выбор параметров настройки технических устройств и систем / О. В. Абрамов // Проблемы управления. – 2011. – № 4. – С. 13–19.
6. Абрамов, О. В. Технология параллельных вычислений в задачах анализа и оптимизации / О. В. Абрамов, Я. В. Катуева // Проблемы управления. – 2003. – № 4. – С. 11–15.
7. Абрамов, О. В. Параллельные алгоритмы расчета и оптимизации надежности по постепенным отказам / О. В. Абрамов // Автоматика и телемеханика. – 2010. – № 7. – С. 126–135.
8. Горячев, Н. В. Исследование и разработка средств и методик анализа и автоматизированного выбора систем охлаждения радиоэлектронной аппаратуры / Н. В. Горячев, М. К. Танатов, Н. К. Юрков // Надежность и качество сложных систем. – 2013. – № 3. – С. 70–75.

УДК 621.396.6.07.019.3

*Абрамов, О. В.*

**Проектирование технических систем с элементами настройки** / О. В. Абрамов // Надежность и качество сложных систем. – 2014. – № 2(6). – С. 51–55.

*Абрамов Олег Васильевич*

доктор технических наук, профессор,  
начальник отдела надежности и качества,  
Учреждение Российской академии наук,  
Институт автоматизации  
и процессов управления ДВО РАН  
(690041, Россия, г. Владивосток, ул. Радио, 5)  
E-mail: abramov@iacp.dvi.ru

**Аннотация.** Рассматривается проблема оптимального проектирования технических устройств и систем, для обеспечения требуемого качества функционирования которых необходимо осуществлять настройку их параметров. Сформулированы основные задачи параметрического синтеза настраиваемых систем.

**Ключевые слова:** параметр, настройка, техническая система, работоспособность, надежность, параметрический синтез, оптимизация.

*Abramov Oleg Vasil'evich*

doctor of technical sciences, professor,  
the division head of reliability and quality,  
The establishment of the Russian academy of sciences,  
Institute of automation and control processes  
DVO Russian Academy of Science  
(690041, 5 Radio street, Vladivostok, Russia)

**Abstract.** The problem of optimum designing of engineering devices and systems is considered, for maintenance of demanded which quality of functioning it is necessary to carry out adjustment of their parameters. The primary goals arising in the course of parametrical synthesis of adjusted systems are formulated.

**Key words:** parameter, adjustment, working capacity, engineering system, reliability, parametrical synthesis, optimization.

## МЕТОДИКИ ВХОДНОГО КОНТРОЛЯ ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ

А. В. Светлов, М. Ю. Паршуков, В. В. Комаров, Е. В. Сапунов

### *Введение*

Параметры узлов и изделий радиоэлектронной аппаратуры (РЭА), а также ее надежность во многом определяются качеством используемых полупроводниковых элементов. Затраты на выявление и замену элементов, не соответствующих техническим требованиям, многократно возрастают при обнаружении отказа на каждой последующей стадии производства РЭА (входной контроль – установка элементов и монтаж плат – испытания – эксплуатация). Поэтому технический контроль элементов необходимо проводить на самом раннем этапе производства – на входном контроле. Задачей входного контроля комплектующих полупроводниковых элементов является не только определение их соответствия требованиям технических условий, но и рассортировка элементов на группы по измеренным значениям параметров и отбор комплектующих для наиболее критичных применений. Важнейшими элементами современной аналоговой электронной техники являются интегральные операционные усилители (ОУ). Проблема повышения производительности и достоверности входного контроля ОУ является актуальной.

### *1. Систематизация методик входного контроля ОУ*

Методы измерений статических и динамических параметров ОУ регламентированы в 17 нормативных документах (ГОСТ 23089.1-83 – 23089.17-83). Практическая реализация этих методов с использованием комплекта отдельных измерительных приборов (генераторов сигналов, вольтметров, осциллографов) требует больших затрат времени на коммутацию, настройку приборов и считывание их показаний. Такой подход применим только для выборочного исследования отдельных экземпляров микросхем. Для массового входного контроля ОУ необходима разработка специализированных методик и средств, выбор которых определяется спецификой производимой продукции. На предприятиях, производящих бытовую электронику, можно ограничиться оценкой работоспособности ОУ. При производстве изделий электронной техники специального назначения необходимы количественные оценки параметров ОУ. Исходя из глубины и объема контроля, можно предложить следующую систематизацию методик входного контроля ОУ:

1. Проверка работоспособности ОУ, в результате которой отбраковываются полностью неработоспособные микросхемы. Такая проверка является обязательной и в качестве первой стадии контроля входит во все методики, поскольку позволяет сэкономить время и исключить возможность вывода из строя дорогостоящего измерительного оборудования в случае короткого замыкания в испытуемой микросхеме. На предприятиях, производящих бытовую электронику, входной контроль, как правило, ограничивается только проверкой работоспособности ОУ.

2. Контроль электрических параметров ОУ в объеме, ограниченном возможностями имеющихся на предприятиях промышленных тестеров аналоговых интегральных схем. В отечественном приборостроении наиболее широко применяются:

- универсальный тестер функционального контроля и параметрических измерений цифровых и аналоговых микросхем FORMULA 2K;
- тестер операционных усилителей, разработанный ОАО «ЦНИИИА»;
- измеритель параметров аналоговых интегральных схем Л2-71.

Все перечисленные выше промышленные тестеры аналоговых интегральных схем предназначены для контроля только лишь статических параметров ОУ и не позволяют контролировать такие важные динамические параметры, как частота единичного усиления и запас по фазе на этой частоте, максимальная скорость нарастания выходного напряжения.

3. Контроль электрических параметров ОУ в объеме, установленном техническими условиями (ТУ) на интегральные схемы, включая все статические и динамические параметры ОУ, пере-

численные в паспорте. Для организации такого контроля необходима разработка автоматизированных аппаратно-программных комплексов (АПК), обладающих высокой производительностью, гибкостью и многофункциональностью [1]. Кроме процедур контроля электрических параметров, такие комплексы могут обеспечить также автоматизированное создание паспорта и Spice-макромодели каждого экземпляра микросхемы [2]. Методика входного контроля ОУ с оценкой его статических и динамических параметров рассмотрена ниже.

## 2. Методика проверки работоспособности ОУ

В простейшем случае проверка работоспособности ОУ может выполняться без проведения каких-либо измерений. При этом проверяемый ОУ включается в тестовую схему усилителя или автогенератора. О работоспособности ОУ судят по наличию на выходе схемы сигнала требуемой амплитуды или частоты, оцениваемых на слух или визуально. Достоинством такой методики является предельная простота и дешевизна реализации, а недостатком – условность контроля из-за отсутствия какого-либо метрологического обеспечения.

Более высокую достоверность контроля обеспечивает методика, предусматривающая выполнение следующих простейших измерительных процедур:

1. Измерение тока потребления ОУ  $I_{\text{пот}}$  по каждому из выводов питания при подаче на них номинальных положительного и отрицательного напряжений. Если ток потребления по какому-либо из питающих выводов окажется нулевым, то это может означать обрыв вывода. Если же ток потребления значительно превышает номинальный, то это говорит о том, что поврежден кристалл ОУ или имеется внутреннее замыкание между выводами. И в том, и в другом описанных случаях дальнейший контроль не имеет смысла. Процедуру контроля можно продолжить только при значениях тока потребления  $I_{\text{пот}}$ , близких к номинальному значению  $I_{\text{пот ном}}$ , указываемому в справочниках или ТУ на микросхемы, например, для ОУ К544УД2  $I_{\text{пот ном}} = 7 \text{ мА}$  [3]. Учитывая разброс параметров ОУ, можно установить следующие границы допустимых значений тока потребления:

$$0,5 I_{\text{пот ном}} \leq I_{\text{пот}} \leq 1,5 I_{\text{пот ном}} . \quad (1)$$

2. Контроль выходного напряжения ОУ при отсутствии сигнала на входе и полной отрицательной обратной связи. При этом в случае исправности выходного каскада выходное напряжение ОУ равно напряжению смещения нуля входного каскада. У работоспособного ОУ общего применения значение этого параметра не превышает нескольких десятков милливольт. Если выходное напряжение близко к одному из напряжений питания, то это говорит о пробое одного из плеч схемы. Выполнение дальнейших измерений при этом надо прекратить, так как это опасно для измерительной аппаратуры. Испытания следует продолжить при выходном напряжении ОУ, не превышающем допустимого напряжения смещения нуля входного каскада:

$$|U_{\text{вых ОУ}}| \leq |U_{\text{см доп}}| \text{ при } U_{\text{вх ОУ}} = 0 . \quad (2)$$

Еще одна возможная неисправность ОУ заключается в одновременном выходе из строя транзисторов обоих плеч выходного каскада, при этом выходное напряжение также будет близко к нулю. Поэтому проверки выполнения условий (1) и (2) недостаточно. Необходим еще один следующий тест, подтверждающий работоспособность всех трактов ОУ в целом.

3. Проверка компенсации синфазной составляющей входного сигнала и усиления его дифференциальной составляющей выполняется при включении испытуемого ОУ в схему, изображенную на рис. 1.

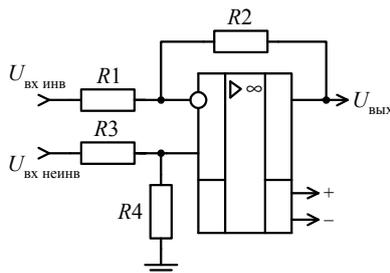


Рис. 1. Схема проверки компенсации синфазных и усиления дифференциальных сигналов

Для проверки компенсации синфазных сигналов на инвертирующий и неинвертирующий входы измерительной схемы подаются одинаковые тестовые сигналы, например:  $U_{\text{вх инв}} = +1 \text{ В}$  и  $U_{\text{вх неинв}} = +1 \text{ В}$ . При равенстве сопротивлений  $R1 = R2 = R3 = R4$  напряжение на выходе испытуемого ОУ должно быть равно разности входных напряжений, т.е. близко к нулю.

Для проверки усиления дифференциальных сигналов на входы схемы подаются тестовые сигналы противоположной полярности, например,  $U_{\text{вх инв}} = -1 \text{ В}$  и  $U_{\text{вх неинв}} = +1 \text{ В}$ . Напряжение на выходе должно быть равным сумме абсолютных значений напряжений, т.е. 2 В.

Если функция сложения и вычитания аналоговых сигналов выполняется успешно, т.е.

$$\begin{cases} U_{\text{вых ОУ}} = 0 & \text{при } U_{\text{вх инв}} = U_{\text{вх неинв}} \\ U_{\text{вых ОУ}} = 2U_{\text{вх инв}} & \text{при } U_{\text{вх инв}} = -U_{\text{вх неинв}} \end{cases} \quad (3)$$

то можно сделать вывод о работоспособности испытуемого ОУ.

Рассмотренная методика проверки работоспособности ОУ может быть дополнена контролем напряжений на выводах ОУ, предназначенных для подключения внешних цепей коррекции и балансировки (имеются не у всех типов ОУ). Указанные напряжения должны находиться в пределах диапазона допустимых значений, найденного путем статистических экспериментальных исследований [4].

Достоверность результатов контроля работоспособности ОУ путем последовательной проверки выполнения перечисленных условий по разным оценкам может лежать в пределах 0,8 – 0,9 [5], что приемлемо только при производстве аппаратуры неотчетливого гражданского применения [6].

### 3. Методика входного контроля ОУ с оценкой его параметров

Автоматизированный входной контроль ОУ с оценкой его статических и динамических параметров, установленных требованиями ТУ, осуществляется с помощью разработанного авторами АПК [7]. Для проведения входного контроля ОУ предложена методика, предусматривающая следующие этапы функционирования АПК и взаимодействия оператора с программой, управляющей работой комплекса:

1. Подготовка АПК к работе производится автоматически и включает в себя запуск аппаратной части и программной оболочки, а также самотестирование аппаратной части комплекса, заключающееся в сквозном тестировании измерительных каналов, при котором сигналы с выходов формирователей поступают в каналы обработки. Если все параметры измерительных каналов в норме, то программа переходит к выполнению следующих процедур. Если имеются отклонения параметров системы от нормы, то работа комплекса останавливается, формируется код ошибки, выключается питание аппаратной части и выдается сообщение об ошибке, в соответствии с которым оператор может устранить неисправность.

2. Ввод информации об ОУ производится в автоматизированном режиме: оператором выбирается наименование ОУ из предлагаемого перечня, после чего программой из базы данных извлекается необходимая информация:

- схема расположения и назначение выводов микросхемы, тип корпуса;
- номинальные значения положительного и отрицательного напряжений питания;
- указанные в ТУ минимальные и максимальные допустимые значения электрических параметров, используемые при разбраковке ОУ.

При отборе микросхем для конкретных применений оператор может самостоятельно установить границы поля допусков параметров ОУ. Оператор также может дополнить базу данных сведениями об ОУ с новыми наименованиями. При вводе новой информации используется предлагаемый программой шаблон.

3. Установка ОУ в тестовую панель с переходной платой, номер которой указывается в сообщении, выдаваемом программой с учетом сведений, полученных из базы данных. Завершение установки ОУ подтверждается оператором нажатием кнопки на лицевой панели виртуального прибора, управляющего работой АПК.

4. Автоматизированная проверка работоспособности ОУ в соответствии с методикой, описанной выше, осуществляется с целью своевременной отбраковки негодных ОУ и оценки возможности безопасного выполнения дальнейших измерительных процедур.

5. Автоматизированное измерение статических и динамических параметров ОУ обеспечивается программным управлением режимами работы аппаратной части комплекса, включая:

- коммутацию измерительных цепей при переходе от одного измеряемого параметра к другому;
- подачу питающих напряжений;
- формирование тестовых синусоидальных и импульсных сигналов;
- проведение измерений, регистрацию и обработку их результатов.

Программное управление аппаратной частью АПК обуславливает его multifunctionality и высокую производительность.

6. По измеренным значениям параметров ОУ программой составляется и выдается в виде файла и в распечатанном на бумаге виде паспорт ОУ, в котором указываются фактические параметры данного экземпляра микросхемы.

7. Автоматизированный допусковый контроль ОУ, осуществляемый путем сравнения измеренных значений параметров ОУ с заданными границами поля допустимых значений параметров, позволяет отобрать ОУ, параметры которых соответствуют установленным требованиям. При предварительном задании нескольких границ поля допустимых значений параметров ОУ возможна разбраковка микросхем на большее число групп в зависимости от значений контролируемых параметров.

Для реализации предложенной методики входного контроля ОУ разработан алгоритм, блок-схема которого приведена на рис. 2. После самотестирования аппаратной части комплекса и ввода необходимой информации запускается цикл контроля параметров ОУ, начинающийся с установки ОУ в тестовую панель и заканчивающийся составлением паспорта ОУ и сообщением о принадлежности ОУ к той или иной группе разбраковки по значениям параметров. Цикл повторяется до тех пор, пока не будет протестировано необходимое (заданное заранее) количество экземпляров ОУ или пока оператор не нажмет кнопку «Остановить тестирование» на лицевой панели виртуального прибора.

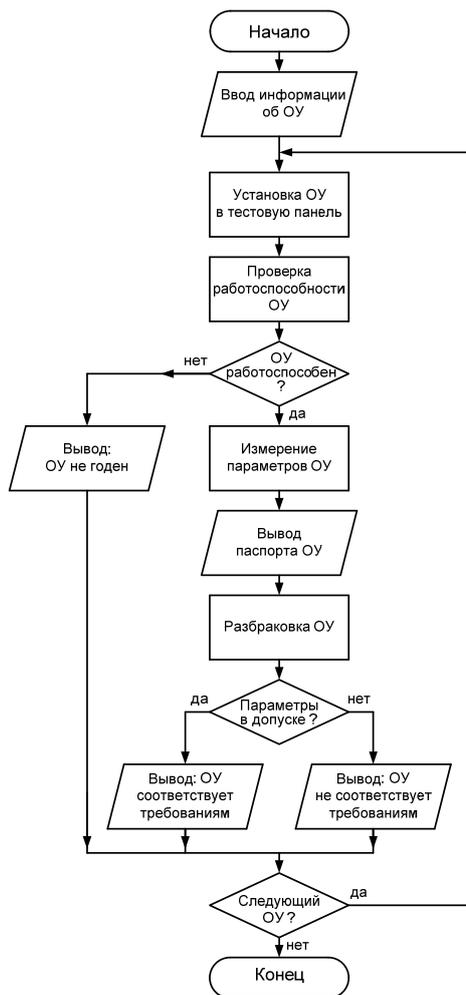


Рис. 2. Блок-схема алгоритма входного контроля ОУ

В соответствии с рассмотренными методикой и алгоритмом в среде LabVIEW разработано программное обеспечение аппаратно-программного комплекса для входного контроля и измерения параметров ОУ.

### Список литературы

1. Принципы построения аппаратно-программных комплексов для формирования и измерения параметров импульсных сигналов / А. В. Светлов, М. Ю. Паршуков, И. В. Ханин, П. Мишра // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2009. – № 3. – С. 102–112.
2. Методика обработки результатов измерений параметров операционного усилителя / А. В. Светлов, М. Ю. Паршуков, С. Ю. Байдаров, В. В. Комаров // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2011. – № 4. – С. 128–140.
3. Операционные усилители и компараторы. – М. : Додэка-XXI, 2001. – 560 с.
4. Цыпин, Б. В. Диагностика интегральных операционных усилителей, установленных на платах / Б. В. Цыпин, Н. К. Юрков // Измерительная техника. – 2002. – № 2. – С. 64–66.
5. Измерение динамических параметров операционных усилителей с применением цифровых формирователей сигналов / А. В. Светлов, М. Ю. Паршуков, В. В. Комаров, Е. В. Сапунов // Надежность и качество : тр. Междунар. симп. : в 2 т. / под ред. Н. К. Юркова. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2013. – Т. 1. – С. 62–65.
6. Литвинов, А. Н. Моделирование напряженно-деформированного состояния в слоистых структурах РЭС при технологических и эксплуатационных воздействиях / А. Н. Литвинов, Н. К. Юрков // Надежность и качество сложных систем. – 2013. – № 3. – С. 16–22.
7. Использование технологии виртуальных приборов при разработке аппаратно-программного комплекса для измерения параметров операционных усилителей / А. В. Светлов, М. Ю. Паршуков, С. Ю. Байдаров, В. В. Комаров // Надежность и качество : тр. Междунар. симп. : в 2 т. / под ред. Н. К. Юркова. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2012. – Т. 2. – С. 7–10.

### УДК 621.317.3

**Методики входного контроля операционных усилителей** / А. В. Светлов, М. Ю. Паршуков, В. В. Комаров, Е. В. Сапунов // Надежность и качество сложных систем. – 2014. – № 2(6). – С. 56–61.

#### **Светлов Анатолий Вильевич**

доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой радиотехники  
и радиоэлектронных систем,  
Пензенский государственный университет  
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: rtech@pnzgu.ru

#### **Паршуков Максим Юрьевич**

инженер, аспирант,  
кафедра радиотехники и радиоэлектронных систем,  
Пензенский государственный университет  
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: parshucow@bk.ru

#### **Комаров Всеволод Владимирович**

инженер, аспирант,  
кафедра радиотехники и радиоэлектронных систем,  
Пензенский государственный университет  
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: v.komarov09@ Rambler.ru

#### **Сапунов Евгений Владимирович**

инженер, аспирант,  
кафедра радиотехники и радиоэлектронных систем,  
Пензенский государственный университет  
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: rtech@pnzgu.ru

#### **Svetlov Anatoliy Vil'evich**

doctor of technical sciences, professor,  
head of sub-department of radio engineering  
and radio electronic systems,  
Penza State University  
(440026, 40 Krasnaya street, Penza, Russia)

#### **Parshukov Maksim Yur'evich**

engineer, postgraduate student,  
sub-department of radio engineering  
and radio electronic systems,  
Penza State University  
(440026, 40 Krasnaya street, Penza, Russia)

#### **Komarov Vsevolod Vladimirovich**

engineer, postgraduate student,  
sub-department of radio engineering  
and radio electronic systems,  
Penza State University  
(440026, 40 Krasnaya street, Penza, Russia)

#### **Sapunov Evgeniy Vladimirovich**

engineer, postgraduate student,  
sub-department of radio engineering  
and radio electronic systems,  
Penza State University  
(440026, 40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Аннотация.** Рассмотрены методика проверки работоспособности операционных усилителей и методика входного контроля операционных усилителей с автоматизированным измерением статических и динамических параметров, составлением паспорта и разбраковкой операционных усилителей. Приведена блок-схема алгоритма, реализующего методику входного контроля.

**Ключевые слова:** операционный усилитель, параметры, методика, проверка работоспособности, контроль параметров.

**Abstract.** Considered technique of operability test operational amplifiers and incoming inspection method of the operational amplifiers with the automated measurement of static and dynamic parameters, the certificates and grading of operational amplifiers. Was given a flowchart that implements an incoming inspection procedure.

**Key words:** operational amplifier, parameters, method, operability test, parameters check.

## КОМПЛЕКС ОБНАРУЖЕНИЯ И БОРЬБЫ С МАЛОГАБАРИТНЫМИ БЕСПИЛОТНЫМИ ЛЕТАТЕЛЬНЫМИ АППАРАТАМИ

А. И. Годунов, С. В. Шишков, Н. К. Юрков

Научно-технический прогресс за последние два десятилетия совершил несколько революций, которые привели к большому прорыву в вопросах использования ЭВМ, искусственного интеллекта, роботизированных комплексов в новом витке «гонки» высокоточного вооружения между конфликтующими сторонами. В ближайшем времени будет полностью стерта грань между беспилотными летательными аппаратами (БЛА), роботизированными комплексами и высокоточным оружием на основе использования технического (компьютерного) зрения и управления средствами поражения искусственным интеллектом [1].

В соответствии с проведенным анализом классификации БЛА по их основным характеристикам с учетом существующих комплексов ПВО и их возможности обнаружения БЛА разделяются на две основные группы:

1) малогабаритные беспилотные летательные аппараты (МБЛА), масса которых достигает от нескольких грамм до 50 кг, имеющие большую массовость производства (соответственно использования) и низкую уязвимость к существующим средствам борьбы с воздушными целями;

2) БЛА, масса которых от 50 кг и выше, имеющие большую стоимость производства и уязвимость наравне с самолетами к существующим средствам борьбы с ними.

Тактика применения МБЛА разнообразна и включает в себя не только полет на предельно малых высотах, в складках местности, применение активных и пассивных помех, снижение радиозаметности, уровня инфракрасного излучения и акустического шума, но и высочайшую маневренность (вплоть до остановки («зависания») МБЛА в складках местности с последующим изменением траектории полета). Траектории полета МБЛА могут проходить на предельно малых высотах – 0,5...2 м, в широком диапазоне скоростей – 0...400 км/ч, в ущельях и оврагах, в тени от местных возвышенностей и за горизонтом, и поэтому их обнаружение РЛС войсковых зенитно-ракетных комплексов (ЗРК) осуществить в этих условиях невозможно [2].

Концепция развития МБЛА постоянно меняется и развивается. Последний совершенно новый тип МБЛА будущего, планируемый к применению армией США, называется «Доминейтор» (от англ. «Dominator»), которые автоматически образуют группы «Constilation» и вооружены по четыре боеголовки.

Последние события осетино-грузинского конфликта показали неспособность существующих средств борьбы противостоять МБЛА, а использование перспективных МБЛА с искусственным интеллектом может привести к полному поражению ВВТ и объектов военной техники в процессе вооруженного противоборства. Для решения данной проблемы необходима разработка новых принципов и технических решений в борьбе с МБЛА.

Борьба с МБЛА включает в себя комплекс задач по их обнаружению и распознаванию, принятию решения по скрытности ВВТ и ОВТ от средств разведки и прицеливания МБЛА или их захвата и поражения. Задача по обнаружению (распознаванию) МБЛА и оценка эффективности их применения очень актуальны.

Для решения проблемы обнаружения малогабаритных беспилотных летательных аппаратов (МБЛА) был предложен целый комплекс методов и технических решений на основе различных принципов получения и обработки информации в оптическом диапазоне электромагнитных волн.

В случае наземного наблюдения, которое ведется с наблюдательных постов в любой обстановке и в различных диапазонах электромагнитных волн, наиболее эффективны оптико-электронные и акустоэлектрические средства в триплексе с радиолокационными средствами наблюдения. Основным каналом наблюдения является оптико-электронный с поддиапазонами (ультрафиолетовым, видимым и инфракрасным) [3].

Разработаны активные и пассивные методы обнаружения МБЛА в оптическом диапазоне электромагнитных волн (рис. 1).

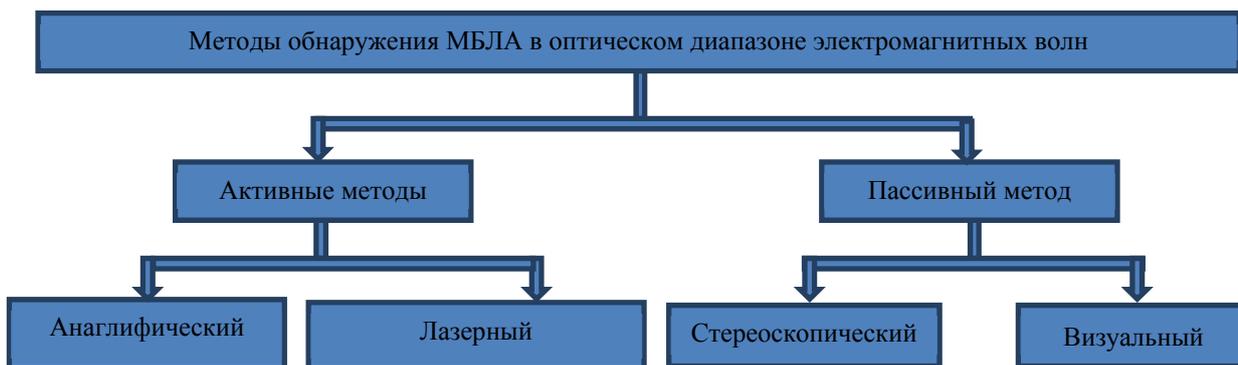


Рис. 1. Методы обнаружения МБЛА в оптическом диапазоне электромагнитных волн

Активными методами считаем метод анаглифов и метод определения координат МБЛА в пространстве [4], а пассивные методы включают в свой состав метод визуального наблюдения [5] и метод комбинированного стереоэффекта [6].

Разработанные методы обеспечиваются разработанными техническими решениями в виде устройств, которые обеспечивают обнаружение МБЛА.

Устройство анаглифического обнаружения МБЛА может быть выполнено на основе камер наблюдения (фотоприемников в виде матриц ПЗС), источников подсветки, анаглифических фильтров, блока предварительной обработки изображений, процессора анализа и обработки изображений, канала вывода информации, блока питания.

Разработанные методы обеспечены устройствами, которые обнаруживают и определяют местоположение в пространстве МБЛА, но необходимо учесть применение в разрабатываемом комплексе следующих показателей: круговой обзор на  $360^\circ$  по горизонтали и на  $180^\circ$  по вертикали, параллельной работе в оптическом, звуковом и радиолокационном диапазоне электромагнитных волн, возможности размещения на подвижных объектах и создания достоверного трехмерного объемного изображения МБЛА и определения его дальнейшего направления движения для прицеливания.

Многоканальное устройство обнаружения МБЛА и прицеливания работает следующим образом: три и более пространственно-разнесенные точки на гиростабилизирующихся платформах 1, связанных между собой рабочими базами 2, автоматически определяют расстояния между собой и свои пространственные координаты, что позволяет разместить в любых удобных местах, как на подвижном объекте, так и стационарном (рис. 2).

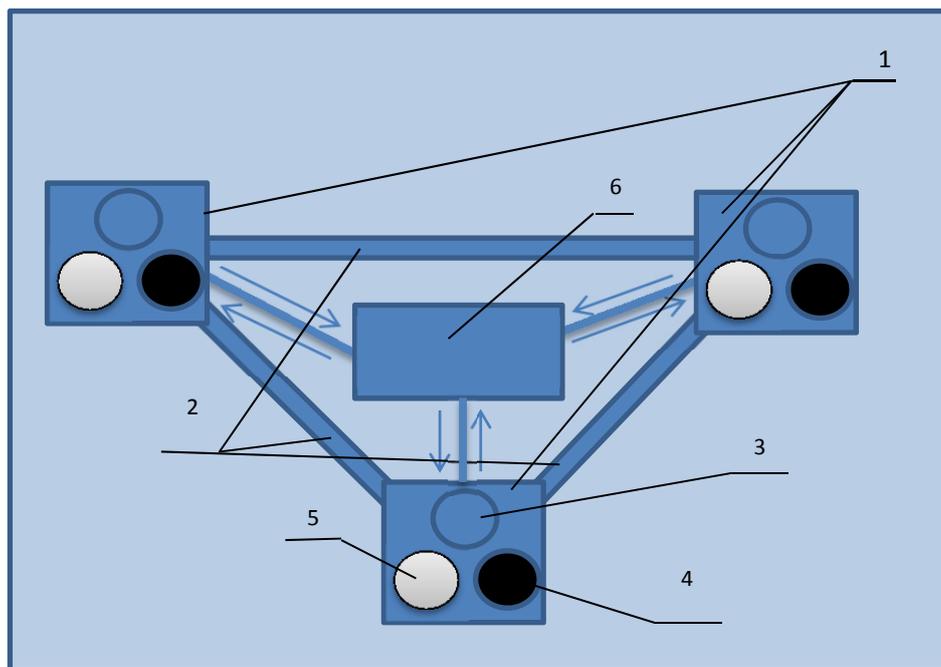


Рис. 2. Многоканальное устройство обнаружения МБЛА и прицеливания

Из рис. 2 следует, что на каждой базе размещено по три датчика: датчик 3 (камера кругового обзора), работающий в оптическом диапазоне, датчик 4, работающий в акустическом диапазоне и датчик 5, работающий в трех и более настраиваемых радиолокационных диапазонах электромагнитных волн. Управление работой и обработкой полученной информации осуществляется ЭВМ 6 с элементами искусственного интеллекта, которая сама выбирает наиболее эффективные датчики для более точного обнаружения и определения пространственных координат МБЛА в различных условиях. Одновременная регистрация кадров видеопоследовательности и определения геометрических и цветовых изменений сформированных изображений (контрольное (наиболее ярко-выраженное) и сравниваемое-цифровое изображения) регистрируют одновременно для каждого фрагмента тремя и более идентичными видеосистемами (датчиками) 3 на основе многоэлементных высокоскоростных фотоприемников (рис. 2).

Пространственные координаты по информационному лазерному каналу 7 (рис. 3) через входное и выходное устройства, расположенные на гиростабилизированной платформе 8, поступают в систему поражения.

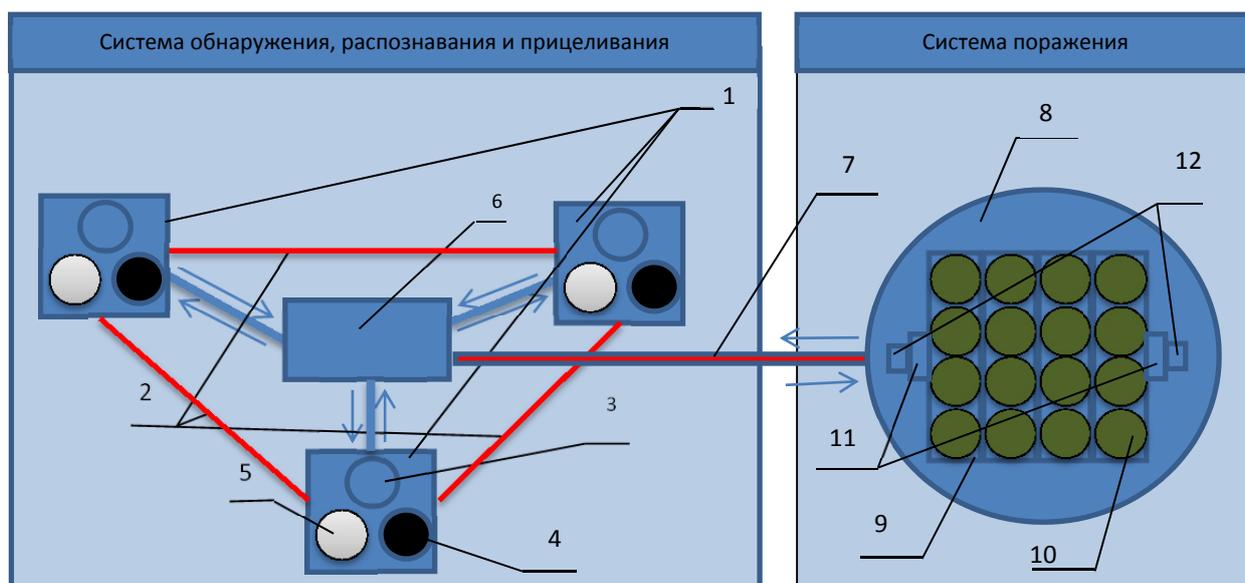


Рис. 3. Система обнаружения и поражения МБЛА

Гиростабилизированная платформа 8 предназначена для устойчивой работы боевой части пакета направляющих, с кассетным заряданием, для поражения МБЛА противника во время стрельбы, размещения блока питания, кругового беспроводного соединения с ЭВМ 6 и крепления механизмов наведения пакета направляющих 9 для установки контейнера 10 с шестнадцатью и более ракетами. Наведение пакета направляющих 9 осуществляется с помощью механизмов горизонтального наведения 14 (рис. 4) и вертикального наведения 11 с помощью электродвигателей, питание которых поступает через вилку карданного подвеса 12.

Ракета состоит: головная часть 15 с оперением для устойчивого полета, элементы поражения 16, взрывчатого вещества и детонатора с замедлителями 17, двигателя на твердом топливе 18. Установка таймера замедлителя и пуск ракеты производится с помощью электродатчика 19, сигналом переданного с ЭВМ 6. Ракеты размещаются в контейнере, а их пуск осуществляется по выбору ЭВМ 6 в зависимости от класса МБЛА. Перезарядка осуществляется кассетной установкой ракет в направляющую.

Разработанный комплекс обнаружения для борьбы с МБЛА работает в комплексе со средствами поражения. Комплекс поражения МБЛА работает в следующей последовательности: одновременно регистрируя кадры видеопоследовательности и определения геометрических и цветовых изменений сформированных изображений [7] согласно рис. 4, контрольное (наиболее ярко-выраженное) и сравниваемое цифровые изображения регистрируют одновременно для каждого фрагмента изображений тремя и более идентичными видеосистемами (датчиками) 3 на основе многоэлементных высокоскоростных фотоприемников 13. Анализ изображений проводится на ЭВМ 6, где определяются величины смещения  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$  (рис. 4) характерных фрагментов 20 (рис. 5) сравниваемого изображения с аналогичными фрагментами контрольного при максимально возможном их совпадении в направлении параллактического смещения 21.

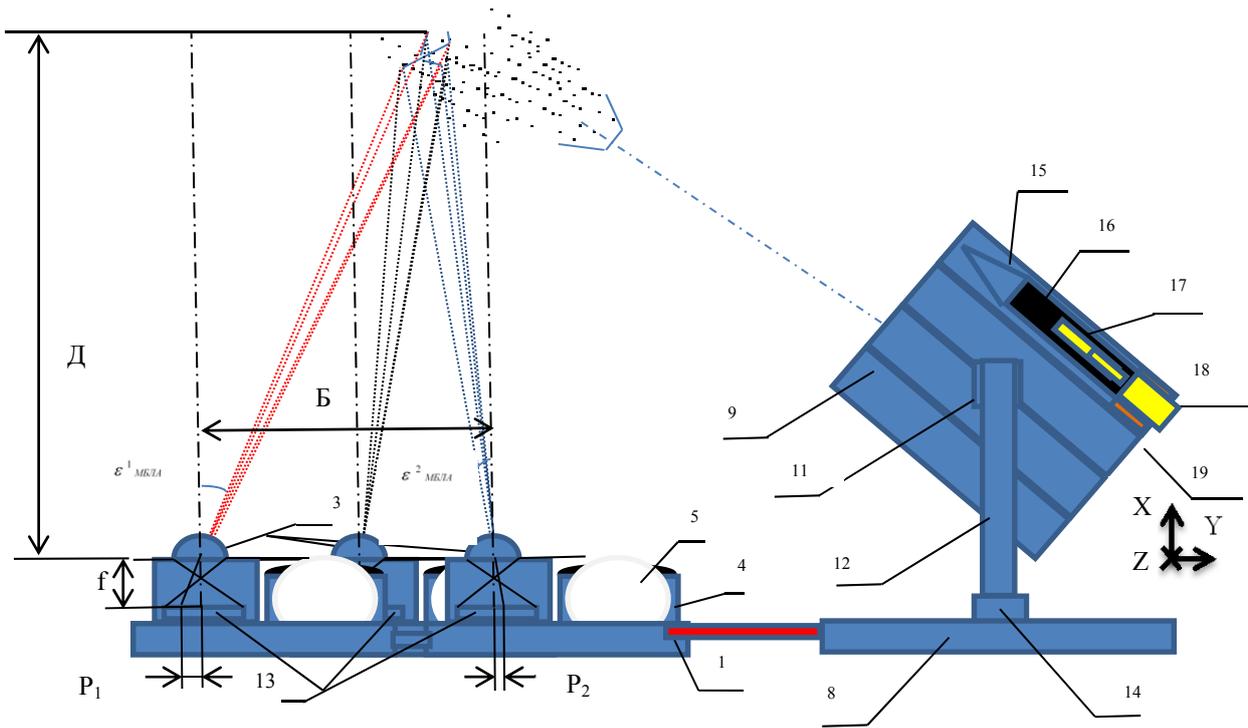


Рис. 4. Работа комплекса поражения МБЛА

Сущность измерения расстояния до МБЛА заключается в суммарном определении линейного параллакса, которое рассчитывается между двумя датчиками 1–2 (2–3, 1–3 или 1–i), одновременно по трем и более базам (рис. 5) по формуле  $D = B / \text{tg } \epsilon_{\text{МБЛА}}$  (стереоскопический базовый метод измерения дальности). Дальность  $D$  до МБЛА определяется по величине параллактического угла  $\epsilon_{\text{МБЛА}}$  определяемой суммой  $\epsilon_{\text{МБЛА}} = \epsilon^1_{\text{МБЛА}} + \epsilon^2_{\text{МБЛА}} = P_1/f + P_2/f$  и по величине базы между датчиками  $B$  [2]. Использование трех и более приемных устройств позволяет определять достоверные трехмерные объемные изображения МБЛА.

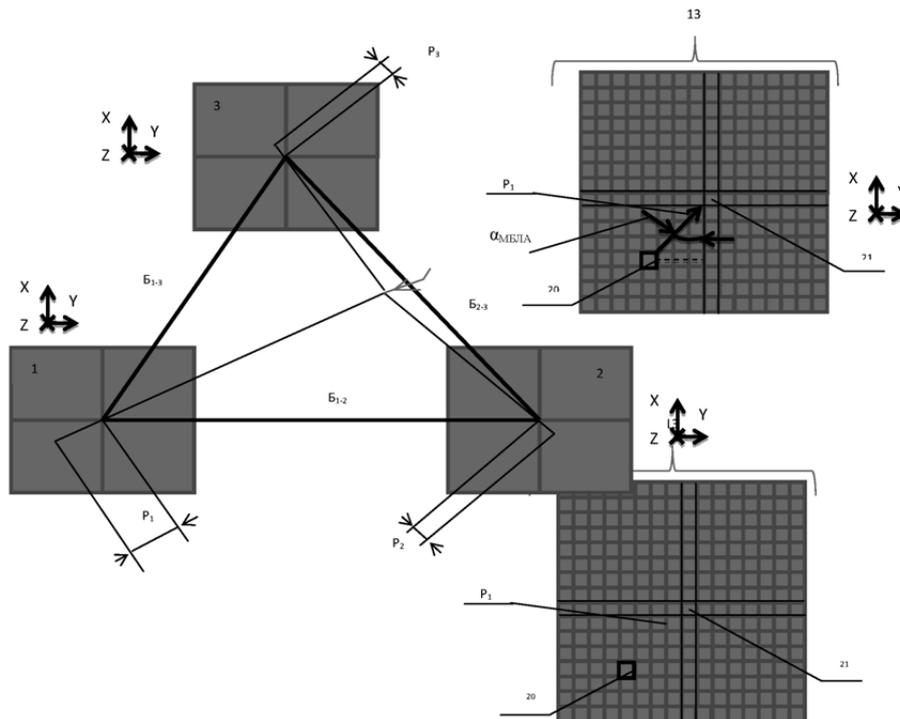


Рис. 5. Схема матриц для определения расстояния и пространственных координат МБЛА

Для наиболее достоверного обнаружения МБЛА в условиях плохой видимости, когда оптический канал по выбору ЭВМ 6 не эффективно использовать (густой туман, полная темнота и т.д.), в процессе обнаружения используется звуковой и радиолокационный каналы. Датчики 4 и 5 размещены совместно на гиросtabilизирующих платформах 1 и параллельно фиксируют появление объекта, и также с помощью ЭВМ 6 определяют пространственные координаты МБЛА в звуковом и радиолокационном диапазонах электромагнитных волн.

Используя определенные координаты датчиков 3 и углы направления  $\epsilon_{\text{МБЛА}}^1$ ,  $\epsilon_{\text{МБЛА}}^2$ , ЭВМ 6 рассчитывает пространственные координаты МБЛА и гиросtabilизированной боевой части пакета направляющей в оптическом диапазоне электромагнитных волн. По полученным пространственным координатам, ЭВМ 6 определяет скорость и направление движения, что позволяет производить сопровождение МБЛА и прицеливание. При определении противника пространственные координаты передаются на механизмы наведения, которые разворачивают направляющие в стороны МБЛА и производится выстрел одной гранатой (рис. 6). На расчетной высоте с помощью детонатора происходит подрыв взрывчатого вещества 17, при взрыве которого элементы поражения 16 разлетаются по строго секционной направленности, имея максимальную эффективность поражения МБЛА. Используя датчики обнаружения, ЭВМ 6 оценивает попадание, при необходимости повторяет выстрел или переходит в пассивный режим работы, используя систему обнаружения. Вариант размещения разработанной системы обнаружения и прицеливания и системы поражения на подвижном объекте показан на рис. 7.

Учитывая размеры современных и перспективных БЛА, а также установку на них антирадарных покрытий, наибольшую эффективность дает применение двухчастотных импульсных радиолокаторов. Первая группа частот в дециметровом диапазоне, вторая в сантиметровом для обнаружения МБЛА. Данные локаторы широко применяются в войсковых средствах ПВО. Комбинируем локатор в двухчастотный. Для увеличения скрытности системы возможно использование сравнительно маломощных моноимпульсных локаторов. А при длине посылки более 8 периодов СВЧ-колебаний применяем ФАР. Применение специальных методов позволяет использовать ФАР и при более коротких посылках. Такая система реализуется в диапазоне частот ниже 600 МГц. Аппаратура радиоперехвата и радиоподавления включает в себя широкодиапазонные анализаторы принимаемых сигналов, которые могут использоваться как анализаторы находящихся вблизи телевизионных передатчиков МБЛА. Эти сигналы имеют определенную специфику и легко распознаются.

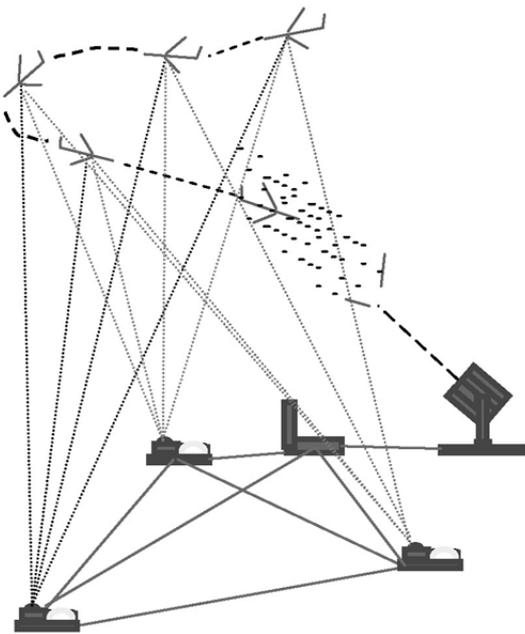


Рис. 6. Схема работы комплекса

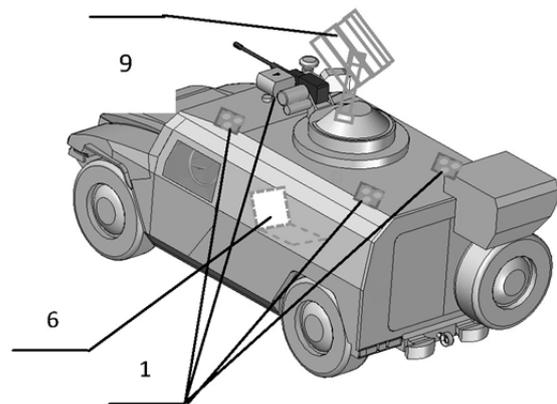


Рис. 7. Вариант размещения комплекса

Для укомплектования больших систем достаточно трех точек установки радиопеленгаторов. Для радиоподавления достаточно нескольких 50-ваттных телевизионных передатчиков телевизионных сигналов с диаграммой направленности в сторону противника. При этом возможно ретранслировать на требуемой частоте программы каких-либо гражданских телеканалов. Структура управления комплексным методом борьбы с МБЛА представлена на рис. 8.

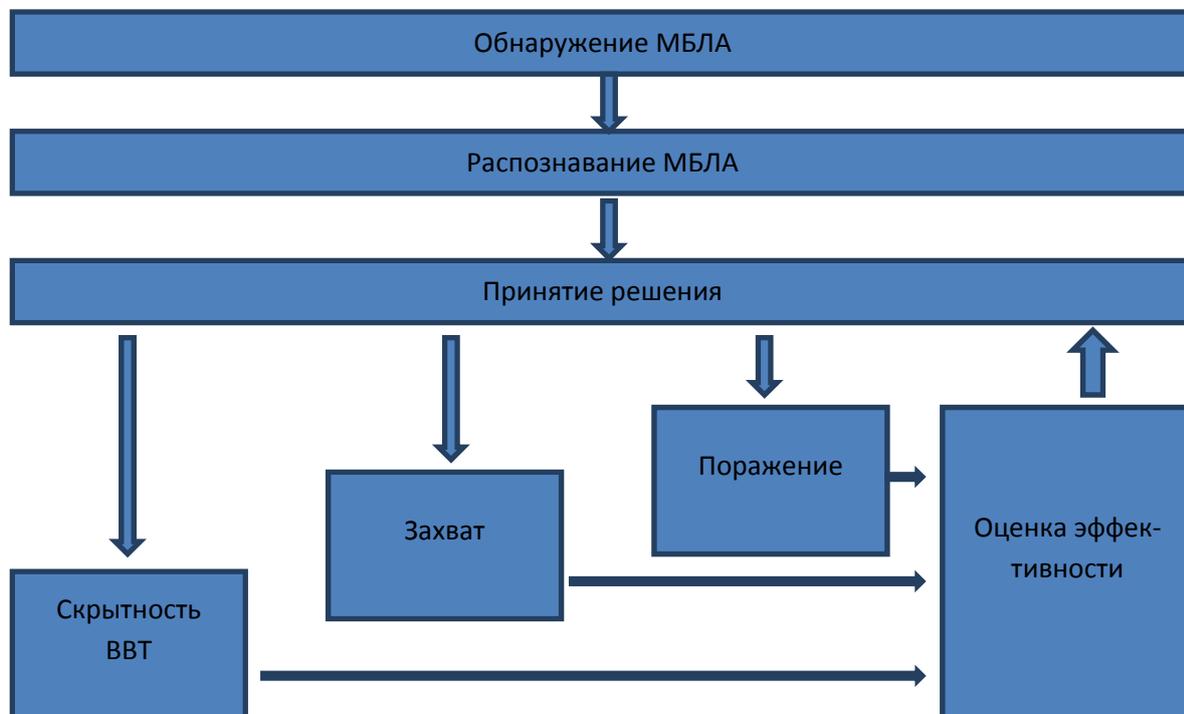


Рис. 8. Структура управления комплексным методом борьбы с МБЛА

Для борьбы с МБЛА используем подвижный пункт управления ПУ12М7, который изначально предназначен для решения задач ПВО, а для борьбы с БЛА его оснастили станциями радиотехнической разведки (РТР), оптико-электронной разведки, а также РЛС. Станция РТР обнаруживает и пеленгует каналы управления и сброса информации БЛА малого класса (по большим и средним БЛА комплекс работает как средство ПВО). РТР пеленгует цель, передает целеуказание по пеленгу на РЛС, потом по этой информации подключается оптикоэлектронная система для получения точных координат БЛА. Для борьбы с МБЛА используем устройство пеленгации и определение координат беспилотных летательных аппаратов [4] на основе использования программы определения геометрических изменений на кадрах видеопоследовательности для обнаружения МБЛА [5]. Работа комплекса заключается в автоматизированном определении пространственных координат МБЛА по данным камер кругового обзора и отраженному лазерному излучению, на основе определения дальности, вертикальных и горизонтальных углов с использованием ЭВМ, программой производится выбор метода скрытности, захвата или поражения и оценка эффективности устройств борьбы (рис. 9).

Программа обеспечивает:

- ввод через меню интерфейса параметров цели (фронт, глубина);
- ввод через меню интерфейса зоны поражения реактивным снарядом по дальности и направлению;
- расчет площади захвата МБЛА устройством захвата МБЛА залпом или одиночным пуском по заданным параметрам;
- расчет процента захвата МБЛА устройством захвата МБЛА залпом или одиночным пуском по заданным параметрам;
- наглядное представление о положении точек захвата МБЛА устройством захвата МБЛА относительно цели на мишенном поле;

– ввод через меню интерфейса высоты активного участка траектории, разбиение его на необходимое количество слоев и установки в каждом слое действительных слагающих баллистического ветра, что позволяет реально смоделировать процесс воздействия ветра на пространственное движение устройством захвата МБЛА.

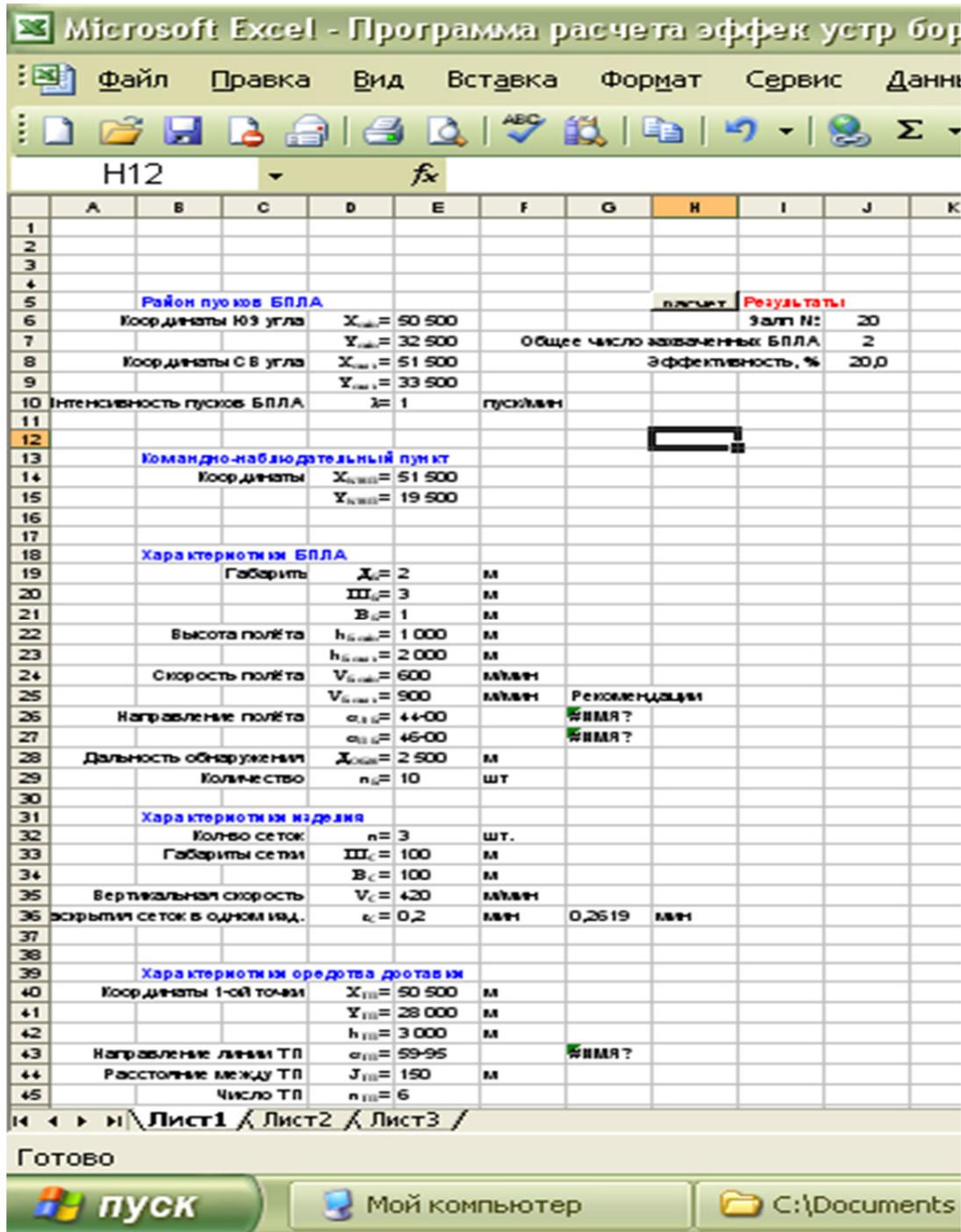


Рис. 9. Исходные данные и результаты расчета оценки эффективности устройств борьбы с МБЛА

Программа позволяет оценить эффективность устройств борьбы с МБЛА для различных режимов применения устройств и МБЛА в определенном диапазоне внешних воздействий.

Таким образом, проблема борьбы с МБЛА с использованием комплекса обнаружения и борьбы будет решена, а перспективы дальнейших исследований связаны с разработкой авиационных беспилотных комплексов борьбы с МБЛА.

**Список литературы**

1. Шишков, С. В. Анализ современных систем распознавания целей с использованием нейронных сетей / С. В. Шишков, Е. А. Чернов, Э. К. Исаев // Радиопромышленность. – 2011. – Вып. 4: Перспективы построения АСУ специального назначения.
2. Пархоменко, А. В. Артиллерийская разведка. Ч. I. Приборы артиллерийской разведки / А. В. Пархоменко. – Пенза : ПАИИ, 2010.
3. Устройство разведки объектов методом анаглифов / А. В. Пархоменко, Е. М. Устинов, В. В. Смогунов, В. П. Фандеев, С. В. Шишков, Ю. В. Илясов, Д. В. Ивасенко / Патент на полезную модель № 86295, 27.08.09. Федеральный институт промышленной собственности.
4. Шишков, С. В. Устройство пеленгации и определение координат беспилотных летательных аппаратов / С. В. Шишков // Радиопромышленность. – 2011. – Вып. 4: Перспективы построения АСУ специального назначения. – С. 103–109.
5. Насадка к оптико-электронным приборам для визирования объектов при больших углах места / С. В. Шишков, А. В. Пархоменко, Е. М. Устинов, В. А. Пархоменко, Ю. В. Илясов / Патент на полезную модель № 83603, 10.06.09. Федеральный институт промышленной собственности.
6. Устройство разведки объектов методом комбинированного стереоэффекта / С. В. Шишков, А. В. Пархоменко, Е. М. Устинов, В. В. Смогунов, Ю. В. Илясов, Д. В. Ивасенко / Патент на полезную модель № 84539, 10.07.09. Федеральный институт промышленной собственности.
7. Программа определения геометрических изменений на кадрах видеопоследовательности для обнаружения ДПЛА / С. В. Шишков, К. Музай, Е. М. Устинов, А. В. Пархоменко, Е. М. Чернов, А. С. Щербаков / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013611694, 31.01.13. Федеральный институт промышленной собственности.
8. Обзор систем сквозного проектирования печатных плат радиоэлектронных средств / И. М. Трифоненко, Н. В. Горячев, И. И. Кочегаров, Н. К. Юрков // Надежность и качество : тр. Междунар. симп. : в 2 т. / под ред. Н. К. Юркова. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2012. – Т. 1. – С. 396–399.
9. Горячев, Н. В. Алгоритм функционирования системы поддержки принятия решений в области выбора теплоотвода электрорадиоэлемента / Н. В. Горячев // Надежность и качество : тр. Междунар. симп. : в 2 т. / под ред. Н. К. Юркова. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2012. – Т. 2. – С. 238–238.
10. Затылкин, А. В. Алгоритмическое и программное обеспечение расчета параметров статически неопределимых систем амортизации РЭС / А. В. Затылкин, Г. В. Таньков, И. И. Кочегаров // Надежность и качество сложных систем. – 2013. – № 4. – С. 33–40.

**УДК 623.418**

**Годунов, А. И.**

**Комплекс обнаружения и борьбы с малогабаритными беспилотными летательными аппаратами / А. И. Годунов, С. В. Шишков, Н. К. Юрков // Надежность и качество сложных систем. – 2014. – № 2(6). – С. 62–70.**

**Годунов Анатолий Иванович**

доктор технических наук, профессор,  
кафедра автоматики и телемеханики,  
Пензенский государственный университет  
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: Godunov@pnzgu.ru

**Шишков Сергей Викторович**

доцент, Пензенский артиллерийский  
инженерный институт  
(440005, Пенза, ул. Лермонтова, 28)  
E-mail: kateha007@bk.ru

**Юрков Николай Кондратьевич**

доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой,  
кафедра конструирования  
и производства радиоаппаратуры,  
Пензенский государственный университет  
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
(8412) 56-43-46

**Godunov Anatoliy Ivanovich**

doctor of technical sciences, professor,  
sub-department of automatics and telemechanics,  
Penza State University  
(440026, 40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Shishkov Sergey Viktorovich**

associate professor  
Penza Artillery Engineering institute  
(440005, 28 Lermontova 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)

E-mail: yurkov\_NK@mail.ru

**Аннотация.** Предложена концепция создания комплексов для обнаружения и борьбы с малогабаритными беспилотными летательными аппаратами в интересах тактического звена Сухопутных войск. Приведены методы и средства обнаружения, захвата, подавления и поражения малогабаритных беспилотных летательных аппаратов.

**Ключевые слова:** концепция, комплекс, обнаружение, подавление, захват, поражение, малогабаритные беспилотные летательные аппараты.

**Abstract.** The concept of creation of systems for detection and control of small unmanned aerial vehicles in the interests of tactical level of the Ground forces. The methods and means of detection, seizure, suppression and destruction of small unmanned aerial vehicles.

**Key words:** concept, complex, detection, suppression, capture, defeat, small-sized unmanned aerial vehicles.

## ***Вниманию авторов!***

Редакция научно-практического журнала «Надежность и качество сложных систем» приглашает ученых и специалистов опубликовать оригинальные статьи, содержащие новые научные и практические результаты в области фундаментальных и прикладных исследований проблем обеспечения надежности и качества сложных как технических, так и эргономических систем по следующей тематике:

- фундаментальные основы обеспечения безопасности, надежности и качества;
- физико-математические методы и модели обеспечения надежности и качества сложных систем;
- информационная безопасность сложных систем;
- технологические основы повышения надежности и качества изделий;
- информационные технологии в проектировании, производстве, испытаниях и сертификации высоконадежных систем;
- надежность биологических и экологических систем и приборов;
- диагностические методы обеспечения надежности и качества сложных систем;
- моделирование и управление в эргономических системах;
- менеджмент качества предприятий и организаций.

Статьи, ранее опубликованные, а также принятые к опубликованию в других журналах, редакцией не рассматриваются.

Редакция принимает к рассмотрению статьи, подготовленные с использованием текстового редактора Microsoft Word for Windows версий не выше 2003.

Необходимо представить статью в электронном виде (kipra@pnzgu.ru, дискета 3,5», CD-диск) и дополнительно на бумажном носителе в двух экземплярах.

Оптимальный объем рукописи – 10–14 страниц формата А4. Основной шрифт статьи – Times New Roman, 14 pt, через полуторный интервал. Тип файла в электронном виде – RTF.

Статья **обязательно** должна сопровождаться индексом УДК, краткой аннотацией и ключевыми словами **на русском и английском языках**.

Рисунки и таблицы должны быть размещены в тексте статьи и представлены в виде отдельных файлов (растровые рисунки в формате TIFF, BMP с разрешением 300 dpi, векторные рисунки в формате Corel Draw с минимальной толщиной линии 0,75 pt). Рисунки должны сопровождаться подрисуночными подписями.

Формулы в тексте статьи выполняются в редакторе формул Microsoft Word Equation, версии 3.0 и ниже. Символы греческого и русского алфавита должны быть набраны прямо, нежирно; латинского – курсивом, нежирно; обозначения векторов и матриц – прямо, жирно; цифры – прямо, нежирно. Наименования химических элементов набираются прямо, нежирно. Эти же требования **необходимо** соблюдать и в рисунках. Допускается вставка в текст специальных символов (с использованием шрифтов Symbol).

***Редакция***

