

Журнал зарегистрирован в Министерстве РФ по делам печати, телерадиовещания и средствам массовой коммуникации (Роскомнадзор)
Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-64098 от 18 декабря 2015 г.
Издается с сентября 2014 г.
Выходит 4 раза в год
ISSN 2409-1650

Журнал «Информационно-технологический вестник» включён в Перечень ведущих периодических изданий ВАК

Группы научных специальностей и научных специальности в рамках групп научных специальностей, по которым издание входит в Перечень:

05.07.00 Авиационная и ракетно-космическая техника [05.07.02 Проектирование конструкции и производство летательных аппаратов, 05.07.03 Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов, 05.07.10 Инновационные технологии в аэрокосмической деятельности], 05.13.00 Информатика, вычислительная техника и управление [05.13.01 Системный анализ, управление и обработка информации (по отраслям), 05.13.05 Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления, 05.13.18 Математическое моделирование численные методы и комплексы программ, 05.13.19 Методы и системы защиты информации, информационная безопасность], 05.16.00 Металлургия и материаловедение [05.16.06 Порошковая металлургия и композиционные материалы, 05.16.08 Нанотехнологии и наноматериалы (по отраслям), 05.16.09 Материаловедение (по отраслям)]

Подписной индекс в каталоге НТИ-Роспечать 62190

Главный редактор
Артюшенко Владимир Михайлович,
д.т.н., профессор

Над выпуском работали
Паршина Ю.С.
Пирогова Е.В.

Адрес редакции:
141070, Королев,
Ул. Октябрьская, 10а
Тел. (495)543-34-31 (доб.138),
E-mail : rio-kimes@mail.ru,
Site:www.unitech-mo.ru

Перепечатка материалов, опубликованных в журнале «Информационно-технологический вестник», допускается только с письменного разрешения редакции.

Редакция не несет ответственности за достоверность информации в материалах, в том числе рекламных, предоставленных авторами для публикации

Материалы приводятся в авторской редакции.

СОДЕРЖАНИЕ

АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

В.М. Артюшенко, Д.Ю. Виноградов
ЗАДАЧА БАЛЛИСТИЧЕСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОСМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ НА УСТОЙЧИВЫХ ОКОЛОКРУГОВЫХ СОЛНЕЧНО-СИНХРОННЫХ ОРБИТАХ ПРИ ДЛИТЕЛЬНЫХ СРОКАХ СУЩЕСТВОВАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ.....3

Г.Г. Вокин
О КОНЦЕПЦИИ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО СИНТЕЗА ВЫСОКО-ЭФФЕКТИВНЫХ СИСТЕМ ОБНАРУЖЕНИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ В РАЙОНАХ ПАДЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ, ОТДЕЛЯЕМЫХ ОТ РАКЕТ СТРАТЕГИЧЕСКОГО И КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ НА ТРАЕКТОРИЯХ ИХ ПОЛЕТА В ХОДЕ ИСПЫТАНИЙ И ШТАТНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ.....10

М.И. Макаров, В.Б. Рудаков, В.М. Макаров
ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ ИЗДЕЛИЙ КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ В УСЛОВИЯХ СТАТИСТИЧЕСКИ НЕОДНОРОДНОЙ ИНФОРМАЦИИ.....22

О.Н. Сальников, А.Д. Полубан
МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ КАНАЛА СИНХРОНИЗАЦИИ ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКОГО СИГНАЛА.....37

А.В. Струкова
ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВНЕДРЕНИЯ МОДЕРНИЗИРУЕМОЙ СТРУКТУРЫ И АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ УПРАВЛЕНИЯ ВОЗДУШНЫМ ДВИЖЕНИЕМ В ЗОНЕ ОТВЕТСТВЕННОСТИ МОСКОВСКОГО РАЙОНА УПРАВЛЕНИЯ ВОЗДУШНЫМ ДВИЖЕНИЕМ.....46

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Т.С. Аббасова
ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ.....55

В.М. Артюшенко, В.И. Воловач
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ НЕГАУССОВСКИХ СЛУЧАЙНЫХ ПРОЦЕССОВ, СИГНАЛОВ И ПОМЕХ В ЛИНЕЙНЫХ И НЕЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМАХ.....66

А.В. Познякевич, Е.Н. Горбанева, Н.А. Кирилина
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ KASPERSKY INDUSTRIAL CYBERSECURITY ДЛЯ КРИТИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ.....79

В.Ю. Савин
ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ ОРГАНИЗАЦИЙ И РЕГУЛИРОВАНИЕ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ В ОБЛАСТИ ИХ ЗАЩИТЫ.....89

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

1. **Барканов Е.Н.**, г.sc.ing.
2. **Васильев Н.А.**, д.т.н., профессор
3. **Леоненко Д.В.**, д.ф.-м.н., профессор
4. **Тимофеев А.Н.**, д.т.н., профессор

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

1. **Аббасова Т.С.**, к.т.н., доцент
2. **Бухаров С.В.**, д.т.н., профессор
3. **Воловач В.И.**, д.т.н., профессор
4. **Логачева А.И.**, д.т.н., профессор
5. **Макаров М.И.**, д.т.н., профессор
6. **Матвиенко Ю.Г.**, д.т.н., профессор
7. **Разумовский И.М.**, д.ф.-м.н., профессор
8. **Рудаков В.Б.**, д.т.н., профессор
9. **Смердов А.А.**, д.т.н., профессор
10. **Стрелянок Ю.В.**, д.т.н., профессор

Подписано в печать
01.06.2018

Формат 176 х 250
Печать офсетная.
Усл.печ.л.10
Тираж 500 экз.
Отпечатано
в типографии
ООО «Научный консуль-
тант»
г. Москва
Хорошевское шоссе, 35,
корп. 2корп.2

А.Б. Семенов, А.Л. Зубилевич, Т.С. Аббасова
**ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ
СИММЕТРИЧНЫХ ЦЕПЕЙ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ НА
ПРОЦЕСС ОПТИМИЗАЦИИ ФИЗИЧЕСКОГО УРОВНЯ
ИНФО-КОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ.....99**

Н.П. Сидорова, Ю.Ю. Сидоров
**ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ В ТЕХНОЛОГИИ
ОБЛАЧНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЯХ.....108**

Е.С. Харламова
**ВЛИЯНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ
НА РАЗВИТИЕ МЕДИЦИНЫ.....116**

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Т.Н. Антипова, Д.С. Широая
**СИСТЕМА ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА
УГЛЕРОД-УГЛЕРОДНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ
МАТЕРИАЛОВ И ТЕХНОЛОГИИ ИХ
ИЗГОТОВЛЕНИЯ.....127**

Л.М. Архипова, О.А. Воейко
**НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ОБЛАСТИ
РЕНТГЕНОВСКОГО КОНТРОЛЯ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ
НА ПРЕДПРИЯТИЯХ КОСМИЧЕСКОГО
МАШИНОСТРОЕНИЯ.....133**

А.В. Острик, И.В. Бугай
**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕНОСА ПОТОКА
ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ
В МНОГОСЛОЙНЫХ ПРЕГРАДАХ.....143**

М.Л. Скрябин, С.С. Чухлова
**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТОНКИХ НИТРИДНЫХ
ПЛЕНОК АЛЮМИНИЯ НА КАМНЕВИДНЫЙ ИЗЛОМ
ЛИТОЙ СТАЛИ.....158**

П.А. Щеглов, А.В. Шишилов
**НОВЫЙ ОБЛЕГЧЁННЫЙ КОМПАУНД ДЛЯ
ГЕРМЕТИЗАЦИИ ЭЛЕКТРОРАДИОИЗДЕЛИЙ
РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ.....167**

УДК 521.322+531.391.5:629

Задача баллистического проектирования космической системы дистанционного зондирования Земли на устойчивых околокруговых солнечно-синхронных орбитах при длительных сроках существования космических аппаратов

В.М. Артюшенко, доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Информационные технологии и управляющие системы»,
Д.Ю. Виноградов, аспирант кафедры «Информационные технологии
и управляющие системы»,
Государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования Московской области
«Технологический университет», г. Королев, Московская область

В статье рассмотрены вопросы, связанные с задачей баллистического проектирования космической системы дистанционного зондирования Земли на устойчивых околокруговых солнечно-синхронных орбитах при длительных сроках существования космических аппаратов. Предложен рациональный способ поддержания солнечной синхронности орбиты в заданных условиях освещённости при длительных сроках активного существования космических систем. При решении данной задачи в качестве целевой функции принято суммарное время нормального функционирования системы на заданном сроке эксплуатации, в течение которого на рабочих участках орбит обеспечиваются наиболее благоприятные условия использования космических аппаратов.

Космический аппарат, солнечно-синхронная орбита, коррекция наклона плоскости орбиты.

The problem of ballistic design of the space system Earth remote sensing in stable near-circular sun-synchronous orbits with long-term spacecraft lifetime

V.M. Artyushenko, doctor of Technical Sciences, Professor,
D.Y. Vinogradov, graduate student «Information technology and control systems»,
State Educational Institution of Higher Education
Moscow Region «University of technology», Korolev, Moscow region

The article deals with the issues related to the problem of ballistic design of the space system of remote sensing of the Earth on stable near-circular solar-synchronous orbits with long-term existence of spacecraft. We propose a rational method of maintaining a solar-synchronous orbit in given light conditions with prolonged active lifetime of space systems. In solving this problem, the total time of normal operation of the system for a given period of operation, during which the most favorable conditions for the use of spacecraft are provided on the main parts of orbits, is taken as a target function.

Spacecraft sun-synchronous orbit, correction of the inclination of the orbital plane.

Введение. В настоящее время создание и развитие космических средств и технологий дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) является одним из важнейших направлений применения космической техники для социально-экономических и научных целей [3, 4].

Для решения большинства задач ДЗЗ (например, задач космической разведки заданных районов Земли в интересах различных ведомств, задач гидрометеорологии, экологического мониторинга, мониторинга чрезвычайных ситуаций, картографии и т.д.) появилась необходимость применять совокупность согласованно функционирующих космических аппаратов (КА), образующих космические системы (КС) или орбитальные группировки КА.

Анализ требований, предъявляемых к космической информации ДЗЗ и баллистическому построению КС ДЗЗ, показывает, что перспективные КС ДЗЗ рассчитываются в основном на длительные сроки эксплуатации, которые составляют 7-10 и более лет [1, 2]. Решение более половины всех задач ДЗЗ обеспечивается аппаратурой видимого и ближнего инфракрасного диапазонов, требующей освещённости наблюдаемой поверхности Земли при возможно большем угле места Солнца. Для обеспечения возможности повторных наблюдений участков земной поверхности при аналогичных условиях освещённости необходимо, чтобы изменение условий освещённости трассы полёта на любой широте наблюдения было минимальным в течение срока существования КА.

Анализ влияния эволюции параметров солнечно-синхронной орбиты (ССО) на условия использования КА по целевому назначению показывает, что при длительном сроке существования вековой уход наклона плоскости ССО, обусловленный силой притяжения Солнца, приводит к значительному смещению местного среднего солнечного времени (МССВ) в узле орбиты от номинального значения. То есть к нарушению её солнечной синхронности. В результате в конце срока существования КА, особенно в зимнее время года, в верхних широтах значительно сокращается размер области на поверхности Земли, где обеспечивается требуемая освещённость трассы полёта КА, необходимая для проведения съёмки, что приводит к значительному сокращению времени использования КА по целевому назначению.

Задача баллистического проектирования космических систем ДЗЗ на устойчивых околокруговых ССО. С учётом основных требований, предъявляемых к перспективным КС ДЗЗ, и проведённого анализа влияния возмущающих факторов на динамику ССО была сформулирована задача баллистического проектирования (БП) КС ДЗЗ на устойчивых околокруговых ССО при длительных сроках активного существования КА.

Направление решения исходной задачи, в виде структурной блок-схемы, представлено на рисунке 1.



Рисунок 1 – Направление решения задачи

Из представленной блок-схемы видно, что задача баллистического проектирования (БП) КС ДЗЗ на устойчивых ССО при длительных сроках существования КА декомпозируется на три взаимосвязанные и последовательно решаемые подзадачи:

- 1) подзадача выбора ОС системы КА ДЗЗ, размещаемой на ССО, обеспечивающей требуемые характеристики землеобзора (начальный этап обоснования ОС);
- 2) подзадача выбора МПД КС;
- 3) подзадача оптимизации поддержания ОС системы КА относительно МПД.

Основными результатами решения данных подзадач являются, соответственно, представленные на рисунке 1 алгоритмы:

- алгоритм формирования каталога ОС системы КА;
- численно-аналитические алгоритмы формирования начальных значений параметров программной геометрически устойчивой ССО с заданными характеристиками;
- алгоритм расчёта поправок к наклонению плоскости программной ССО и времени старта КА, позволяющие сформировать начальные значения параметров устойчивой ССО.

Структурная схема выбора орбитальной структуры космической системы ДЗЗ на ССО в первом приближении, в виде логически взаимосвязанных расчётных модулей представлена на рисунке 2.

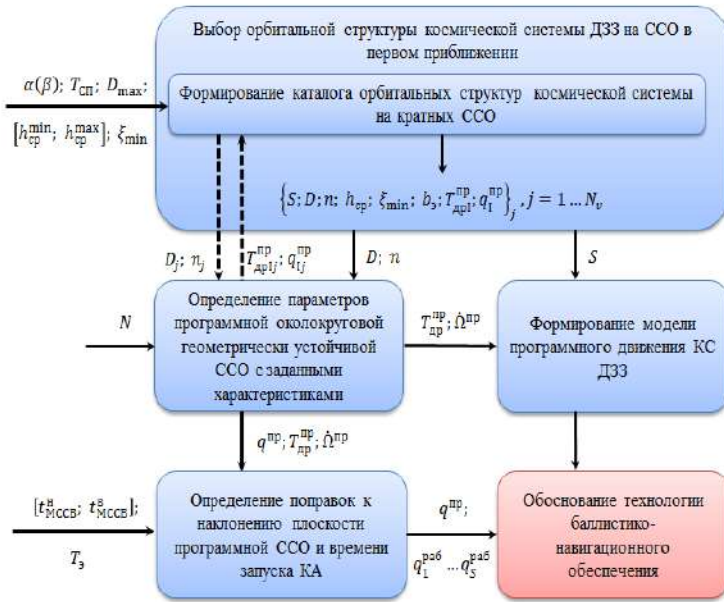


Рисунок 2 – Структурная схема методики БП КС ДЗЗ на устойчивых околокруговых ССО при длительных сроках существования КА

Проанализируем исходные данные, требования и допущения, предъявляемые к решению задачи выбора орбитальной структуры космической системы ДЗЗ на ССО в первом приближении.

Дано:

1. Характеристики бортовой аппаратуры: $\alpha(\beta)$ – угол обзора (захвата) или $b_\alpha(b_\beta)$ – ширина полосы обзора (захвата).

2. Требования к параметрам землеобзора:

- $T_{СП}$ – период сплошного покрытия всех точек экватора полосами обзора (захвата) бортовой аппаратуры, сутки;

- $[h_{cp}^{min}; h_{cp}^{max}]$ – диапазон средних высот функционирования КС;

- ξ_{min} – минимальный коэффициент перекрытия полос обзора, %;

- D_{max} – максимальный период кратности орбиты, сутки.

3. Требования к освещённости трассы полёта:

- $h_{\odot}^{min} \geq 10^\circ$, где h_{\odot}^{min} – минимальный угол места Солнца;

- $t_{MCCBj}^H \leq t_{MCCB} \leq t_{MCCBj}^B, j = 1 \dots p$ – допустимый диапазон удержания МССВ прохождения КА восходящего или нисходящего узла орбиты, где p – число системных плоскостей.

4. T_3 – срок эксплуатации КС, лет.

5. Множество вариантов баллистического построения ССО:

$V = \{v_1 \dots v_5\} = \{T_{др}^H; \{D, n\}; i^H; \{n_{сут}, \Delta L_{сут}^H\}; h_{cp}^H\}$,

где $T_{др}^H$ – номинальное значение драконического периода обращения; D – период кратности орбиты (интервал замыкания трассы), сутки; n – число полных витков за период кратности; i^H – номинальное значение наклона плоскости орбиты;

$n_{\text{сут}}$ – число витков в полётных сутках; $\Delta L_{\text{сут}}^H$ – номинальная величина суточного смещения трассы полёта; $h_{\text{ср}}^H$ – номинальная средняя высота ССО.

6. Математическая модель возмущённого движения системы из S КА с учётом сил гравитационного притяжения Земли, Луны, Солнца, сопротивления атмосферы, тяги двигательных установок:

$$\vec{q}_s(t) = f(\vec{q}_s(t_0), t, m_s, S_{Bs}, P_s), s = 1 \dots S,$$

где $\vec{q}_s(t) = [a, e, i, \Omega, \omega, u]_s^T$ – вектор состояния s -го КА в момент времени $t \in [t_0; T_3]$; $\vec{q}_s(t_0) = [a_0, e_0, i_0, \Omega_0, \omega_0, u_0]_s^T$ – начальные условия движения s -го КА в момент фиксации системы t_0 ; m_s – масса s -го КА; S_{Bs} – баллистический коэффициент s -го КА; P_s – программа управления движением s -го КА системы в течение срока эксплуатации.

7. Требование к поддержанию орбитальной структуры (ОС) КС:

$$|u_s^\phi(t) - u_s^{\text{пп}}(t)| \leq \Delta u_{\text{доп}}, s = 1 \dots S,$$

где $u_s^\phi(t)$ – фактическое положение КА по аргументу широты в момент времени t ; $u_s^{\text{пп}}(t)$ – программное (номинальное) положение КА по аргументу широты в момент времени t ; $\Delta u_{\text{доп}}$ – величина допустимого отклонения положения КА по аргументу широты.

Требуется:

1. Определить структуру КС:

$$C_{\text{КС}}(t_0) = \{ \{u_{01}, \Omega_{01}\} \dots \{u_{0S}, \Omega_{0S}\} \}^T,$$

где u_{0s} – положение s -го КА по аргументу широты на момент фиксации системы t_0 ; Ω_{0s} – величина долготы восходящего узла плоскости орбиты s -го КА на момент фиксации системы t_0 ; $s = 1 \dots S$.

2. Определить начальные значения параметров программной орбиты $\vec{q}^{\text{пп}}(t_0)$ и модель программного движения (МПД).

3. Определить начальные значения параметров рабочих орбит $\vec{q}_s(t_0), s = 1 \dots S$, обеспечивающие в течение срока эксплуатации максимум целевой функции I :

$$I[\vec{q}^{\text{пп}}(t_0), \vec{q}_1(t_0), \dots, \vec{q}_S(t_0), u_{\text{нач}}, u_{\text{кон}}, h_{\odot}^{\text{min}}, T_3, P_s] = \\ = \sum_{s=1}^S \sum_{k=1}^{n_s} \Delta t_{sk}^{\text{н.ф}} \rightarrow \begin{matrix} \max \\ t_{\text{МССВ}}^{\text{н}} \leq t_{\text{МССВ}} \leq t_{\text{МССВ}}^{\text{н}} \\ \Delta V_{\Sigma}^{\Delta i} \leq \Delta V_{\text{доп}}^{\Delta i} \\ t_0 \leq t \leq T_3 \end{matrix},$$

где $\Delta t_{sk}^{\text{н.ф}}$ – показатель качества, характеризуемый временем нормального функционирования КА на рабочем участке k -го витка орбиты от аргумента широты $u_{\text{нач}}$ до аргумента широты $u_{\text{кон}}$, в течение которого высота Солнца $h_{\odot}(t)$ над местным горизонтом в подспутниковой точке не менее заданного значения h_{\odot}^{min} ; n_s – целое число витков, совершаемых КА за срок эксплуатации; $\Delta V_{\Sigma}^{\Delta i}$ – фактические затраты характеристической скорости на коррекцию наклонения в течение срока эксплуатации; $\Delta V_{\text{доп}}^{\Delta i}$ – выделенные затраты характеристической скорости на коррекцию наклонения.

Допущения:

1. $S_{Bs} = 0$, т.е. предполагается, что возмущающее влияние атмосферы компенсируется на этапе поддержания параметров рабочей орбиты в течение

срока эксплуатации КА (иначе говоря, отсутствуют потери, обусловленные атмосферным торможением).

2. КА размещены равномерно в системной плоскости.

3. Число системных плоскостей $p = 1$.

4. Ограничение на величину периода сплошного покрытия экватора:

$$T_{\text{СП}} \geq 1.$$

5. Закон управления движением P_s , обеспечивающий выполнение требований к формированию и поддержанию орбитальной структуры КС в течение срока эксплуатации относительно модели программного движения, задан.

Алгоритм выбора орбитальной структуры космической системы ДЗЗ на ССО в первом приближении можно описать следующим образом.

На вход первого модуля подаются характеристики бортовой аппаратуры, требования к параметрам землеобзора и диапазон высот полёта. Данный модуль формирует каталог ОС КС путём перебора кратных ССО в заданном слое высот. Из каталога выбирается вариант, удовлетворяющий требованиям проектировщика.

Выбранный вариант подаётся на вход модуля по определению параметров программной орбиты для заданного числа зональных гармоник модели геопотенциала, которые используются для МПД.

На заключительной стадии определяются две поправки к параметрам программной орбиты, что позволяет сформировать устойчивую ССО. Учёт поправок оптимизирует поддержание ОС в окрестности программного движения в течение заданного срока эксплуатации при требуемых условиях освещённости. При этом удаётся максимизировать интервал времени функционирования КА по целевому назначению без проведения коррекций наклонения.

Далее полученные результаты используются при обосновании технологии баллистико-навигационного обеспечения (БНО) формирования и поддержания ОС КС относительно МПД.

Выводы. Таким образом, в целях увеличения времени функционирования КА на ССО в заданных условиях освещённости при длительных сроках активного существования космических систем ДЗЗ предложен рациональный способ поддержания солнечной синхронности орбиты, который заключается в выборе, формировании и поддержании параметров устойчивых ССО.

В качестве целевой функции при решении задачи принято суммарное время нормального функционирования системы на заданном сроке эксплуатации, в течение которого на рабочих участках орбит обеспечиваются наиболее благоприятные условия использования КА по целевому назначению, а именно:

- освещённость наблюдаемой поверхности при возможно большей высоте Солнца над местным горизонтом в точке съёмки;

- минимальное изменение условий освещённости трассы полёта на любой широте наблюдения (минимальное изменение МССВ в узле орбиты);

- постоянство профиля высоты ССО над общеземным эллипсоидом (ОЗЭ);

- минимальный перепад экстремальных высот на витках полёта.

Литература

1. Артюшенко В.М., Виноградов Д.Ю. Анализ свойств орбит минимального изменения высоты // Информационно-технологический вестник. 2017. № 4 (14). С.3-15.
2. Артюшенко В.М., Виноградов Д.Ю. Анализ геометрически устойчивых орбит космических аппаратов дистанционного зондирования Земли // Информационно-технологический вестник. 2018. № 1 (15). С.12-22.
3. Концепция развития российской космической системы дистанционного зондирования Земли на период до 2025 года // М: Российское космическое агенство. 2006. 72 с.
4. Чернов А.А., Чернявский Г.М. Орбиты спутников дистанционного зондирования Земли // М: Радио и связь. 2004. 202 с.

УДК 629.782

О концепции исследовательского синтеза высоко-эффективных систем обнаружения и определения координат в районах падения элементов, отделяемых от ракет стратегического и космического назначения на траекториях их полета в ходе испытаний и штатной эксплуатации

Г.Г. Вокин, доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки Российской Федерации, академик Российской академии космонавтики им. К.Э. Циолковского, заведующий базовой кафедрой, Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Московской области «Технологический университет», г. Королев, Московская область

В статье излагаются подход и актуальные вопросы исследовательского синтеза высокоэффективных транспортабельных систем поиска и определения координат в районах падения элементов, отделяемых от ракет, с учетом дислокации упрежденных районов падения и физических условий на их территориях. В основу принципов построения упомянутых систем положено рациональное комплексирование традиционных и нетрадиционных датчиков информации различной физической природы, фиксирующих моменты приземления отделившихся частей ракет.

Районы падения отделяемых элементов от ракет, технология синтеза систем обнаружения и определения координат элементов, датчики различной физической природы, комплексирование.

About the concept of synthesis of high-performance detection and positioning systems in the areas of elements falling, separated from strategic and space missiles on the trajectories of their flight during tests and regular operation

G.G. Vokin, Full Doctor (eng), professor, honored worker of science of the Russian Federation, academician of the Russian Academy of cosmonautics named after K.E. Tsiolkovsky, head of the basic Chair, State Educational Institution of Higher Education Moscow Region «University of technology», Korolev, Moscow region

The article describes the approach and topical issues of synthesis of highly efficient transportable systems for search and determination of coordinates in the areas of elements falling, separated from the missiles, taking into account the dislocation of pre-empted areas of fall and physical conditions in their territories. The principles of these systems are based on the rational integration of traditional and non-traditional information sensors of different physical nature, which record the moments of landing of separated parts of the missiles.

Areas of fall of separated elements from rockets, technology of synthesis of systems of detection and determination of coordinates of elements, sensors of various physical nature, complexing.

Введение

Ракетно-космическая деятельность имеет, как известно, широкий пространственно-временной размах. Для доставки головных частей в заданные точки Земли или космических аппаратов на заданные орбиты требуются не только собственно ракеты, но и большое число обеспечивающего оборудования и средств, а также использование достаточно больших по площади территорий для размещения полигонов и районов падения элементов конструкций, отделяющихся от ракеты в соответствии с циклограммой полета. Под отделяющимися частями ракет понимаются первая и вторая ступени, обтекатели, соединительные устройства, спускаемые аппараты и капсулы со специнформацией. Эти элементы представляют серьезную угрозу безопасности для людей и результатов их хозяйственной деятельности, особенно это касается первой ступени ракеты, содержащей внушительные по весу остатки ракетного топлива, представляющего большую экологическую угрозу.

Наличие значительного числа типов ракет, различных трасс полета и углов наклона орбит вынуждают отводить большое число (многие десятки) районов падения, имеющих большие территории (сотни квадратных километров). Если в советское время территории отводились директивным путем, то в настоящее время, особенно это касается территорий сопредельных стран, требуется учет правовых отношений, включающих в качестве первоочередных вопросы очистки территорий и эвакуации отделяющихся частей ракет в места их утилизации [1].

Поиск и обнаружение этих элементов представляет достаточно сложную задачу в связи с большим разбросом элементов на больших территориях. До последних лет для поиска использовались главным образом чрезвычайно дорогие авиационные средства и станции внешнетраекторных измерений с привлечением большого числа людей и обеспечивающих средств. Естественно, что так долго продолжаться не может. Встает актуальный вопрос о качественном повышении эффективности средств обнаружения упомянутых элементов.

Остроту вопроса характеризуют следующие обобщенные данные: размер района падения (он имеет форму эллипса) для первой ступени составляет ~70x30 км, второй – ~100x50 км и третьей – ~400x100 км; общее число районов падения достигает 200 с общей площадью 4,8 млн. гектаров; нагрузка на поля падения, например, в 1989 году, составляла по металлу более 50 тыс. тонн, а по компонентам ракетного топлива – более 15 тыс. тонн [1]. Следует особо отметить, что большие трудности по обнаружению элементов создают природно-географические условия районов падения. В результате проведенных работ полигонами к настоящему времени «засоренность» территорий уменьшилась, но проблема осталась, потому что ракетно-космическая деятельность продолжается, а средства поиска элементов и определения их координат остаются по существу прежними.

1. Общие требования к системе поиска отделившихся от ракет элементов и концептуальная постановка актуальной задачи

Основные требования к системе поиска и определения координат отделившихся от конструкции ракет элементов сводятся к повышению вероятности обнаружения и повышения точности координат приземлившихся элементов, представляющих экологическую или физическую угрозу.

Баллистический прогноз точек падения не даёт приемлемой точности, потому что элементы имеют сложную аэродинамическую форму и трудно установить начальные условия их движения после отделения, особенно что касается углового их положения. Воздушный или пеший мониторинг местности, особенно если это не степной, а лесной район падения, малоэффективны. Выход видится в оборудовании района падения комплексами датчиков различной физической природы. При этом комплексы датчиков (локальных измерительных пунктов) должны быть транспортабельными, переносными и обладать автономной работоспособностью в течение заданного времени в автоматизированном режиме. Как показывает анализ, существует значительная часть признаков падения элементов на землю, которые могут фиксироваться целым рядом датчиков: радиотехническими, акустическими, сейсмическими и т.д.

При этом локальные измерительные пункты должны быть размещены в районе падения по определённой схеме таким образом, чтобы могли быть зафиксированы факты падения опасных элементов, представляющих физическую или экологическую угрозу. На данном этапе проработок рассматриваемого вопроса не представляется возможным сформулировать формализованную постановку задачи. Для изложения выполненных проработок вполне достаточно представленной ниже концептуальной постановки задачи в вербальном виде. Для пояснения и конкретизации рассматриваемой задачи по итогам декомпозиции её целесообразно указать на необходимость решения следующих первоочередных подзадач:

определить перечень датчиков различной физической природы, надёжно обеспечивающих фиксацию падения всех элементов, оценив требуемую их чувствительность и ширину диаграммы направленности приёма сигналов;

построить рациональную схему расположения локальных измерительных пунктов, обеспечивающую приём данных от всех упавших опасных элементов;

определить структуру и конструктивную схему локальных измерительных пунктов, включая информационную связь с командным пунктом базы мониторинга района падения;

разработать алгоритмы определения координат элементов по данным от локальных измерительных пунктов;

установить совокупности датчиков различной физической природы, рационально учитывающих при комплексировании природно-географические условия района падения;

оценить вероятность обнаружения элементов и точность их координат при комплексированной обработке информации от датчиков различной физической природы;

оценить ожидаемый эффект от использования предлагаемой системы.

Можно выделить ещё целый ряд не менее важных подзадач, которые

очевидны или могут возникнуть при проведении пионерских проработок технологии синтеза систем рассматриваемого класса. Однако правомерным будет заметить, что приведенный перечень подзадач уже дает достаточные основания для концептуального формирования технического облика предлагаемой системы.

2. Методический подход к решению задачи и концептуальные научно-технические решения по технологии синтеза рассматриваемых систем с повышенным уровнем основных тактико-технических характеристик

Основным содержанием предлагаемого подхода является поиск путей и способов заблаговременного оперативного оснащения упрежденных районов падения элементов конструкции ракет переносной транспортабельной аппаратурой и оборудованием, с помощью которых можно было бы достаточно быстро обнаруживать и отыскивать упавшие на землю опасные элементы конструкции ракет, подлежащих своевременной эвакуации после проведения соответствующих работ по их экологическому обезвреживанию. Основу упомянутой аппаратуры составляют локальные измерительные пункты (ЛИП), которые устанавливаются с помощью вертолетов в узлах определенной сети с достаточно точно известными координатами. ЛИП содержат блоки датчиков различной физической природы, источники автономного питания, радиотехнические средства связи и управления для коммуникации с оперативным командным пунктом, расположенным в стороне от района падения (РП).

Как показал анализ, для проведения работ по обнаружению элементов и определению их координат по данным, получаемым от ЛИП, целесообразно РП привязать к локальной прямоугольной системе координат (рисунок 1), привязанной в свою очередь к крупномасштабной топографической карте (масштаба порядка 1:500, 1:1000). При этом в зависимости от практических потребностей координаты элементов или ЛИП по известным расчетным алгоритмам могут быть переведены из локальной прямоугольной системы координат в географические координаты исходной крупномасштабной карты и наоборот.

Отметим, что ЛИП устанавливаются с определенной угловой ориентацией относительно локальной прямоугольной системы координат.

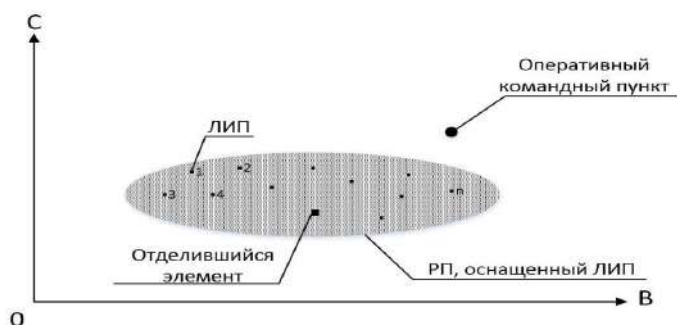


Рисунок 1 – Схема РП в локальной системе координат

Как показал анализ, ЛИП целесообразно оснащать блоками датчиков различной природы, на базе которых будут сформированы следующие подсистемы со своими автономными алгоритмами обработки информации: сейсмическая, акустическая, радиомаячковая, радиокодовая, спутниковая. На рисунке 2 показано в схематическом виде расположение районов падения. Совершенно очевидно, что ЛИП должны устанавливаться с таким расчетом, чтобы покрыть всю площадь района падения минимальным их числом. Максимальное расстояние между ЛИП не должно превосходить удвоенной минимальной дальности приема датчиками полезных сигналов. Критичными в этом отношении являются акустические и сейсмические датчики. Есть основания полагать, что сгущение сети ЛИП целесообразно осуществлять на наиболее вероятных участках падения элементов по баллистическим прогнозам. При формировании технологии обработки измерительной информации один из ЛИП целесообразно принять в качестве базового (опорного).

С целью обеспечения оперативного и надежного отыскания элементов логически напрашивается предложение об оснащении основных частей отделяемых элементов радиомаяками, радиокодовыми радиоответчиками и приемниками «Глонасс». Очевидно, что эти средства должны сохраняться и оставаться работоспособными после падения на землю. Для выполнения этих условий средства должны быть защищены соответствующими теплозащитными корпусами, а также выдерживать большие перегрузки, возникающие в момент удара о землю. Более того, должны быть найдены конструкторские решения в виде, например, некоторых капсул, которые должны быть вмонтированы в отделяющиеся элементы конструкции ракеты. Для элементов первой ступени решение этой задачи видится более простым, сложнее обстоит дело со второй ступенью, поскольку в силу условий в период падения элементы делятся, более сильно нагреваются и испытывают значительно более высокие перегрузки при встрече с землей.

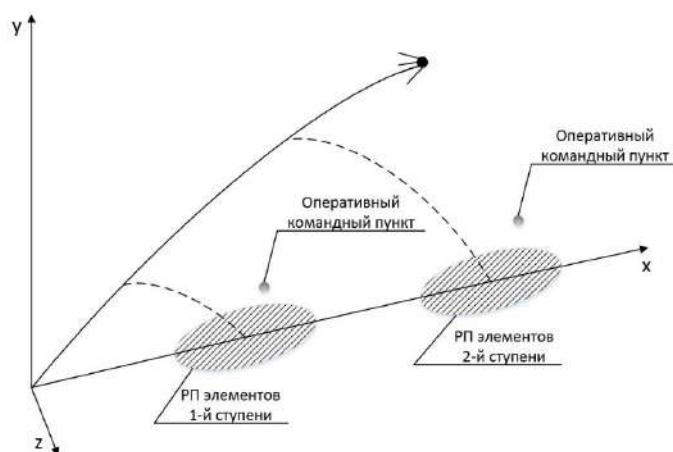


Рисунок 2 – Схема расположения районов падения

Как показывает научно-технический анализ и свидетельствует опыт,

непреодолимых преград для технической реализации упомянутых средств нет. Для успешного решения общей задачи принципиальное значение имеет определение перечней целесообразных функций, которыми должны обладать блоки датчиков ЛИП:

– сейсмические и акустические датчики, которые должны иметь максимально узкие по углу диаграммы направленности приема сигналов, располагают так, чтобы можно было бы принять сигналы с любого направления, при этом оси диаграмм приема должны быть привязаны к локальной системе координат и для каждого из них известен угловой коэффициент в локальной системе координат. Количество датчиков этих видов в одном ЛИП, которые могут, например, располагаться в направлении радиусов круглого основания, обеспечивая при этом круговой прием, определяется в основном шириной диаграммы направленности приема сигналов. Как показывает анализ, при обработке информации в первую очередь должны использоваться данные с тех датчиков, которые приняли наибольшие по амплитуде сигналы. На этой основе можно сделать первые приближенные оценки координат приземлившихся элементов;

– радиомаячковый приемник должен иметь, например, подвижную (или электронно-коммутирующую) малогабаритную антенну для определения направления на излучаемый радиомаяк, имеющий круговую диаграмму направленности упавшего на землю элемента, при этом должен быть определен угловой коэффициент упомянутого направления;

– радиокодовый приемопередатчик, имеющий круговую диаграмму направленности, базового ЛИП излучает определенный радиокод, а по ответному сигналу соответствующего элемента определяется дальность от базовых ЛИП до элемента;

– приемники спутниковой системы «Глонасс» располагают на упавших элементах, они дают информацию по радиоканалу на командный пункт о своем местоположении.

В целях организации обработки информации все ЛИП, элементы и датчики имеют кодовые наименования. Так, например, датчику целесообразно присвоить номер D_{mnq} , где m – номер ЛИП, n – номер блока датчиков, q – номер датчика в блоке датчиков.

На рисунке 3 приведён типовой структурный состав основных составляющих частей ЛИП.

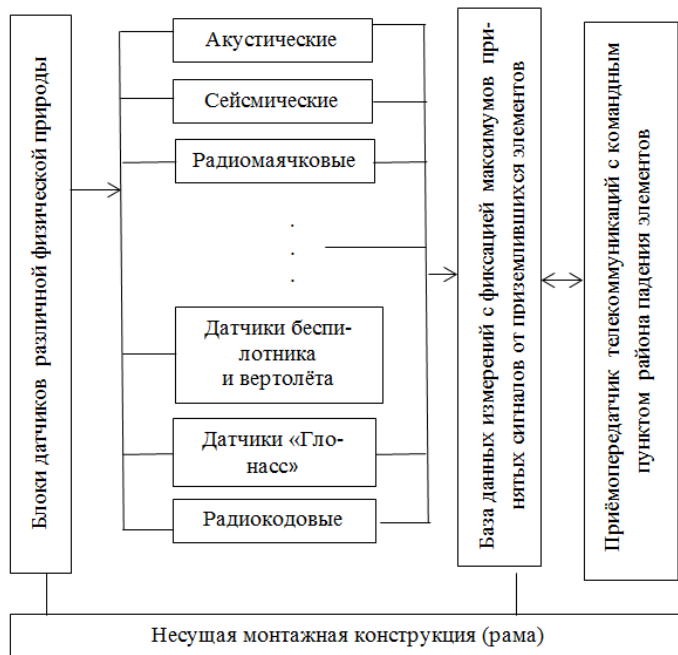


Рисунок 3 – Обобщённая структурная схема локального измерительного пункта

Совершенно очевидно, что конструктивное исполнение ЛИП требует своих соответствующих технических решений.

Не излагая в данной статье всего процесса обработки измерительной информации, которая может проводиться вручную, в автоматизированном или автоматическом режиме, отметим лишь, что имеют место два основополагающих алгоритма определения координат разыскиваемых элементов, использующих следующую исходную информацию: угловые коэффициенты двух лучей, исходящих от двух ЛИП, в точке пересечения которых находится искомый элемент (рисунок 4); известны расстояния от двух ЛИП до искомого элемента (рисунок 5).

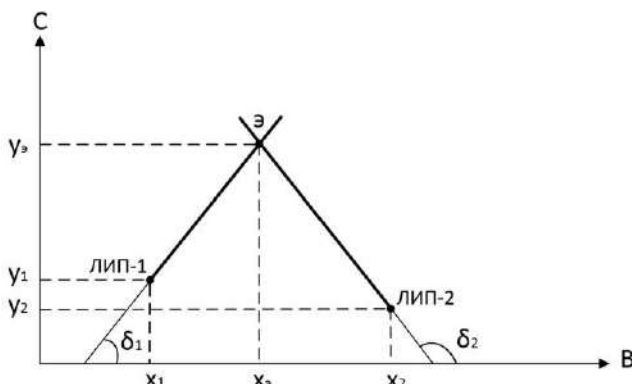


Рисунок 4 – Определение местоположения элементов по направлениям лучей «ЛИП-элемент»

Первый алгоритм сводится к решению следующей системы двух уравнений с двумя неизвестными:

$$\begin{aligned}y_3 &= y_1 + k_1 x_3 - k_1 x_1, \\y_3 &= y_2 + k_2 x_3 - k_2 x_2,\end{aligned}$$

где $k_1 = tg\delta_1, k_2 = tg\delta_2$,

которая решается в квадратурах без особого труда, при этом отыскиваются координаты искомого элемента x_3, y_3 .

Можно найти таким образом много вариантов, количество которых определяется числом сочетаний C_2^n , где, например, n – число датчиков одного из блоков ЛИП. Окончательно координаты элемента можно определить в результате усреднения (в случае, например, одного элемента):

$$x_3^{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n x_3^i}{n}, y_3^{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n y_3^i}{n}$$

В случае, если имеется несколько упавших элементов, то координаты группируются относительно некоторых достаточно близких точек (координат элементов) при выполнении условий:

$$|x_1 - x_2| < \tau_1, |y_1 - y_2| < \tau_2,$$

где τ_1, τ_2 – величины разброса координат одного из элементов, определяемых одной из подсистем ЛИП.

В соответствии с процедурой обработки информации сначала можно определить усредненные координаты всех элементов по данным датчиков одного блока ЛИП, а затем и по совокупности всех блоков датчиков различной физической природы.

Во втором варианте алгоритма определения координат элемента (рисунок 5) местоположение его отыскивается в результате решения следующей системы уравнений:

$$R_1^2 = (x_3 - x_1)^2 + (y_3 - y_1)^2,$$

$$R_2^2 = (x_3 - x_2)^2 + (y_3 - y_2)^2,$$

которая в квадратурах решения не имеет. Координаты x_3, y_3 отыскиваются в результате приближенного решения системы, например, методом Ньютона.

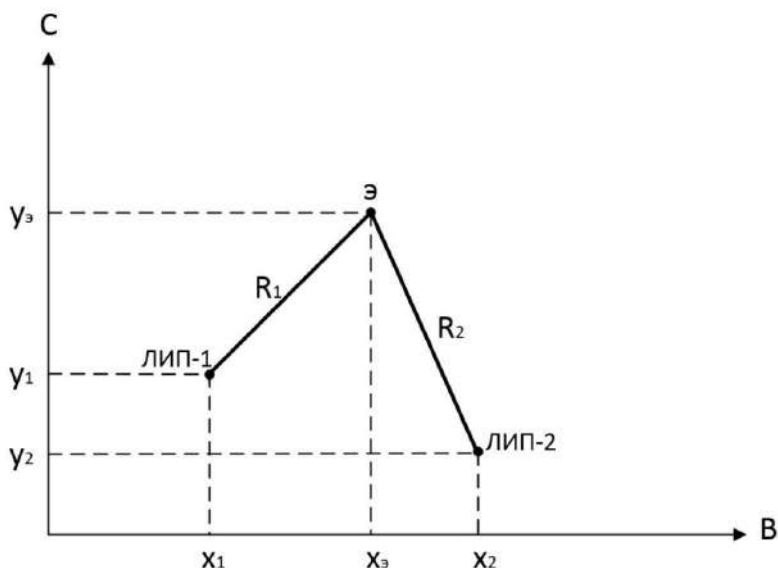


Рисунок 5 – Определение местоположения элемента по расстояниям «ЛИП-элемент»

Усредненные координаты отыскиваются по аналогии с первым алгоритмом.

Как показывает анализ, точность определения координат может быть обеспечена достаточно высокая в результате использования большого числа определений по информации от датчиков различной физической природы. Количество таких определений ожидается достаточно большим и равно оно числу сочетаний C_2^n , где n – число вариантов определений при использовании комплексирования информации от различных ЛИП и их датчиков.

Одновременно следует отметить, что для селекции упавших на землю элементов, например, по их весу, можно использовать амплитуды принятых сигналов акустическими или сейсмическими датчиками. При этом датчик с максимальной амплитудой принятого сигнала и соответствующий ему угловой коэффициент можно использовать как опорные при определении координат элемента.

При комплексировании информации ожидается повышение вероятности обнаружения $P_э$ элементов конструкции ракет, которая может быть определена по формуле

$$P_э = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_i),$$

где P_i – вероятность обнаружения элементов одной из подсистем, в основе функционирования которой лежит использование датчика той или иной физической природы. На рисунках 5 и 6 проиллюстрировано повышение вероятности обнаружения элемента $P_э$ при комплексировании информации от датчиков различной природы при условии (для упрощения): вероятности обнаружения P_i , $i = 1, 2, \dots, n$ всех подсистем одинаковы; где $n=5$ – число подсистем и соответственно они равны 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5.

3. Ожидаемый эффект от использования предлагаемых систем поиска элементов ракет и определения их координат в районах падения

Как известно, существующие подходы и приемы по обнаружению и определению координат отделившихся от ракет элементов являются малоэффективными: точность баллистического прогнозирования не высока, а вертолетный или, тем более, пеший мониторинг требуют много времени. Кроме того, традиционные мероприятия по поиску элементов требуют большого числа людей и соответствующей вспомогательной техники. Особенно это критично для лесных и гористых районов падения элементов вторых ступеней ракет.

В соответствии с излагаемой концепцией появляются принципиальные возможности резкого сокращения времени обнаружения элементов и определения их координат, что достигается за счет предварительного оснащения района падения локальными измерительными пунктами и использования комплексированной обработки информации.

По предварительным оценкам время обнаружения элементов может быть сокращено не менее, чем на порядок, а ожидаемая точность определения координат элементов может составлять десятки – первые сотни метров.

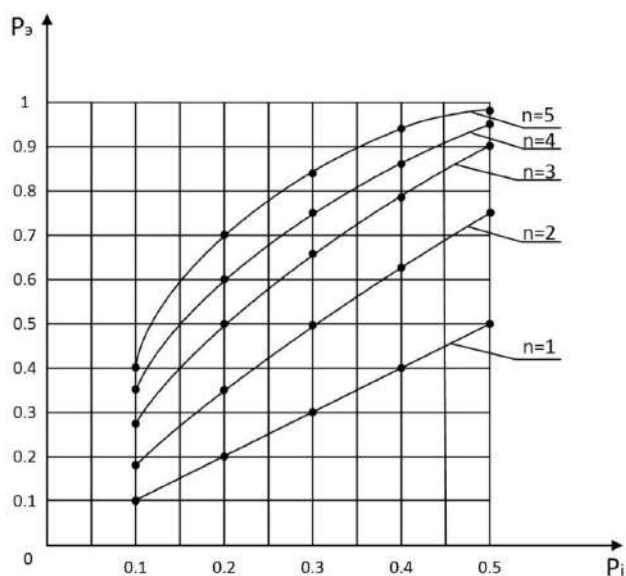


Рисунок 6 – Зависимость вероятности обнаружения элемента от вероятности обнаружения отдельными блоками датчиков при различной степени комплексирования $n = 1, 2, 3, 4, 5$.

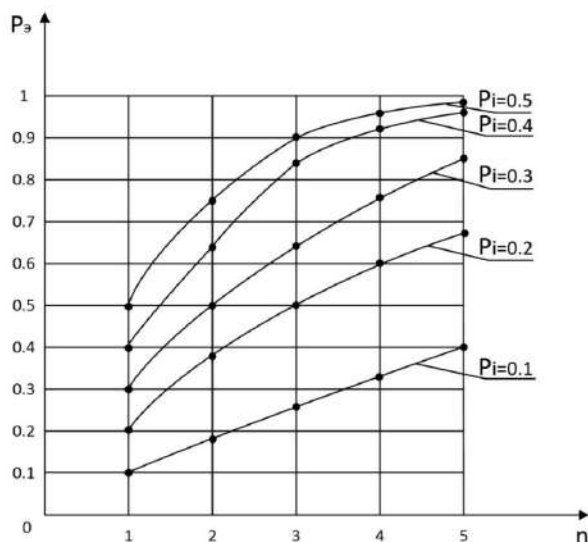


Рисунок 7 – Зависимость вероятности обнаружения элемента от степени комплексирования n ($n = 1, 2, 3, 4, 5$) при различных вероятностях обнаружения блоками датчиков $P_1 = 0,1$; $P_2 = 0,2$; $P_3 = 0,3$; $P_4 = 0,4$; $P_5 = 0,5$.

Имея такие показатели системы поиска и определения координат элементов, можно вправе ожидать серьезного сокращения общих затрат на деятельность поисковых экспедиций, быстрой ликвидации отрицательного воздействия элементов на экологию, уменьшения «засоренности» районов падения и быструю эвакуацию опасных элементов, особенно с остатками ракетного топлива. Кроме того, имеют место принципиальные возможности обнаружения значительно большего числа относительно небольших элементов, особенно в районах падения вторых ступеней ракет.

При использовании ЛИП появляются принципиальные возможности использования в качестве РП малоосвоенных безлюдных территорий даже без наличия, например, транспортной инфраструктуры.

Заключение

Как показывают предварительные оценки, предлагаемые концептуальные научно-технические решения обладают возможностями улучшения на порядок, по крайней мере, точности определения координат элементов и продолжительности времени их обнаружения за счет использования датчиков различной физической природы и комплексированной обработки информации. Важным фактором является также то обстоятельство, что предлагаемая система является переносной, что может обеспечить быструю подготовку новых районов падения элементов ракет.

В итоге, как показывают оценки, имеются принципиальные возможности существенного сокращения времени и финансово-материальных затрат на решение вопросов отыскания и эвакуации отделяемых от ракет элементов по трассе их полета.

Ожидаемый уровень характеристик рассматриваемых систем

свидетельствует об их перспективности и необходимости незамедлительной технической реализации.

Литература

1. Авдошкин В.В., Аверкиев Н.Ф. и др. Проблемные вопросы использования трасс запусков КА ..., под ред. Фадеева А.С., Аверкиева Н.Ф., ВКА им. А.Ф.Можайского // ЦЭНКИ. Санкт-Петербург. 2016.

УДК 629.7

Оценка надежности изделий космической техники в условиях статистически неоднородной информации

М.И. Макаров, доктор технических наук, профессор,
руководитель филиала АО «ГКНПЦ им. М.В. Хруничева»
в городе Королев – директор «НИИ КС им. А.А. Максимова»,

В.Б. Рудаков, доктор технических наук, профессор,
главный научный сотрудник «НИИ КС
им. А.А. Максимова», – филиала АО «ГКНПЦ им. М.В. Хруничева»,
г. Королев, мкр Юбилейный, Московская область,

В.М. Макаров, кандидат технических наук, главный специалист департамента
автоматических комплексов и систем специального назначения,
Государственная корпорация по космической деятельности «Роскосмос»,
г. Москва

Проводится анализ известных математических моделей объединения статистически неоднородной информации для повышения точности оценки надежности изделий космической техники (КТ) на этапе наземной отработки. Показана ограниченная возможность практического использования этих моделей, что связано с неоднозначным выбором уровня значимости гипотезы о том, что статистические данные принадлежат одной генеральной совокупности.

Рассматривается «весовая» модель объединения такой информации, которая не связана с выбором конкретного уровня значимости при оценке надежности. Обосновываются все составляющие этой модели с использованием метода наименьших квадратов и критерия Н.В. Смирнова, использующего предельное соотношение для объединения статистических функций распределения.

Иерархия, изделие КТ, контроль, надежность, наземная отработка, оценка, плотность распределения.

Evaluation of the reliability of space technology products in terms of statistically heterogeneous information

M.I. Makarov, Prof., Grand PhD in Engineering sciences, Director, A. Maksimov Space Systems Research Institute – Branch of FSUE Khronichev State Research and Production Space Center,

V.B. Rudakov, Prof., Grand PhD in Engineering sciences, senior researcher, A. Maksimov Space Systems Research Institute – Branch of FSUE Khronichev State Research and Production Space Center,
Korolev, md. Yubileyny, Moscow region,

V.M. Makarov, PhD in Engineering sciences; chief specialist of Department of automated systems and special purpose systems,
Space agency of the Russian Federation, Moscow

Analysis of known mathematical models of combining statistically heterogeneous information to improve the accuracy of the reliability assessment of space technology products at the stage of ground testing is carried out. The limited possibility of practical use of these models is shown in connection with the ambiguous choice of the level of significance of the hypothesis of statistical data belonging to one general population.

The «weight» model of combining information not related to the choice of a specific level of significance in the evaluation of reliability is considered. All the components of this model is justified using the method of least squares and N.V. Smirnov's criteria using the maximum ratio for combining statistical distribution functions.

Hierarchy, product, control, reliability, ground testing, evaluation, distribution density.

Известные методы статистического оценивания надежности технических систем, например [1–5] содержат два важных и связанных между собой условия, которые определяют возможность их использования в практике оценки надежности изделий космической техники. Это наличие достаточно большого объема статистической информации, необходимой для оценки надежности и статистическая однородность этой информации.

Так, практическая реализация существующих методов точечного оценивания (основанных на свойствах несмещенности, состоятельности и эффективности точечных оценок, введенных А.А. Марковым) и методов доверительного оценивания требует наличия репрезентативной выборки данных, которая хорошо отражает свойства генеральной совокупности. При этом свойства генеральной совокупности, то есть истинное значение показателя надежности остается неизменным.

Метод байесовского статистического оценивания, который хотя и представляет формально неизвестное значение показателя надежности в виде случайной величины, заранее предполагает статистическую однородность априорной и апостериорной информации, объединяемой на основе теоремы Байеса.

В то же время практика показывает, что именно эти условия (наличие достаточно большого объема информации о надежности и ее статистическая однородность) не соблюдаются при оценке надежности изделий космической техники. В частности, для этапа отработки космической техники характерно следующее:

отработку изделий проводят последовательно, испытывая их по мере возрастания иерархических уровней. При этом на каждом уровне проводится контроль работоспособности, дается оценка и проводится контроль параметров элементов, систем, контроль характеристик надежности и доведение их значений до уровня заданных требований;

при отработке время (объемы) испытаний и глубина контроля испытываемых элементов и систем ограничены, то есть оценки вероятностных или технических характеристик, которые базируются на ограниченном объеме информации, являются случайными, что вызывает необходимость привлечения специальных методов;

изделия космической техники относятся к классу технических объектов,

к которым предъявляются высокие требования по надежности и которые обладают высокой сложностью в конструктивном отношении, высокой стоимостью проведения испытаний и контроля при наземной отработке и состоят из большого количества разнородных комплектующих элементов и деталей, изготавливаемых малыми партиями;

статистическая оценка и контроль показателей надежности на каждом структурно-иерархическом уровне носит выборочный динамический характер, и организация контроля на различных уровнях приводит к постоянному накоплению и изменению статистически неоднородной информации о надёжности, что связано с большим количеством конструкторских и технологических доработок при отработке изделий и различными условиями и режимами испытаний;

испытания ряда изделий являются форсированными, поскольку техника создается в сжатые сроки и проводить испытания в нормальных (соответствующих реальным режимам и условиям эксплуатации) режимах в течение нескольких лет лишено смысла.

То есть для каждого иерархического уровня обрабатываемых изделий космической техники характерны ограниченные объемы отработки, что влечет за собой малые объемы информации о надежности, и статистическая неоднородность этой информации, которая обусловлена различными режимами проведения испытаний и большим количеством доработок, вносимых в конструкцию и технологию производства. Однако, несмотря на малые объемы информации о надежности и ее статистическую неоднородность на каждом этапе испытаний, информация о надежности изделий постоянно накапливается на предшествующих этапах испытаний. Возникает важный вопрос, имеющий существенное значение для практики статистического оценивания надежности изделий космической техники: каким образом можно использовать всю накопленную информацию о надежности, несмотря на ее статистическую неоднородность?

В существующей литературе [1–5] для решения этого вопроса предложен целый ряд математических моделей объединения такой информации.

Например, в практических задачах определения надёжности технических изделий часто используются экспоненциальное распределение времени t безотказной работы, имеющее следующую плотность распределения:

$$f(t) = \lambda \exp(-\lambda t), \quad (1)$$

где λ – интенсивность потока отказов (параметр распределения).

Характерным для экспоненциального распределения является постоянство функции $\lambda(t)$ во времени, то есть $\lambda(t) = \lambda = \text{const}$. Такое допущение существенно упрощает решение практических задач и часто является достаточно обоснованным, особенно для сложных изделий, для которых предусматриваются замены узлов, агрегатов и приборов, вышедших из строя при испытаниях. В то же время, как отмечается, например, в работе [6], в некоторых случаях использование семейства экспоненциальных распределений в задачах надёжности может оказаться достаточно грубым и привести к ошибкам в решении практических задач. Особенно это относится к таким изделиям, которые находятся в состояниях, соответствующих периодам приработки либо

физическому старению. Поэтому в практике обычно, на предварительном этапе, при наличии достаточного количества исходных данных проводят статистическую проверку сходимости эмпирического распределения с теоретическим распределением, в данном случае экспоненциальным, которое выступает в качестве альтернативы другим законам распределения. Для этого используют известные критерии согласия [2, 6, 7,]. Выбор критерия зависит от объема и характера статистической информации. Так, например, в работах [2, 6] отмечается, что «...наиболее мощным по сравнению с другими существующими критериями для обнаружения возрастающей или убывающей функции интенсивности отказов...» является критерий Бартлетта, вид которого определяется выражением:

$$B_r = \frac{2r \left[\ln(t_r/r) + 1/r \left(\sum_{i=1}^r \ln x_i \right) \right]}{1 + (r+1)/6r}, \quad (2)$$

где: x_i – величина наработки до отказа;

t_r – суммарная наработка;

r – количество отказов в течение наработки t_r .

В случае экспоненциального распределения случайной величины x статистика B_r имеет χ^2 – распределение с $(r-1)$ степенями свободы. При этом вывод о правомерности гипотезы экспоненциального распределения величины x делается в том случае, когда выполняется соотношение:

$$x^2_{1-\varepsilon, r-1} \leq B_r \leq x^2_{\varepsilon, r-1}, \quad (3)$$

где: $x^2_{1-\varepsilon, r-1}, x^2_{\varepsilon, r-1}$ – квантили χ^2 – квадрат распределения, табулировано [8];

ε – уровень значимости.

Критерий (2) прост в использовании и обладает достаточной мощностью при $r > 20$, что требует большой длительности испытаний.

В работе [9] для контроля интенсивности отказов λ используется непараметрический критерий S_n , для которого математическое ожидание и дисперсия определяются выражениями:

$$\begin{cases} M[S_n] = 1/4(n-1)n, \\ D[S_n] = 1/12(n-1)(2n+5)n, \end{cases} \quad (4)$$

где n – количество элементов изделия, отработавших до первого отказа.

Гипотеза экспоненциального распределения ($\lambda = \text{const}$) времени безотказной работы принимается в случае выполнения условия:

$$S_n \leq \xi_{n, \varepsilon}, \quad (5)$$

$$\text{где } \xi_{n, \varepsilon} = M[S_n] + U_{1-\varepsilon} \sqrt{D[S_n]}, \quad (6)$$

а U – квантиль нормированного нормального распределения;

ε – уровень значимости.

Заметим, что рассмотренные критерии согласия эмпирических и теоретических распределений и другие имеют существенную зависимость как от

объема статистической информации, который для изделий космической техники на этапе отработки, как правило, отсутствует, так и от устанавливаемого уровня значимости ε . Эти обстоятельства являются существенными и ограничивают практическое использование предлагаемых критериев для решения поставленного вопроса.

Кроме того, для одного и того же объема информации при различных значениях уровня значимости ε можно получить различные результаты. То есть, уровень значимости ε представляет собой доверительный норматив, однозначно установить который достаточно трудно.

Для решения поставленного вопроса статистического оценивания надежности в литературе предлагается другой подход. Он уже не использует сравнения по критериям согласия эмпирических и теоретических распределений, а основан на проверке гипотезы о принадлежности самих имеющихся статистических данных к одной генеральной совокупности [10, 11]. При этом, как правило, используется случайная величина модуля разности оценок надежности изделия, полученных на i -ом и $(i-1)$ -ом этапах испытаний

$$\Delta P = \left| \hat{P}_i - \hat{P}_{i-1} \right|, \quad (7)$$

которая принимается распределенной по нормальному закону. Проверка гипотезы осуществляется следующим образом. Устанавливается конкретная доверительная вероятность (уровень значимости ε), для которого определяется величина отклонения:

$$\delta = U_p \sigma_{\Delta P}, \quad (8)$$

где: U_p – квантиль нормального распределения;

$\sigma_{\Delta P}$ – среднее квадратическое отклонение величины ΔP .

Гипотеза принимается, если выполняется неравенство $\Delta P \leq \delta$. В этом случае объединенная оценка и ее дисперсия определяются по выражениями:

$$\hat{P}_{об\ i} = \frac{\hat{P}_i \sigma_{P_i}^2 + \hat{P}_{i-1} \sigma_{\hat{P}_{i-1}}^2}{\sigma_{P_i}^2 + \sigma_{\hat{P}_{i-1}}^2}, \quad (9)$$

$$\sigma_{об\ i}^2 = \frac{\sigma_{P_i}^2 \sigma_{\hat{P}_{i-1}}^2}{\sigma_{P_i}^2 + \sigma_{\hat{P}_{i-1}}^2}. \quad (10)$$

Математические зависимости (9) и (10) предполагают некоррелированность оценок \hat{P}_i и \hat{P}_{i-1} и представляют собой выражения для объединения неравноточных оценок [2, 4].

Этот подход также ограничен в использовании, по той же причине, о которой говорилось выше, так как на практике не всегда представляется возможным однозначно установить ε – уровень значимости.

Помимо изложенных подходов известна [1, 2, 12, 13] так называемая «весовая» модель объединения оценок, основу которой составляет следующее выражение:

$$\hat{P}_{обi}^* = \hat{P}_{обi} r_0 + (1 - r_0) \hat{P}_{oi}, \quad (11)$$

где: $\hat{P}_{обi}^*$ – объединенная оценка, полученная объединением оценок \hat{P}_i и \hat{P}_{i-1} с учетом их статистической неоднородности;

$\hat{P}_{обi}$ – объединенная оценка, полученная по выражению (9) объединением оценок \hat{P}_i и \hat{P}_{i-1} с учетом их неравной точности;

r_0 – вероятность того, что статистические данные, по которым получены оценки \hat{P}_i и \hat{P}_{i-1} принадлежат одной генеральной совокупности;

\hat{P}_{oi} – оценка надежности изделия только по результатам последнего этапа.

В выражении (11) вероятность r_0 играет роль «веса», поэтому модель (11) часто называют весовой. Эта модель позволяет осуществлять динамическое отслеживание оценок показателя надежности изделия. Если величина $r_0 = 0$ (статистические данные этапов не относятся к одной генеральной совокупности), то по модели $\hat{P}_{обi}^* = \hat{P}_{oi}$, что соответствует оценке надежности только по результатам последнего i -го этапа. Если же $r_0 = 1$ (статистические данные этапов принадлежат к одной генеральной совокупности), то $\hat{P}_{обi}^* = \hat{P}_{обi}$. Для случая $0 < r_0 < 1$, что наиболее часто встречается на практике, оценка $\hat{P}_{обi}^*$ получается как комбинация оценок $\hat{P}_{обi}$ и \hat{P}_{oi} . Это свойство непрерывности учета степени влияния неоднородности статистических данных различных этапов выгодно отличает модель (11) от других моделей оценивания надежности в условиях статистически неоднородной информации.

То есть модель (11) уже учитывает статистическую неоднородность информации, полученной на различных этапах, но наибольшие трудности вызывает определение вероятности r_0 . Известные математические зависимости для определения r_0 , как правило, основаны на выборе ε уровня значимости.

Как видно, решению поставленного вопроса уделялось и уделяется большое внимание во многих работах, однако, как отмечается в работе [2], единого подхода к учету статистической неоднородности информации в задачах контроля надёжности сложных изделий до настоящего времени не существует.

Тем не менее, остановимся на весовой модели (11) и покажем один из возможных способов определения вероятности r_0 того, что статистические данные, по которым получены оценки \hat{P}_i и \hat{P}_{i-1} принадлежат одной

генеральной совокупности.

Пусть на различных этапах обработки какого-либо изделия космической техники (например, начальная и конечная стадии испытаний изделия с доработками) получены оценки показателя надежности \hat{P}_{k-1} и \hat{P}_{0k} и их средние квадратические отклонения $\sigma[\hat{P}_{k-1}]$ и $\sigma[\hat{P}_{0k}]$, причем \hat{P}_{k-1} и $\sigma[\hat{P}_{k-1}]$ соответствуют $(k-1)$ -му этапу (предварительная информация), а \hat{P}_{0k} и $\sigma[\hat{P}_{0k}]$ – k -му этапу. Тогда значение показателя надежности \hat{P}_k , вычисленное на k -м этапе с учетом предварительной информации, можно записать в виде:

$$\hat{P}_k = r_0 \hat{P}_{o\sigma} + (1 - r_0) \hat{P}_{ok}, \quad (12)$$

где \hat{P}_{ok} – оценка показателя надежности объекта, вычисленная на k -м этапе без учета предварительной информации;

$\hat{P}_{o\sigma}$ – объединенная оценка показателя надежности (оценка, полученная объединением данных k -го и $(k-1)$ -го этапов);

r_0 – оценка вероятности того, что статистические данные k -го и $(k-1)$ -го этапов принадлежат к одной генеральной совокупности.

Для определения составляющих модели, воспользуемся методом наименьших квадратов. При этом рассмотрим наиболее общий случай, когда оценки \hat{P}_{k-1} и \hat{P}_{0k} коррелированы с коэффициентом корреляции ρ , который характеризует линейную зависимость между случайными величинами.

Итак, результирующая сумма квадратов в общем случае будет иметь вид

$$Q^2(P) = \sum_{d=1}^S \sum_{t=1}^S [\hat{P}_d - P](D^{-1})_{dt} [\hat{P}_t - P], \quad (13)$$

где \hat{P}_d, \hat{P}_t – оценки показателя надежности, вычисленные на d -м и t -м этапах;

P – истинное неизвестное значение показателя надежности;

$(D^{-1})_{dt}$ – элемент обратной матрицы вторых моментов, находящийся на пересечении d -й строки и t -го столбца.

В условиях рассматриваемой задачи формула (13) принимает следующий вид:

$$Q^2(P) = (\hat{P}_{k-1} - P)^2 D_{11}^{-1} + (\hat{P}_{ok} - P)^2 D_{22}^{-1} + (\hat{P}_{k-1} - P)(\hat{P}_{ok} - P) 2D_{12}^{-1}. \quad (14)$$

Найдем элементы обратной матрицы вторых моментов $D_{11}^{-1}, D_{12}^{-1}, D_{22}^{-1}$. Поскольку оценки \hat{P}_{k-1} и \hat{P}_{0k} коррелированы с коэффициентом корреляции ρ , матрица вторых моментов не диагональна. Прямая матрица вторых моментов имеет вид

$$D = \begin{vmatrix} \sigma^2_{\hat{P}_{k-1}} & \rho\sigma_{\hat{P}_{k-1}}\sigma_{\hat{P}_{0k}} \\ \rho\sigma_{\hat{P}_{k-1}}\sigma_{\hat{P}_{0k}} & \sigma^2_{\hat{P}_{0k}} \end{vmatrix}, \quad (15)$$

где $\sigma_{\hat{P}_{k-1}} = \sigma[\hat{P}_{k-1}]$ и $\sigma_{\hat{P}_{0k}} = \sigma[\hat{P}_{0k}]$.

Обратная матрица D^{-1} находится из условия

$$DD^{-1} = I, \tag{16}$$

где $I = \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{vmatrix}$ – единичная матрица.

Проводя необходимые преобразования условия (16) с учетом выражения (14), находим обратную матрицу:

$$D^{-1} = \begin{vmatrix} -\frac{1}{\sigma_{\hat{P}_{k-1}}^2 (\rho^2 - 1)} & \frac{\rho}{\sigma_{\hat{P}_{k-1}} \sigma_{\hat{P}_{0k}} (\rho^2 - 1)} \\ \frac{\rho}{\sigma_{\hat{P}_{k-1}} \sigma_{\hat{P}_{0k}} (\rho^2 - 1)} & -\frac{1}{\sigma_{\hat{P}_{0k}}^2 (\rho^2 - 1)} \end{vmatrix}.$$

Далее, используя формулу (14), получаем выражение для результирующей суммы квадратов в виде:

$$Q^2(P) = \frac{(\hat{P}_{k-1} - P)^2}{\sigma_{\hat{P}_{k-1}}^2 (1 - \rho^2)} + \frac{(\hat{P}_{0k} - P)^2}{\sigma_{\hat{P}_{0k}}^2 (1 - \rho^2)} - \frac{2\rho(\hat{P}_{k-1} - P)(\hat{P}_{0k} - P)}{\sigma_{\hat{P}_{k-1}}^2 \sigma_{\hat{P}_{0k}}^2 (1 - \rho^2)}, \tag{17}$$

$$-1 < \rho < 1, \rho \neq 0.$$

Будем искать такую оценку показателя надежности объекта $\hat{P}_{0\hat{\sigma}}$, при которой результирующая сумма квадратов (17) достигает минимума $Q_{\min}^2 = Q^2(\hat{P}_{0\hat{\sigma}})$. Тогда для определения $\hat{P}_{0\hat{\sigma}}$ необходимо решить уравнение:

$$\left. \frac{\partial Q^2}{\partial P} \right|_{P=\hat{P}_{0\hat{\sigma}}} = \frac{2(\hat{P}_{k-1} - P)}{\sigma_{\hat{P}_{k-1}}^2 (1 - \rho^2)} + \frac{2(\hat{P}_{0k} - P)}{\sigma_{\hat{P}_{0k}}^2 (1 - \rho^2)} + \frac{2\rho[(\hat{P}_{0k} - P)(\hat{P}_{k-1} - P)]}{\sigma_{\hat{P}_{k-1}}^2 \sigma_{\hat{P}_{0k}}^2 (1 - \rho^2)} = 0,$$

откуда, проводя преобразования, получаем

$$\hat{P}_{0\hat{\sigma}} = \frac{\hat{P}_{k-1}(\sigma_{\hat{P}_{k-1}}^2 + \rho\sigma_{\hat{P}_{k-1}}\sigma_{\hat{P}_{0k}}) + \hat{P}_{0k}(\sigma_{\hat{P}_{k-1}}^2 + \rho\sigma_{\hat{P}_{k-1}}\sigma_{\hat{P}_{0k}})}{\sigma_{\hat{P}_{k-1}}^2 + \sigma_{\hat{P}_{0k}}^2 + 2\rho\sigma_{\hat{P}_{k-1}}\sigma_{\hat{P}_{0k}}}. \tag{18}$$

При отсутствии данных о корреляции оценок принимают коэффициент корреляции $\rho = 0$. Тогда выражение (7) имеет следующий вид:

$$\hat{P}_{0\hat{\sigma}} = \frac{\hat{P}_{k-1}\sigma_{\hat{P}_{0k}}^2 + \hat{P}_{0k}\sigma_{\hat{P}_{k-1}}^2}{\sigma_{\hat{P}_{0k}}^2 + \sigma_{\hat{P}_{k-1}}^2}. \tag{19}$$

Итак, получена формула (9), известная в литературе, например [2, 4], как формула объединения неравноточных оценок.

Теперь найдем выражение для оценки вероятности r_ρ . Для этого подставим в (17) вместо P выражение (18) и, выполнив преобразования, получим минимальную результирующую сумму квадратов:

$$Q_{\min}^2 = \frac{(\hat{P}_{k-1} - \hat{P}_{ok})^2 [(\sigma_{\hat{P}_{k-1}} + \rho\sigma_{\hat{P}_{ok}})^2 + (\sigma_{\hat{P}_{ok}} + \rho\sigma_{\hat{P}_{k-1}})^2]}{(1-\rho)^2 (\sigma_{\hat{P}_{k-1}}^2 + 2\rho\sigma_{\hat{P}_{k-1}}\sigma_{\hat{P}_{ok}} + \sigma_{\hat{P}_{ok}}^2)} +$$

$$+ \frac{(\hat{P}_{k-1} - \hat{P}_{ok})^2 2\rho(\sigma_{\hat{P}_{k-1}} + \rho\sigma_{\hat{P}_{ok}})(\sigma_{\hat{P}_{ok}} + \rho\sigma_{\hat{P}_{k-1}})}{(1-\rho)^2 (\sigma_{\hat{P}_{k-1}}^2 + 2\rho\sigma_{\hat{P}_{k-1}}\sigma_{\hat{P}_{ok}} + \sigma_{\hat{P}_{ok}}^2)}, \quad (20)$$

и в случае $\rho=0$ $Q_{\min}^2 = \frac{(\hat{P}_{k-1} - \hat{P}_{ok})^2}{\sigma_{\hat{P}_{k-1}}^2 + \sigma_{\hat{P}_{ok}}^2}, \quad (21)$

Статистика Q_{\min}^2 в виде (20) или (21), если известно ее распределение, может использоваться для определения оценки r_0 вероятности того, что данные двух этапов принадлежат к одной генеральной совокупности.

Широко известно [1, 2, 4, 7], что метод наименьших квадратов в своей основе содержит нормальное распределение. Поэтому статистика Q_{\min}^2 ведет себя как случайная величина, подчиняющаяся χ^2 распределению. Однако можно использовать для определения r_0 статистику $l_1 = \sqrt{Q_{\min}^2}$, которая подчиняется нормальному распределению и имеет следующий вид:

при $\rho \neq 0, -1 < \rho < 1,$

$$l_1 = \frac{|\hat{P}_{k-1} - \hat{P}_{ok}|}{\sqrt{\sigma_{\hat{P}_{k-1}}^2 + \sigma_{\hat{P}_{ok}}^2 + 2\rho\sigma_{\hat{P}_{k-1}}\sigma_{\hat{P}_{ok}}}} \times$$

$$\sqrt{\frac{(\sigma_{\hat{P}_{k-1}} + \rho\sigma_{\hat{P}_{ok}})^2 + (\sigma_{\hat{P}_{ok}} + \rho\sigma_{\hat{P}_{k-1}})^2 + 2\rho(\sigma_{\hat{P}_{k-1}} + \rho\sigma_{\hat{P}_{ok}})(\sigma_{\hat{P}_{ok}} + \rho\sigma_{\hat{P}_{k-1}})}{(1-\rho)^2}}; \quad (22)$$

при $\rho = 0$ $l_1 = \frac{|\hat{P}_{k-1} - \hat{P}_{ok}|}{\sqrt{\sigma_{\hat{P}_{k-1}}^2 + \sigma_{\hat{P}_{ok}}^2}}. \quad (23)$

В этом случае значение r_0 определится (рис. 1) как $r_0 = \text{Вер}\{l > l_1\}$, что полностью эквивалентно равенству

$$r_0 = 1 - \Phi(l_1), \quad (24)$$

где

$$\Phi(l_1) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{l_1} e^{-\frac{t^2}{2}} dt. \quad (25)$$

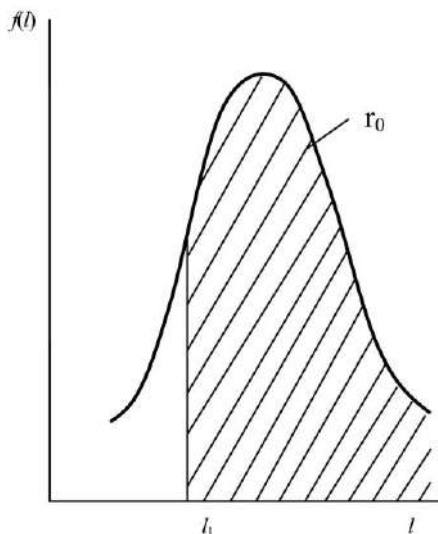


Рисунок 1 – Геометрическая интерпретация вероятности r_0

Функция (25) содержится, например, в работах [1, 2, 5, 8]. Среднее квадратическое отклонение $\sigma_{\hat{P}_k} = \sigma[\hat{P}_k]$ оценки показателя надежности объекта, вычисленной на k -м этапе с учетом предварительной информации, можно приближенно найти на основе использования формулы определения среднего квадратического отклонения функции случайных аргументов

$$\sigma_H \approx \sqrt{\sum_{i=1}^n \left[\frac{\partial H}{\partial x_i} \right]^2} (\sigma)_{x_i},$$

где H – функция случайных аргументов x_i , $i = \overline{1, n}$;

$(\sigma)_{x_i}$ – среднее квадратическое отклонение аргумента x_i .

Обозначив для $\rho = 0$

$$k_0 = \frac{\sigma_{\hat{P}_{ok}}^2}{\sigma_{\hat{P}_{k-1}}^2 + \sigma_{\hat{P}_{ok}}^2} \quad (26)$$

и для $\rho \neq 0$

$$k_0 = \frac{\sigma_{\hat{P}_{ok}}^2 + \rho \sigma_{\hat{P}_{k-1}} \sigma_{\hat{P}_{ok}}}{\sigma_{\hat{P}_{k-1}}^2 + \sigma_{\hat{P}_{ok}}^2 + 2\rho \sigma_{\hat{P}_{k-1}} \sigma_{\hat{P}_{ok}}}$$

получаем

$$\sigma_{\hat{P}_{ok}} = \sqrt{(r_0 k_0)^2 \sigma_{\hat{P}_{k-1}}^2 + (1 - r_0 k_0)^2 \sigma_{\hat{P}_{ok}}^2}. \quad (27)$$

Здесь уместно сделать следующее замечание. Модель (12) должна содержать в качестве составляющей r_0 истинное значение вероятности того, что статистические данные k -го и $(k-1)$ -го этапов принадлежат к одной генеральной совокупности. В практических расчетах это неизвестное истинное значение

заменяется оценкой r_0 , которая считается постоянной величиной при вычислении среднего квадратического отклонения (27). В этом смысле имеет место приближение, которое с точки зрения практики достаточно приемлемо.

Кроме того, с использованием формул (12) и (27) можно показать, каким образом положительная или отрицательная корреляция между оценками влияет на величину самой оценки и на величину ее среднего квадратического отклонения. Для этого можно рассчитать оценку показателя надежности \hat{P}_k на k -м этапе с учетом статистически неоднородной информации (выражение (12) и ее среднее квадратическое отклонение (27) при значении коэффициента корреляции $\rho = 0$ и значениях $-1 < \rho < 1$. Сравнивая последние значения с первым, можно оценить, как влияет корреляция на величину оценки и ее среднего квадратического отклонения.

Далее рассмотрим возможность **использования модели (12) для объединения статистических оценок типа средней наработки изделия на отказ.**

Пусть по-прежнему на $(k-1)$ -м и k -м этапах жизненного цикла какого-либо изделия получены оценки показателя надежности в виде средней наработки на отказ $\hat{T}_{0,k-1}$, \hat{T}_{0k} и характеристики точности $\sigma_{\hat{T}_{0,k-1}}$, $\sigma_{\hat{T}_{0k}}$.

Заметим, что эти оценки связаны с другим важным показателем надежности – интенсивностью отказов изделия:

$$\hat{\lambda}_{0,k-1} = \frac{1}{\hat{T}_{0,k-1}} \quad \text{и} \quad \hat{\lambda}_{0,k} = \frac{1}{\hat{T}_{0,k}}.$$

Поэтому все, что будет изложено ниже, относится и к этому показателю надежности.

Итак, для объединения этих оценок можно также использовать модель (12), которая принимает вид

$$\hat{T}_k = r_0 \hat{T}_{0\sigma} + (1 - r_0) \hat{T}_{0k}, \quad (28)$$

где \hat{T}_{0k} – оценка средней наработки изделия на отказ, вычисленная на k -м этапе без учета информации $(k-1)$ -го этапа;

$\hat{T}_{0\sigma}$ – объединенная оценка средней наработки системы на отказ (оценка, полученная объединением статистических данных k -го и $(k-1)$ -го этапов);

r_0 – по-прежнему, оценка вероятности того, что статистические данные k -го и $(k-1)$ -го этапов принадлежат одной генеральной совокупности.

Предположим, что оценки $\hat{T}_{0,k-1}$, и \hat{T}_{0k} не коррелированы. Тогда величину $\hat{T}_{0\sigma}$, входящую в модель (28), можно найти на основе формулы объединения неравноточных оценок

$$\hat{T}_{0\sigma} = \frac{\hat{T}_{0k} \cdot \sigma_{\hat{T}_{0,k-1}}^2 + \hat{T}_{0,k-1} \sigma_{\hat{T}_{0,k}}^2}{\sigma_{\hat{T}_{0,k-1}}^2 + \sigma_{\hat{T}_{0,k}}^2}. \quad (29)$$

Однако при практическом использовании модели (28) наибольшие трудности вызывает определение величины r_0 .

Выдвинем предположение, что априорно известен вид плотности распределения $f(t, T_0)$ исходной случайной величины - времени безотказной работы системы. Покажем, что при этом в качестве оценки r_0 можно использовать общую площадь под кривыми плотностей распределения $f_m(t, \hat{T}_{0,k-1})$, $f_n(t, \hat{T}_{0,k})$. Здесь m и n - количество наблюдений, по которым получены значения оценок $\hat{T}_{0,k-1}$ и $\hat{T}_{0,k}$ соответственно (рис. 2).

Докажем правомерность такого утверждения, основываясь на известном критерии Н.В. Смирнова [2], сущность которого заключается в следующем. Пусть $S_m(t, \hat{T}_{0,k-1})$ и $T_n(t, \hat{T}_{0,k})$ - статистические функции распределения времени безотказной работы системы, полученные соответственно на k -ми ($k - 1$)-м этапах. Составим разность

$$D_{mn}^+ = \sup_{0 < t < \infty} [S_m(t, \hat{T}_{0,k-1}) - T_n(t, \hat{T}_{0,k})].$$

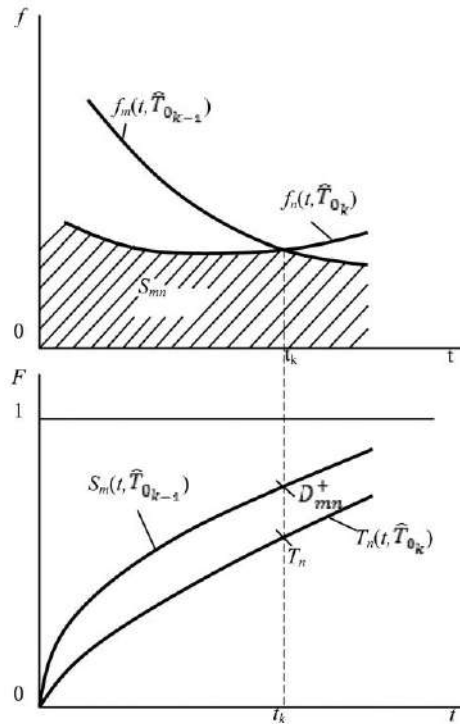


Рисунок 2 – Геометрическая интерпретация общей площади под кривыми плотностей распределения

Тогда имеет место следующее предельное соотношение:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P \left(\sqrt{\frac{mn}{m+n}} D_{mn}^+ < z \right) = 1 - e^{-z^2}, \forall z > 0. \quad (30)$$

Текущее значение функции разности D_{mn}^+ можно записать в виде

$$D_{mn}^+ = S_m(t, \hat{T}_{0,k-1}) - \hat{T}_n(t, \hat{T}_{0,k}) \quad (31)$$

Полагая, что максимум функции разности D_{mn}^+ совпадает с верхней границей множества D_{mn}^+ , найдем значение $t=t_k$, при котором наблюдается $\max D_{mn}^+$, с помощью классического способа поиска экстремальной точки:

$$\left. \frac{dD_{mn}^+}{dt} \right|_{t=t_k} = \frac{dS_m(t, \hat{T}_{0,k-1})}{dt} - \frac{d\hat{T}_n(t, \hat{T}_{0,k})}{dt} = 0. \quad (32)$$

Выразив функции $S_m(t, \hat{T}_{0,k-1})$ и $\hat{T}_n(t, \hat{T}_{0,k})$ через плотности распределения $f_m(t, \hat{T}_{0,k-1})$ и $f_n(t, \hat{T}_{0,k})$, подставив в (31) и дифференцируя по t , получим

$$f_m(t, \hat{T}_{0,k-1}) \Big|_{t=t_k} = f_n(t, \hat{T}_{0,k}) \Big|_{t=t_k}. \quad (33)$$

Из (33) следует, что максимум функции D_{mn}^+ наблюдается в точке $t=t_k$, где значения плотностей равны.

На рисунке 2 эта точка соответствует точке пересечения кривых плотностей распределения $f_n(t, \hat{T}_{0,k})$ и $f_m(t, \hat{T}_{0,k-1})$.

Численно функция разности D_{mn}^+ в точке t_k через плотности распределения выражается следующим образом:

$$D_{mn}^+ = S_m(t, \hat{T}_{0,k-1}) - T_n(t, \hat{T}_{0,k}) = \int_0^{t_k} f_m(t, \hat{T}_{0,k-1}) dt - \int_0^{t_k} f_n(t, \hat{T}_{0,k}) dt. \quad (34)$$

Из рисунка 2 видно, что общая площадь под кривыми плотностей распределения есть:

$$S_{mn} = 1 - \left[\int_0^{t_k} f_m(t, \hat{T}_{0,k-1}) dt - \int_0^{t_k} f_n(t, \hat{T}_{0,k}) dt \right] = 1 - D_{mn}^+. \quad (35)$$

Выражение (35) показывает, что для определения оценки r_0 вероятности того, что статистические данные k -го и $(k-1)$ -го этапов принадлежат к одной генеральной совокупности можно пользоваться общей площадью S_{mn} , что и завершает доказательство.

Далее целесообразно найти предельное соотношение для оценки r_0 , которое будет представлять собой вероятность того, что статистические данные k -го и $(k-1)$ -го этапов принадлежат к одной генеральной совокупности. Для этого необходимо

найти распределение величины S_m , при $n \rightarrow \infty$.

С этой целью перепишем (30) в виде

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P \left(D_{mn}^+ < \frac{z}{\sqrt{mn/(m+n)}} \right) = 1 - e^{-2z^2} \quad (36)$$

Ведём новые переменные $Z = \frac{z}{\sqrt{mn/(m+n)}}$, $y=Z+1$ тогда

$$P(D_{mn}^+ < Z) = P(-D_{mn}^+ > Z) = P(1 - D_{mn}^+ > Z+1) = \\ = 1 - P(1 - D_{mn}^+ < Z+1) = 1 - P(S_m < Y)$$

или

$$1 - P(S_m < y) = 1 - P(D_{mn}^+ < Z), \quad (37)$$

где $z = (y-1)\sqrt{mn/(m+n)}$.

Учитывая формулы (36) и (37), получаем предельное соотношение в виде

$$r_0 = \lim_{n \rightarrow \infty} P(S_m < y) = e^{-2 \left[(y-1) \frac{mn}{m+n} \right]^2}. \quad (38)$$

Используя предельное соотношение (38), можно определить величину r_0 , входящую в модель (28) для объединения оценок надежности, полученных в условиях неоднородной статистической информации.

Здесь уместно заметить, что для применения предельного соотношения (38) требуется, чтобы плотность распределения $f(t, T_0)$ была монотонной функцией. Часто на практике плотность распределения времени безотказной работы изделий представляет собой монотонную функцию (экспоненциальное распределение и др.). Для немонотонных функций целесообразно пользоваться оценкой r_0 в виде общей площади S_{mn} под кривыми плотностей распределения.

Таким образом, на основе метода наименьших квадратов, а также критерия Н.В. Смирнова, использующего предельное соотношение для объединения статистических функций распределения, определены все составляющие, входящие в модель объединения статистически неоднородной информации.

Практическое применение модели не требует установления конкретного уровня значимости гипотезы о принадлежности имеющихся статистических данных к одной генеральной совокупности, и эту модель целесообразно использовать в практике наземной отработки изделий космической техники для повышения точности оценки их надежности.

Литература

1. Гнеденко Б.В., Беляев Ю.К., Соловьев А.Д. Математические методы в теории надежности // М.: Наука. 1965. 524 с.
2. Смирнов Н.В., Дунин-Барковский И.В. Краткий курс математической статистики для технических приложений // М.: Физматгиз. 1959. 436 с.
3. Червонный А.А., Лукьященко В.И., Котин Л.В. Надежность сложных систем // М.: Машиностроение. 1972. 304 с.
4. Волков Л.И., Рудаков В.Б. Статистический контроль иерархических систем // М.: Изд-во СИП РИА. 2002. 360 с.

5. Меньшиков В.А., Рудаков В.Б., Сычев В.Н. Контроль качества космических аппаратов при отработке и производстве // М.: Машиностроение. 2009. 400 с.
6. Барлоу Р., Прошан Ф. Математическая теория надежности / Пер. с англ. // М.: Сов. Радио. 1969. 488 с.
7. Гнеденко Б.В. Курс теории вероятностей // М.: Физматгиз. 1961. 406 с.
8. Большев Л.Н., Смирнов Н.В. Таблицы математической статистики // М.: Наука. 1983. 416 с.
9. Беркетов Г.А., Блаженков В.В. и др. Современные математические методы анализа и синтеза сложных систем // М.: ВА им. Ф.Э. Дзержинского. 1984. 399 с.
10. Северцев Н.А., Шолкин В.Г., Ярыгин Г.А. Статистическая теория подобия: надежность технических систем // М.: Наука. 1986. 204 с.
11. Шор Я.Б. Статистические методы анализа и контроля качества и надежности // М.: Сов. Радио. 1962. 552 с.
12. Тескин О.И. Оценка надежности систем на этапе экспериментальной отработки // М.: Знание. 1981. 29 с.
13. Волков Л.И., Шишкевич Р.М. Надёжность летательных аппаратов // М.: ВШ. 1975. 292 с.

УДК 621.397

Методы повышения помехоустойчивости канала синхронизации телеметрического сигнала

О.Н. Сальников, инженер,
А.Д. Полубан, инженер 2-ой категории,
АО «Научно-производственное объединение измерительной техники»,
г. Королёв, Московская область

Методы кадровой синхронизации занимают важное место в процессе восстановления телеметрических данных, переданных по каналам связи с шумами различного происхождения, и существенно влияет на эффективность процедуры восстановления. Кадровая синхронизация важна в случае, если характер помех в канале связи и способы обработки передаваемой информации допускают пропуск достоверных и вставку ложных сообщений в поток данных телеизмерений, а также остановку и возобновление передачи в случайные моменты времени.

Синхронизация, телеметрия, помехоустойчивость.

Methods for increasing the noise immunity of the synchronization channel a telemetric signal

O.N. Salnikov, engineer,
A.D. Poluban, engineer of the 2nd category, JSC «Scientific and Production Association of Measuring Equipment», Korolev, Moscow region

Frame synchronization methods plays an important role in the process of restoring telemetry data transmitted through communication channels with noises of various origins, and significantly affects the efficiency of the recovery procedure. Frame synchronization is important in the event that the nature of interference in the communication channel and the methods of processing the transmitted information allow the transmission of reliable and false messages to the data stream of telemetry, as well as stop and resume transmission at random times

Synchronization, telemetry, noise immunity.

Канал синхронизации предназначен для обеспечения синхронной и синфазной работы коммутаторов каналов на передающей и приёмной стороне. Благодаря синхронизации сигнал n -го датчика поступает на вход n -го регистрирующего устройства.

Для того чтобы начало цикла работы коммутатора приемной станции совпадало с началом кадра приходящего сигнала, в полный телеметрический сигнал вводятся маркерные синхронизирующие импульсы. Они отмечают начало кадра и, как правило, располагаются перед началом канального интервала первого канала.

Для выделения маркерных импульсов из полного телеметрического сигнала, они выбираются отличающимися от остальных сигналов по амплитуде, длительности, высокочастотному заполнению, а также в виде кодовых групп. Иногда маркерный сигнал состоит из нескольких импульсов, распределенных по кадру (рис. 1). Структура этих сигналов должна быть такой, чтобы путем выбора соответствующего алгоритма работы селектора маркерных импульсов можно было однозначно определять начало кадра. В рассматриваемом примере (рис. 1) кадр начинается с первым длинным импульсом. Маркерные сигналы располагаются либо в защитных интервалах, либо занимают полностью один или несколько канальных интервалов. Таким образом, независимо от структуры маркерные сигналы позволяют однозначно определить начало кадра.

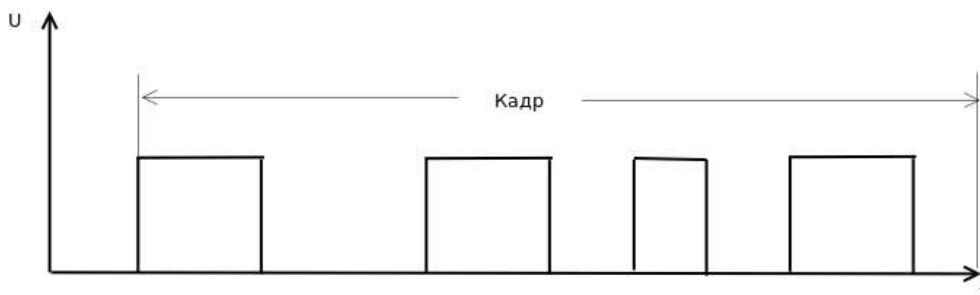


Рисунок 1 – Маркерный сигнал, состоящий из нескольких импульсов, распределенных по кадру

Помехоустойчивость синхронизации

Наиболее существенными требованиями, предъявляемыми к системе синхронизации, являются надёжность и точность.

Надёжность синхронизации определяется видом маркеров и структурой канала синхронизации. Количественной характеристикой надёжности может служить вероятность правильного приёма маркерной группы $P_{\text{рпм}}$ или вероятность ошибки при обнаружении маркера $P_{\text{ошм}}$. Значения этих вероятностей можно вычислить для различных типов маркеров и различных способов приёма сигналов, используя результаты теории приёма сигналов при наличии помех [1,2].

Особенность канала синхронизации состоит в том, что априорная вероятность появления маркера $P_{\text{ам}}$ значительно отличается от половины. Это объясняется большой скважностью следования маркеров.

При обнаружении маркера встречаются два вида ошибок: пропуск и ложная тревога. Пропуск маркера происходит тогда, когда в результате его взаимодействия с шумом результирующее напряжение оказывается похожим больше на шум, чем на сигнал, и мы принимаем решение об отсутствии маркера. Вероятность этого события обозначим $P_{\text{пп}}$.

Ложная тревога происходит тогда, когда интенсивные шумовые выбросы образуют комбинации, подобные маркерам. В этом случае мы можем принять решение о наличии маркера в то время, как его нет. Вероятность этого события обозначим как $P_{\text{лт}}$.

Используя принятые обозначения, найдём вероятности правильного приёма маркера и вероятность ошибки по формуле полной вероятности [3]:

$$P_{\text{прм}} = P_{\text{ам}}(1 - P_{\text{nn}}) + (1 - P_{\text{ам}})(1 - P_{\text{лт}}) \quad (1)$$

$$P_{\text{оим}} = P_{\text{ам}}P_{\text{nn}} + (1 - P_{\text{ам}}) * P_{\text{лт}} \quad (2)$$

Для вычисления по этим формулам необходимо определять вероятности пропуска и ложной тревоги. Если маркерный сигнал отличается от измерительных по амплитуде или длительности, то для расчета этих вероятностей можно воспользоваться соответствующими формулами из теории потенциальной помехоустойчивости [1,2]. Так как вид модуляции и форма сигналов известны, то вычисления не составят труда. Этими же формулами можно воспользоваться и при оптимальном приеме маркерных сигналов в виде кодовых групп импульсов, понимая под энергией сигнала энергию пачки импульсов:

$$Q = \sum_{i=1}^n Q_i \quad (3)$$

где n – число импульсов в маркере,

Q_i – энергия i -го импульса.

Рассмотрим применение схемы где маркерные сигналы имеют вид повторяющихся импульсов одинаковой интенсивности. Хорошие результаты в этом случае дает применение накопителей дискретного действия с двумя уровнями квантования (рис. 2).



Рисунок 2 – Структурная схема обнаружения маркера с помощью дискретных накопителей

Импульсы в группе одинаковы и совпадают по форме с измерительными и опорными. Приемник сигналов согласован с одиночным импульсом. Кроме того в приемнике осуществляется стробирование сигналов маркера. Первое пороговое устройство производит обнаружение одиночных импульсов. В том случае если входной сигнал превосходит заданный пороговый уровень, принимается решение, что присутствует сигнал, и на выходе первого порогового устройства появляется импульс с фиксированными длительностью и амплитудой. Второе пороговое устройство выдает решение о наличии маркера в том случае, если появляется больше чем m импульсов из n импульсов кодовой группы ($m < n$). Число m называют порогом счёта.

Вероятности превышения напряжением шума и сигнал плюс шум порога первого порогового устройства для заданных видов модуляции вычисляются при изложении теории помехоустойчивости. Эти вероятности обозначаются $P_{\text{ш}}$ и $P_{\text{с}}$ соответственно. Вероятность того что при n сигналах в маркере возникнет i ошибок определяется биномиальным законом:

$$c_n^i p_{u}^i (1 - p_{u})^{n-i} \quad (4)$$

Аналогично вероятность правильного приема i сигналов определяется, как

$$c_n^i p_c^i (1 - p_c)^{n-i} \quad (5)$$

Используя эти формулы, можно найти вероятности ложной тревоги и правильного обнаружения ($P_{пр} = 1 - P_{лп}$), которые соответственно равны

$$P_{лп} = \sum_{i=m}^n c_n^i p_{u}^i (1 - p_{u})^{n-i} \quad (6)$$

$$P_{пр} = \sum_{i=m}^n c_n^i p_c^i (1 - p_c)^{n-i} \quad (7)$$

где m – порог отсчёта.

Эти результаты с учетом формул (1) и (2) позволяют оценить надёжность синхронизации с применением маркеров методом дискретного счета.

Из приведенного рассмотрения можно сделать вывод о том, что надёжность синхронизации определяется энергией маркерного сигнала, используемыми методами модуляции и приёма.

При оценке точности синхронизации появляется необходимость учета формы маркерного сигнала. Для работы системы синхронизации важное значение имеет точное и однозначное определение временного наложения маркерного сигнала. Это и предъявляет требование к форме маркерного сигнала.

В теории потенциальной помехоустойчивости показывается, что оптимальный приёмник, позволяющий наиболее точно оценить параметры сигнала, производит операцию свертки ожидаемого и принимаемого сигналов [1]. В связи с этим для рассмотрения вопроса о форме сигнала целесообразно исследовать его взаимокорреляционную функцию

$$R(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} S(t) S^*(t - \tau) e^{j\omega t} dt \quad (8)$$

Наилучшая форма сигнала $S(t)$ будет в том случае, если эта функция будет иметь узкий пик в начале координат и нуль при остальных значениях τ . Чем уже пик, тем выше точность определения временного положения маркера (рис. 3).

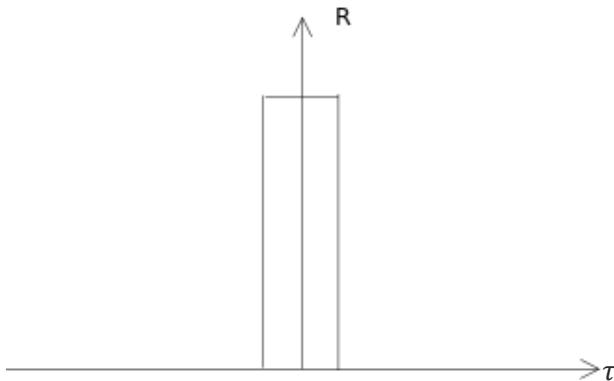


Рисунок 3 – Автокорреляционная функция маркера наилучшей формы

При прохождении через приёмное устройство сигнал искажается шумами, но и в этом случае $R(\tau)$ позволяет судить о степени приближения формы сигнала к наилучшей.

Вследствие искажения маркерных сигналов в радиоканале момент появления кадрового синхроимпульса будет от такта к такту меняться. Точность синхронизации можно характеризовать отклонениями в положении кадрового синхроимпульса. В связи с этим возникает два вопроса:

1. Как построить схему выделения синхросигналов, чтобы эти ошибки были наименьшими?
2. Какова величина этих ошибок?

Схема выделения синхросигналов

В общем случае для решения задачи обнаружения и определения временного положения сигнала нужны две оптимальные схемы, каждая из которых решает только свою задачу. При этом результат второй схемы, осуществляющей измерение принимается во внимание только в том случае, если обнаружение достаточно надёжное. Так как требования к надёжности синхронизации РТС очень высокие, то приходится обеспечивать большое отношение сигнал/шум на входе приемного устройства. При этом оказывается, что обнаружение и определение временного положения может осуществляться одним приемным устройством. Если отсчёт производится по максимуму, то оптимальным является приемник, реализующий принцип максимальной обратной совместимости. В случае отсчета по фронту он содержит дополнительный дифференцирующий элемент.

Ошибки синхронизации при генерировании синхроимпульса в момент максимума сигнала на выходе фильтра маркера

Среднеквадратическая ошибка временного положения максимума, смещающегося под действием внутренних шумов приемного устройства, определяется из формулы [1,8]

$$\delta_{\tau}^2 = \frac{N_0}{\int_{\tau}^{\tau+\tau_u} \left[\frac{\partial a(t-\tau)}{\partial \tau} \right]^2 dt} \quad (9)$$

где N_0 – спектральная плотность мощности шумов;

a – огибающая сигнала;

τ_u – длительность сигнала;

τ – задержка прихода импульса.

Эту формулу можно записать в ином виде

$$\delta_{\tau}^2 = \frac{N_0}{\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \omega^2 |G(j\omega)|^2 d\omega} \quad (10)$$

где $G(j\omega)$ – комплексный спектр огибающей $a(t)$.

Учитывая что энергия сигнала

$$Q = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} a^2(t) dt = \frac{1}{4\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |G(j\omega)|^2 d\omega \quad (11)$$

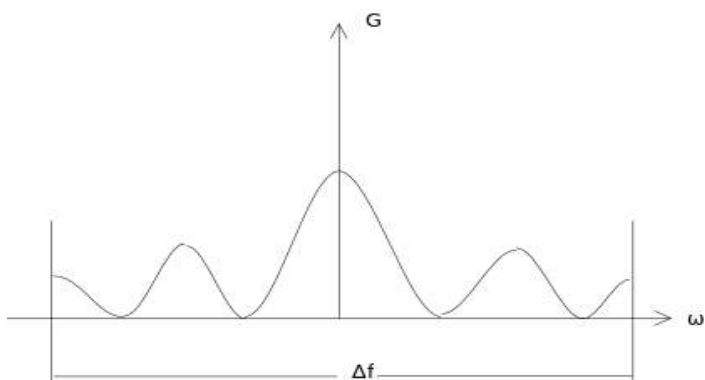
формулу (10) можно преобразовать к виду

$$\delta_{\tau}^2 = \frac{N_0}{2Q\beta^2} \quad (12)$$

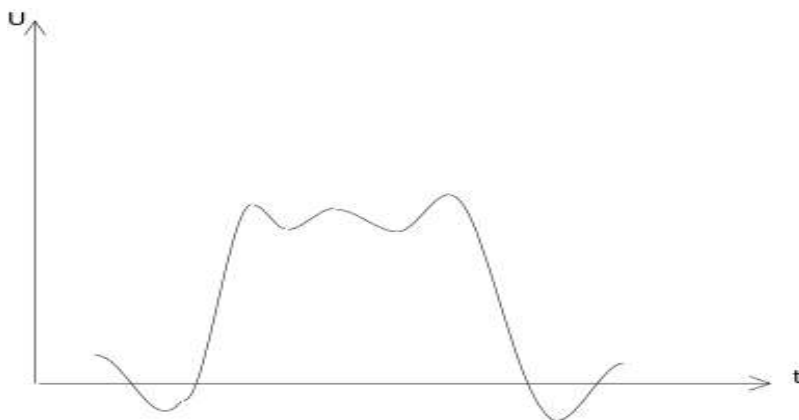
где

$$\beta^2 = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \omega^2 |G(j\omega)|^2 d\omega}{\int_{-\infty}^{\infty} |G(j\omega)|^2 d\omega} \quad (13)$$

Приведенные формулы показывают, что с увеличением крутизны фронтов или ширины спектра маркера точность синхронизации увеличивается. Определим ошибки синхронизации для некоторых видов сигналов:



а)



б)

Рисунок 4 – Временная диаграмма (б) и спектр (а) почти прямоугольного импульса

а) огибающая импульса имеет прямоугольный спектр в полосе Ω . В этом случае

$$\beta = \frac{1}{3} \omega^2 \quad \sigma_{\tau}^2 = \frac{3N_0}{2Q\omega^2} \quad (14)$$

б) прямоугольный импульс с ограниченной полосой спектра (рис. 4).

$$\sigma_{\tau}^2 \approx \frac{N_0\tau}{4\Delta fQ} \quad (15)$$

в) огибающая представляет собой идеальный прямоугольный импульс. В этом случае $\beta^2 = \infty$ и $\sigma_{\tau}^2 = 0$.

Ошибки синхронизации при генерировании кадрового синхроимпульса в соответствии с положением фронта маркерного сигнала

Под действием шумов $n(t)$ в канале связи происходит искажение маркерного импульса (рис. 5). Генерирование кадрового синхроимпульса происходит в момент достижения принимаемым маркерным сигналом некоторого порогового уровня. Таким образом производится «отсчет» временного положения маркера. Вследствие искажения принимаемого сигнала происходит ошибка «отсчета» $\Delta\tau$, представляющая собой погрешность синхронизации. Произведем оценку данной погрешности.



Рисунок 5 – Определение ошибок отсчета положения фронта импульса

Из рисунка 5 следует, что

$$\frac{\Delta\tau}{n} \approx \frac{\tau_{\phi}}{U} \quad (16)$$

где τ_{ϕ} – длительность фронта маркерного импульса,

U – его амплитуда.

Смещение фронта

$$\Delta\tau \approx \frac{\tau_{\phi}}{U} n, \quad (17)$$

а дисперсия этого смещения

$$\delta_{\tau}^2 = \Delta\tau^2 = \frac{\tau_{\phi}^2}{U^2} n^2 \quad (18)$$

Эта формула пригодна для практических расчетов. Однако ее можно представить в более удобном виде, для этого необходимо провести некоторые преобразования. Если $\tau_{\phi} = \frac{1}{\Delta f}$, то

$$\delta_{\tau}^2 = \frac{1}{\Delta f^2 U^2} n^2 = \frac{N_0}{\Delta f U^2}, \quad (19)$$

так как $N_0 = \frac{n^2}{\Delta f}$.

Энергия принятого сигнала $Q \approx \frac{U^2}{2} \tau_U$, и следовательно, $U^2 = \frac{2Q}{\tau_U}$. Подставляя значения U^2 в формулу (19), получаем

$$\delta_{\tau}^2 = \frac{N_0 \tau_U}{2Q \Delta f} \quad (20)$$

Сравнение выражений (14) и (19) показывает, что в первом (оптимальном) случае дисперсия оказывается в два раза меньше чем во втором.

Аналогичными выкладками можно показать, что если определить «отсчет», как среднее положение переднего и заднего фронта импульса ($\tau = \frac{\tau_{п} + \tau_{з}}{2}$), то дисперсия ошибки

$$\delta_{\tau}^2 = \frac{N_0 \tau}{2Q \Delta f} \quad (21)$$

Сравнение (21) и (15) говорит о том, что с помощью простого алгоритма работы в некоторых случаях можно добиться таких же результатов, что и при оптимальной обработке сигналов.

Вывод

Таким образом можно сделать вывод, что при фиксированной длительности маркера полезно увеличить его спектр. В этом случае в соответствии с формулами (12), (20) точность синхронизации будет повышаться. Достигнуть расширения спектра можно путем частотной модуляции импульса маркера, дробления его на ряд более коротких импульсов. В связи с этим псевдошумовые сигналы, обладающие широким спектром, позволяют получить высокую точность синхронизации.

Литература

1. Дуленко Ю.Д., Сафаров Р.Т. Принципы телеметрии и методы передачи телеметрической информации. Учебное пособие «Основы радиотелеметрии». ч. 1. ЛВИКА. 1966.
2. Фалькович С.Е. Прием радиолокационных сигналов на фоне флуктуационных помех // Советское радио. 1961.
3. Ключев Н.Ф. Обнаружение импульсных сигналов в шумах посредством накопителей дискретного действия // ЛКВВИА им. А.Ф. Можайского. 1960.
4. Колесников Б.Г., Галатова Е.В. К вопросу о тактовой синхронизации в

цифровых сетях // Вестник ростовского государственного университета путей сообщения. Ростовский государственный университет путей сообщения. 2006. с. 68-72.

5. Волков Л.Н., Немировский М.С., Шинаков Ю.С. Системы цифровой радиосвязи // М.: Эко-Трендз. 2005. с 392.
6. Стаценко Л.Г., Железняков Е.И., Ковылин А.А. Применение частотной и фазовой модуляции для многочастотных каналов связи в случае многолучевого распространения // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2011. с. 84-91.

УДК 004.021

Обеспечение внедрения модернизируемой структуры и автоматизации процессов управления воздушным движением в зоне ответственности Московского района управления воздушным движением

А.В. Струкова, аспирант кафедры информационных технологий и управляющих систем,
Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Московской области «Технологический университет», г. Королев, Московская область

В статье рассмотрена новая автоматизированная система организации воздушного движения «Синтез АР4», а также приведено системное описание обеспечения внедрения модернизируемой структуры воздушного пространства, навигации и наблюдения, которое обеспечивает технические возможности. Приведен ряд функциональных возможностей и достоинств системы по безопасности воздушного пространства.

Организация воздушного движения (ОрВД), автоматизированная система (АС), воздушное пространство (ВП), воздушное судно (ВС), автоматизированные рабочие места (АРМ), единая система организации воздушного движения (ЕС ОрВД), Комплекс средств автоматизации управления воздушным движением (КСА УВД).

Ensuring the implementation of the modernized structure and automation of air traffic control processes in the area of responsibility of the Moscow district of air traffic control

A.V. Strukova, graduate student the Department of Information technologies and control systems,
State Educational Institution of Higher Education
Moscow Region «University of technology», Korolev, Moscow region

The article considers the new automated air traffic management system «Synthesis AR4», as well as a system description for ensuring the implementation of a modernized airspace structure, navigation and surveillance that provides technical capabilities. A number of functional capabilities and advantages of the airspace security system are presented.

Air Traffic Management (ATM), Air Traffic Control (ATC), Automated System (AS), Airspace (VP), Aircraft (VS), workstations (automated workstations), Unified Air Traffic Management System (ATM), Air Traffic Control Automation System (ATC).

Комплексные автоматизированные системы КСА УВД «СИНТЕЗ»
ВНИИРА – традиционный разработчик автоматизированных систем управления воздушным движением. В 1975г. разработана первая отечественная

АС УВД «СТАРТ», включающая обработку радиолокационной информации ВРЛ и ПРЛ и элементов текущих планов полета [1-3].

В 1986г разработана АС УВД второго поколения «СПЕКТР», в которой автоматизирован расчет пространственно-временных (4D) траекторий и анализ воздушной обстановки на бесконфликтность (STCA, MSAW).

В 90-х и начале 2000-х г.г. создан унифицированный ряд (УР) АС УВД «СИНТЕЗ», реализующий наивысший уровень автоматизации.

Уровень используемых технических средств и решаемых функциональных задач от ВНИИРА соответствует уровню ведущих мировых производителей АС УВД и значительно превосходит все отечественные аналоги [4, 5].

АС УВД «Синтез» последнего поколения не имеет аналогов, в этой системе реализуется 10 уникальных функций, полного набора которых нет ни в одной системе АС УВД Европы. УР АС УВД «СИНТЕЗ» оснащены более 40 центров УВД как в России так и за рубежом [7].

Новый центр управления полетами (ЦУП) филиала «МЦ АУВД» ФГУП «Госкорпорация по ОрВД».

10 октября 2017 года в 02.00 мск осуществлен ввод в эксплуатацию нового центра управления полетами (ЦУП) филиала «МЦ АУВД» ФГУП «Госкорпорация по ОрВД». Столь масштабный и уникальный проект реализован в России впервые. Переход на управление воздушным движением посредством новой отечественной системы имеет стратегическое государственное значение.

Новый Центр управления полетами, оснащенный АС ОрВД «Синтез-АР4», пришел на смену функционирующей с 1981 года автоматизированной системе УВД «ТЕРКАС», которая на текущий момент, вследствие ее морального и физического износа, не полностью отвечает современным требованиям в части обеспечения пропускной способности, согласованного принятия решений, эффективных траекторий для эксплуатантов в условиях высокой интенсивности.

На долю «МЦ АУВД» ФГУП «Госкорпорация по ОрВД» приходится порядка 60% от всего объема воздушного движения над территорией РФ. Площадь ответственности составляет 730 тысяч квадратных километров, на которой размещено 70 аэродромов, а именно: 16 аэродромов для полетов гражданской авиации, 48 аэродромов госавиации и 6 аэродромов экспериментальной авиации. Воздушное пространство, обслуживаемое Московским центром, превосходит по размерам территории некоторых Европейских государств более чем в полтора раза.

Объемы воздушного движения также сопоставимы, по количеству взлетно-посадочных операций московские аэродромы превосходят ряд европейских. По количеству автоматизированных рабочих мест АС ОрВД Московского центра является крупнейшей в Европе.

Решение о строительстве и оснащении Нового центра управления полетами для Московского укрупненного центра единой системы ОрВД было принято Распоряжением Правительством Российской Федерации от 27 августа 2007 года № 1130-р.

Работы выполнялись генеральным подрядчиком АО «Концерн ВКО «Алмаз-Антей» по Государственному контракту с привлечением субподрядных организаций ОАО «ВНИИРА», ОАО «Фирма «НИТА», ООО «ЛОТЕС ТМ».

Общее количество бюджетных и внебюджетных средств для создания и внедрения КСА УВД «Синтез-АР4» составляет 3 726 673, 36 тыс. руб.

Следует отметить, что на момент утверждения технического задания и заключения контракта российской промышленностью не производился серийный выпуск оборудования с характеристиками, необходимыми для оснащения Московского центра, и данную систему АО «Концерн ВКО «Алмаз-Антей» разрабатывало на основе имеющихся систем, а также с учетом дополнительных требований заказчика [6].

На протяжении 2012-2016 годов проводились «тестовые» испытания системы, в которых принимали участие инженерный и диспетчерский состав филиала «МЦ АУВД». В течение всего периода велась работа по исправлению выявленных специалистами филиала «МЦ АУВД» замечаний, без устранения которых безопасная эксплуатация нового ЦУПа была бы невозможна. После проведенных в конце 2016 года приемочных эксплуатационных испытаний, которые подтвердили отсутствие замечаний у специалистов филиала «МЦ АУВД», было принято решение о переводе УВД в новый центр.

Вводу в эксплуатацию нового Центра управления полетами предшествовали испытания и настройка оборудования, большая работа по тестированию системы и рабочих мест, а также обучение персонала и тренажерная подготовка.

Для инженерного состава филиала наиболее важной стороной подготовки стало изучение порядка эксплуатации нового технологического оборудования. Поскольку элементная база новых систем ОВД кардинально отличается от техники, на которой построена АС УВД «ТЕРКАС», её диагностика и техническое обслуживание также отличается от давно освоенных технологий технической эксплуатации. Для освоения новых видов оборудования инженерный персонал прошел персонально ориентированные специализированные курсы обучения. Технический персонал, допущенный к эксплуатации входящего в состав комплекса оборудования, должен иметь специальное техническое образование в области радиотехники, компьютерных и информационных технологий. Для обслуживания комплекта поставляемого в составе комплекса оборудования при круглосуточной эксплуатации необходимы следующие категории инженерно-технического персонала для сменной и ежедневной работы:

- инженер по РН, РЛ и связи – системный администратор;
- инженер по РН, РЛ и связи.

Количество обслуживающего персонала должно быть достаточным для организации обслуживания КСА УВД и определяется эксплуатантом. В процессе эксплуатации комплекса помимо настоящего РЭ необходимо руководствоваться также действующими в ведомстве Заказчика правилами эксплуатации, наставлениями, инструкциями, приказами и положениями по технике безопасности и пожаробезопасности. Допуск к самостоятельному обслуживанию материальной части системы производится в соответствии с действующими в ведомстве Заказчика положениями. К маю 2017 года весь диспетчерский персонал прошёл подготовку для работы на технологическом оборудовании АС ОрВД «Синтез-АР4» и в последующем проходил тренировки на тренажёре и на

системе для поддержания практических навыков, в том числе и при подготовке к работе в осенне-зимний период. Успешному выполнению подготовки способствовало активное участие значительной части диспетчерского и инструкторского персонала в проведении многочисленных проверок и испытаний нового оборудования, функционала системы, отработки интерфейса, эргономики и информативности отображения информации. Для проведения испытаний нередко формировались группы до 50-60 специалистов ежедневно, что позволило уже в этот период ознакомиться с новой системой большинству специалистов.

АС ОрВД «Синтез АР4» обрабатывает информацию от 21 источника радиолокационной информации (включая смежные центры), 13 источников автоматического зависимого наблюдения и 3-х автоматических радиопеленгаторов. Количество автоматических приемо-передающих центров – 25. Наземное оборудование Московского Узлового Диспетчерского Района (МУДР) обеспечивает выполнение полетов по спецификации RNAV-1. Наземное оборудование Районного Центра (РЦ) обеспечивает выполнение полетов по спецификации RNAV-5.

В состав АС ОрВД «Синтез АР4» входят следующее количество автоматизированных рабочих мест (АРМ) (рисунок 1):

- 31 АРМ Планирование использования воздушного пространства и организации потоков воздушного движения (ЗЦ);
- 72 АРМ Аэродромного диспетчерского центра (АДЦ);
- 83 АРМ Районного диспетчерского центра (РДЦ);
- 2 АРМ Местного диспетчерского пункта (МДП);
- 22 АРМ Средств технического управления и контроля, а также средств объективного контроля, и тестового комплекса;
- Количество рабочих мест тренажерного комплекса составляет 46 АРМ.



Рисунок 1 – Автоматизированное рабочее место в новом ЦУПе

Установленное современное оборудование позволит повысить интенсивность полетов в Московской зоне путем увеличения пропускной способности секторов УВД за счет увеличения автоматизации процессов обслуживания воздушного движения и применения новых технологий.

Следует также отметить, что в настоящее время значения пропускной способности воздушного пространства существующей структуры, приближается к пороговым показателям. И имеющиеся ограничения самой структуры использования воздушного пространства не позволяет существенно её увеличить.

Технические возможности нового Центра управления полетами оснащенного современной АС ОрВД позволят осуществить переход на новую структуру Московской зоны воздушного пространства.

Воздушное пространство Московской зоны ЕС ОрВД в новой структуре будет разделено на 44 сектора (22 – РДЦ, и 22 – МАДЦ).

В рамках реализации ФЦП «Модернизация Единой системы организации воздушного движения Российской Федерации (2009–2020)» осуществляется поэтапное совершенствование навигационной инфраструктуры Московской зоны. В настоящее время введены в действие 30 средств навигации (ДМЕ и ВОР/ДМЕ).

Внедрение современной структуры воздушного пространства Московской зоны ЕС ОрВД в Центре управления полетами, оснащенного современной АС ОрВД, в комплексе с развитием аэродромной и наземной инфраструктуры аэродромов обеспечит перспективы развития Московской зоны ЕС ОрВД такие как:

- повышение пропускной способности воздушного пространства;
- обеспечение полета воздушных судов по оптимальным траекториям при вылете/прилете;
- снижение нагрузки на окружающую среду;
- обеспечение роста объема авиаперевозок столичных аэропортов;
- снижение нагрузки на пилота и авиадиспетчера.

В новой АС ОрВД реализован ряд функциональных возможностей:

- автоматизированный обмен информацией о планах полетов с соседними центрами УВД;
- обнаружение краткосрочных и среднесрочных конфликтных ситуаций на глубине прогноза до 8 минут и от 8 до 20 минут соответственно;
- контроль за выдерживанием горизонтальной и вертикальной траектории воздушных судов (MONA);
- поддержка при принятии решений диспетчером (CORA);
- обработка информации, поступающей от радиолокатора режима «S» (на индикаторе у диспетчера отображаются выставленные пилотом в кабине параметры полета ВС (скорость, высота), что позволяет диспетчеру контролировать корректность и правильность переданной и принятой команды);
- после оснащения АКДП Московских аэродромов будет реализовано управление прилетающим и вылетающим потоком воздушных судов (AMAN/DMAN).

Автоматизированная система управления воздушным движением КСА

УВД «СИНТЕЗ-АР4» представляет собой совокупность взаимосвязанных подсистем и комплексов, которые в свою очередь состоят из множества технических и программных средств, решающих различные функциональные задачи (рисунок 2).

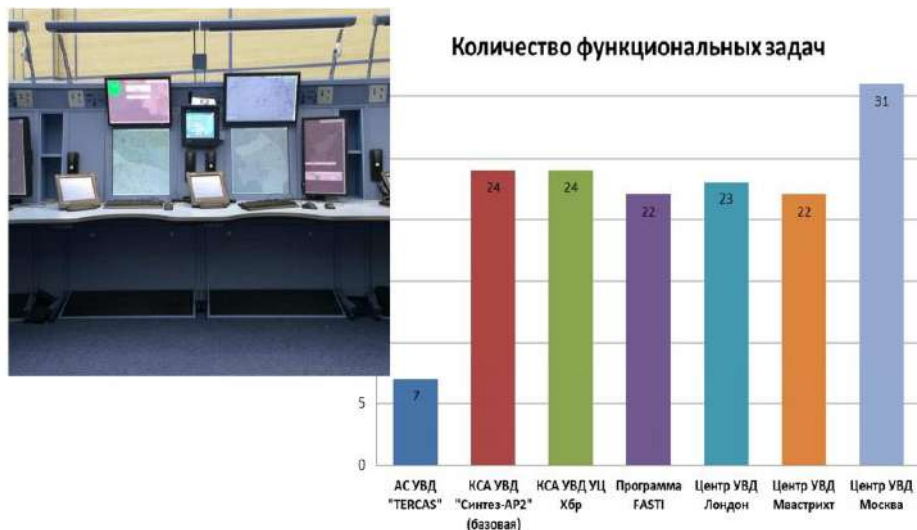


Рисунок 2 – КСА УВД «СИНТЕЗ-АР4» - функциональные задачи

Характер решаемых задач требует высокой надежности как системы в целом, так и ее компонентов.

Также следует рассмотреть дополнительные функциональные возможности:

Safety Net – подсистема контроля безопасности, состоит:

- STCA (Short Term Conflict Alert) – предостережение о краткосрочных конфликтных ситуациях (до 2 минут), о снижении ниже безопасного эшелона;
- APW (Area Proximity Warning) – функция АС УВД, которая обеспечивает обнаружение входа воздушного судна в зону наблюдения на интервале 1-2 минут (и входа) в зону воздушного сектора, в котором полет данного ВС не может осуществляться, и оповещение диспетчера;

TP (Trajectory Prediction) – прогнозирование 4 D траектории ВС на основе:

- тактического (текущего) плана полета,
- информации о погоде;
- характеристик ВС;
- радиолокационных данных о движении ВС;
- а также с учетом диспетчерских разрешений.

MTCD (Medium-Term Conflict Detection)

- обнаружение среднесрочных конфликтных ситуаций на глубине 20-60 мин. Обеспечивает обнаружение среднесрочных конфликтов на основе 4D траекторий с учетом эшелонирования для различных фаз полета.

MONA (Monitoring Aids) – контроль соответствия и напоминания. Позволяет обнаружить отклонения ВС от заданной 4D траектории движения с

дальнейшей сигнализацией об этом диспетчеру или запуском перерасчета траектории. Кроме этого обеспечивает напоминание диспетчеру о необходимых действиях.

CORA – Помощь диспетчеру в разрешении среднесрочных конфликтов:

- повышение качества решений по разрешению ПКС.
- повышение безопасности воздушного движения.
- снижение нагрузки на диспетчеров УВД.

SYSCO – Автоматизация взаимодействия между центрами УВД:

- повышение безопасности воздушного движения;
- снижение нагрузки по ведению связи со смежными Центрами УВД и вводу информации в систему.

CPDLC – Передача команд диспетчера на ВС:

- снижение нагрузки на диспетчеров по ведению радиообмена;
- повышение безопасности из-за снижения ошибок.

AMAN/DMAN предназначено для упорядочивания потоков ВС в заданных участках ВП и является средством поддержки принятия решений диспетчером в процессе УВД.

Основная задача AMAN – обеспечить автоматизированную помощь диспетчерам УВД в управлении потоком прибывающих ВС:

- в определённом ВП (например, точки прибытия по маршруту);
- в определённых точках регулирования потока (например, порог ВПП).

Основная задача DMAN – обеспечить автоматизированную поддержку планирования и регулирования очередности вылетов в аэропорту. Система DMAN позволяет:

- уменьшить возможную задержку вылета на стоянке без запуска двигателей;
- выполнять руление и взлёт без задержек на предварительном старте.

Рабочее место AMAN или DMAN обеспечивает диспетчеров УВД:

- графическим представлением рассчитанной очередности;
- рекомендациями по управлению потоком ВС для реализации этой очередности.

Система AMAN отображает рекомендации диспетчерам для управления потоком ВС. Рекомендации могут включать:

- время замедления (TTL) для погашения задержки;
- время ускорения (TTG) для компенсации отставания;
- рекомендации на изменение траектории (СНТ).

Система DMAN для регулирования потока вылетающих ВС выполняет:

- расчёт контрольного времени уборки колодок (ТОВТ);
- расчёт времени запуска двигателей (TSAT);
- расчёт времени взлёта (ТТОТ).

На рабочем месте AMAN/ DMAN (рисунок 3):

- отображается фактическая и желаемая очередность пролёта выбранной точки;
- предоставляется графический интерфейс;
- для просмотра и воздействия на поток ВС (выстраивания очередности ВС);
- интерфейс для ввода запретов и ограничений в выбранных точках;

- интерфейс для настроек параметров отображения.

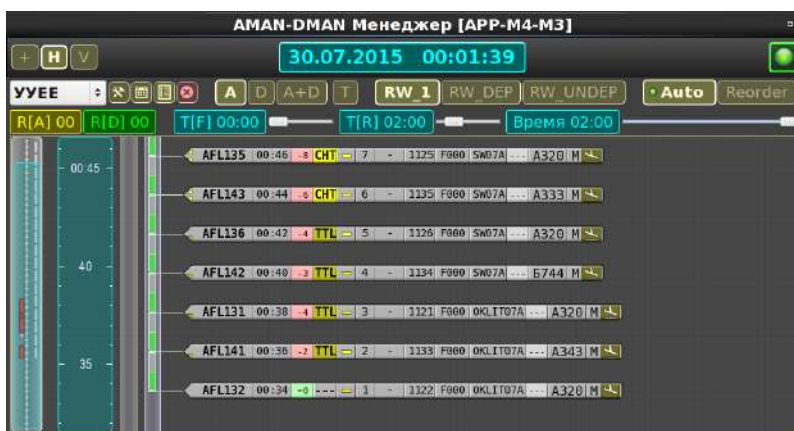


Рисунок 3 – Окно AMAN/DMAN

ADS-B – обработка данных системы автоматического зависимого наблюдения:

- повышение полноты и точности информации наблюдения;
- повышение качества решения задач УВД;
- повышение безопасности ВД.

Безопасность воздушного движения

По оценке EUROCONTROL реализация только 4-х дополнительных функций (TP, MTCD, MONA, SYSCO) в рамках программы FASTI обеспечит:

- более чем ДВУХКРАТНОЕ снижение риска катастроф;
- увеличение пропускной способности до 15% в верхнем воздушном пространстве;
- уменьшает время пролета воздушного судна на 5% для каждого центра УВД;
- уменьшает вредные выбросы от каждого воздушного судна на 160 кг.

Эффективность использования воздушного пространства.

Обоснование.

На основании расчетов, опубликованных Eurocontrol: Внедрение MTCD, MONA и SYSCO обеспечивает. Повышение пропускной способности секторов на:

15% – в верхнем воздушном пространстве

10% – в нижнем воздушном пространстве

Повышение безопасности полетов в 2 раза.

Внедрение AMAN обеспечивает повышение пропускной способности взлетно-посадочных полос (ВПП) на 15%, района аэродрома – на 30%.

Интеграция AMAN и DMAN обеспечит повышение пропускной способности до 10%.

Внедрение 3 функций (MTCD, MONA и SYSCO) обеспечит повышение пропускной способности секторов на 15%. Реализация 5 ключевых функциональных задач позволит увеличить пропускную способность на 50%, что составляет порядка 20-25 млн. пассажиров в год.

В рамках Федеральной целевой программы «Модернизация Единой системы организации воздушного движения Российской Федерации 2009-2020», реализуемой Госкорпорацией под контролем Министерства транспорта РФ и Росавиации, уже введены в эксплуатацию укрупненные центры ЕС ОрВД в Хабаровске, Самаре, Магадане, Иркутске, Красноярске. На подходе центры в Тюмени и Екатеринбурге. Для значительного увеличения пропускной способности Московской воздушной зоны входящие в АС ОрВД аэродромные командные диспетчерские пункты (АКДП) крупнейших аэропортов: Домодедово, Шереметьево и Внуково в ближайшее время должны быть оснащены новым перспективным оборудованием разработки АО «Концерн ВКО «Алмаз-Антей», которое может обмениваться информацией с АС ОрВД.

Хочется выразить глубокую благодарность всем специалистам, принявшим участие в этой неординарной, кропотливой, крайне ответственной и непростой задаче по созданию и внедрению новой АС ОрВД МЦ АУВД. Отдельно хотелось бы отметить вклад сотрудников многих министерств и ведомств, прежде всего, Правительства РФ, Минэкономразвития, Минфин, Минтранс, ФСТЭК, научных организаций, которые приняли участие во внедрении АС УВД для Московского центра управления воздушным движением.

Литература

1. Автоматизированные системы управления воздушным движением: Учеб. пособие / А.Р. Бестугин, М.А. Велькович, А.В. Володягин [и др.]; под научн. ред. Ю.Г. Шатракова. – 2-е изд., испр. и доп. // СПб.: Политехника. 2014. 450 с.
2. Автоматизированные системы управления воздушным движением. Учеб. пособие // М.: МГТУ ГА. А.И. Логвин, Д.А. Епифанцева. 2009.
3. Дегтярев О.В., Орлов В.С., Пучков Б.В. Разработка бортовых алгоритмов обнаружения и децентрализованного разрешения опасных сближений в воздухе, основанных на методе потенциальных полей // Сб. тр. междунар. симпоз. «Интеллектуальные системы» (INTELS-2010). Владимир. 2010.
4. Лушников А.С., Тарасов С.Н. Наземные радиоэлектронные средства обеспечения полётов воздушных судов: учеб. пособие – 2-е изд., испр. // Ульяновск: УВАУ ГА(И). 2012. 49 с.
5. Программное обеспечение автоматизированных систем управления воздушным движением. Часть II. Функциональное программное обеспечение. Книга 4. Модель использования воздушного пространства. Рудельсон Л.Е. Обработка плановой информации // М.: МГТУ ГА. 2004. С.96.
6. Созинов П.А. Вклад концерна ПВО «Алмаз-Антей» в процесс модернизации аэронавигационной системы России и гражданское авиастроение // специальный выпуск журнала «Экспорт вооружений», посвященный гражданской авиации. июль 2007 г.
7. Ужаков В. На сегодня и на перспективу // журнал «Транспортная стратегия - XXI век» Закрытое акционерное общество Издательский дом «Современные стратегии» // М. 2016.

УДК 629.7

Задачи оптимизации инфокоммуникационных систем

Т.С. Аббасова, кандидат технических наук, доцент,
Государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования Московской области
«Технологический университет», г. Королев, Московская область

Определены структура и состав многослойной модели когнитивной инфокоммуникационной системы; в процессе системного исследования разработанной модели уточнена цель современной интеллектуальной системы мониторинга интегрированных инфокоммуникационных систем; даны рекомендации по анализу и синтезу алгоритма мониторинга информации и технического состояния оборудования интегрированных инфокоммуникационных систем, с учетом особенностей действующих помех.

Системный анализ, когнитивная модель, интеллектуальная система мониторинга, помехоустойчивая обработка.

The tasks of optimization of infocommunication systems

T.S. Abbasova, candidate of technical Sciences, assistant professor
State Educational Institution of Higher Education
Moscow Region «University of technology», Korolev, Moscow region

The structure and composition of the multi-layer model of the cognitive infocommunication system are determined; in the process of system study of the developed model, the goal of a modern intellectual system for monitoring integrated infocommunication systems is specified; recommendations on the analysis and synthesis of the information monitoring algorithm and the technical state of the equipment of integrated infocommunication systems are given, taking into account the peculiarities of the operating interference.

System analysis, cognitive model, intelligent monitoring system, noise-proof processing.

Введение

На современном этапе развития и интеграции инфокоммуникационных технологий, прогрессивного роста потребностей общества в мультисервисных услугах, предоставляемых инфокоммуникационными системами, необходимо обеспечить электромагнитную совместимость интегрированного коммуникационного оборудования, контроль доступности оборудования и сетевых сервисов, загрузку компонентов коммуникационной инфраструктуры и требуемую производительность [1,2]. В качестве инструментального средства повышения эффективности интегрированных коммуникаций используется мониторинг информации, циркулирующей в коммуникациях в целом, и

мониторинг технического состояния коммуникаций.

При управлении процессами измерения параметров коммуникационного оборудования и поддержке принятия решения о его состоянии важно уменьшение количества потенциальных ошибок первого и второго рода [3]. Ошибка первого рода заключается в неправильном решении о том, что уровень ЭМП соответствует предъявляемым к нему требованиям, в то время как эти требования нарушены. Ошибка второго рода заключается в неправильном решении о том, что принято решение о недопустимом уровне ЭМП, в то время как уровень ЭМП соответствует предъявляемым к нему требованиям.

Для повышения эффективности систем мониторинга необходимо качественное и количественное расширение их функциональных возможностей до информационных управляющих систем [2] и интеграция с системами поддержки принятия решений.

Методы исследования

Исследования выполнены с использованием методов анализа и синтеза сложных технических систем, методов моделирования, методов адаптивного формирования информационных систем для анализа состояния коммуникационной инфраструктуры.

Результаты исследования

В связи с удвоением каждые 18 месяцев общемирового объема данных [4] и интеграцией информационных технологий, представленных на рисунке 1, инфокоммуникационная структура должна обеспечивать эффективную масштабируемость для управления и анализа больших объемов данных, балансировки нагрузки, гибких решений, обеспечивающих быстрое изменение требований к системам хранения, обработки и передачи различного рода данных (речь, видео, мультимедиа) [5], а также к системам поддержки принятия решений [6...8].

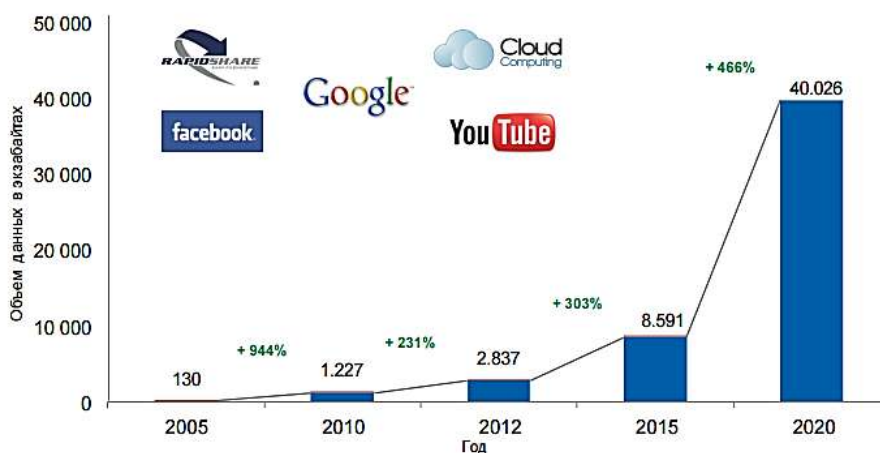


Рисунок 1 – Общемировой рост данных

Такие задачи решает интегрированная распределенная инфокоммуникационная система. Динамика развития коммуникационной инфраструктуры приведена на рисунке 2.

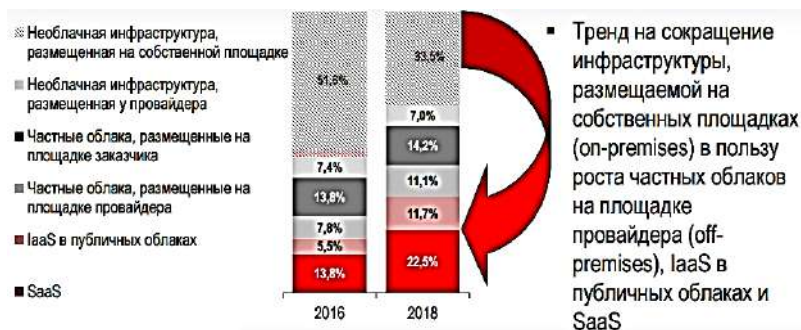


Рисунок 2 – Развитие коммуникационной инфраструктуры до 2018 года

Анализ развития коммуникационной структуры показывает, что IaaS (от англ. Infrastructure as a Service – инфраструктура как услуга) и SaaS (от англ. Software as a service – программное обеспечение как услуга) с использованием облачных технологий вытесняют традиционные технологии использования коммуникационного оборудования, размещаемого на собственных производственных площадках. Следовательно, при построении модели интегрированной распределенной инфокоммуникационной системы надо учитывать особенности облачных технологий: коммуникационное оборудование для удаленного доступа клиентов к облачным хранилищам с помощью мобильных приложений и веб-интерфейсов, облачные сервисы.

На основании анализа существующих моделей [9] построена многослойная модель когнитивной инфокоммуникационной системы, представленная на рисунке 3.



Рисунок 3 – Многослойная модель когнитивной инфокоммуникационной системы

Для анализа разработанной модели в таблице 1 описаны подсистемы и их элементы, в таблице 2 определены ключевые функции для подсистем: когнитивных прикладных процессов, поддержки когнитивных технологий,

информационной, телекоммуникационной и сенсорных датчиков, терминалов наблюдения и исполнительных устройств. Для поддержки функций когнитивного домена, кроме традиционных сетевых устройств, необходимы такие устройства как дискриминаторы (преобразователи изменения электрического сигнала в изменение полярности напряжения), измерители параметров сигнала, следящие измерители.

Цифровые процессоры, нейропроцессоры, инструменты нечеткой логики, интеллектуальные средства измерений (дискриминаторы, следящие измерители, интеллектуальные датчики и др.) реализуют прикладные процессы и услуги на уровне когнитивной подсистемы с помощью технических средств реализации – суперкомпьютеров, центров обработки данных – для обработки больших объемов информации с целью принятия решений.

В связи с высокой плотностью размещения цифрового электронного оборудования, применяемого практически на всех слоях модели когнитивной инфокоммуникационной системы, как показано на рисунке 3, уровень помеховой обстановки повышается. В наибольшей степени эта ситуация оказывает негативное влияние в системах мониторинга, телеметрического контроля и управления, имеющих в своем составе следящие измерители оценки информационных параметров сигналов, поступающих с различного оборудования в производственных цехах с исполнительными механизмами.

Таблица 1 – Элементы когнитивной инфокоммуникационной системы

Подсистемы Домены	Телекоммуникационная подсистема	Информационные ресурсы, прикладные подсистемы	Пользовательские подсистемы
Элементы системы	Электрические, оптические, беспроводные коммуникации	Средства хранения и обработки информации, прикладных процессов	Источники и потребители информации (клиенты)
Физический домен	Ресурсы сетевых систем, транспортная подсистема, подсистема коммутации	Серверы, накопители данных, носители информации	Технические средства прикладных систем пользователей (серверы приложений, облачные хранилища, терминалы, каналы передачи данных, сенсоры, датчики, устройства сбора и обработки информации, измерительные устройства)
Информационный домен	Данные мониторинга трафика и состояния инфокоммуникационного оборудования	Базы данных, структуры данных, базы знаний, сетевые ресурсы, данные мониторинга	Информационные модели источников и потребителей, коммуникационный трафик
Когнитивный домен	Функции анализа данных, принятия решений по управлению телекоммуникационной подсистемой	Функции мониторинга, поиска и анализа принятия решений прикладных систем	Функции анализа коммуникационного трафика, функции управления коммуникационными подсистемами и устройствами сбора и обработки информации

Основной показатель качества любой системы передачи и обработки информации характеризует помехозащищенность – это отношение сигнал/шум. В процессе исследования характеристик инфокоммуникационного оборудования следует уточнить цель современной системы мониторинга: анализ помех, действующих на конкретном коммуникационном объекте, с использованием информационно-измерительных систем, и синтез алгоритмов обработки информационных параметров сигналов, с учетом особенностей современного оборудования инфокоммуникационных систем.

Для поддержки требуемого уровня электромагнитной помехозащищенности (ЭМП) необходима интеллектуальная система управления с функциями визуализации исследуемых параметров, а также с возможностью трансформации полученных данных о параметрах ЭМП и их дальнейшего анализа на основе компьютерных методов обработки информации.

Мониторинг должен проводиться с учетом характеристик всех сред передачи интегрированных коммуникаций (проводные (электрические и оптические) и беспроводные среды).

Таблица 2 – Анализ уровней когнитивной модели инфокоммуникационной системы

Номер уровня	Название уровня	Функции подсистемы
уровень I	Подсистема когнитивных прикладных процессов	Формирование сообщений, преобразование их в сигналы и передача на верхние уровни модели с целью получения информации для выполнения содержащихся в ней инструкций с использованием технического «рецептивного поля» датчиков и модели действия исполнительных устройств
уровень II	Телекоммуникационная подсистема	Обеспечение информационного обмена пользователей, взаимодействие пользователей с информационной подсистемой, обмен данными между информационной и когнитивной подсистемой, а также подсистемой сенсоров и исполнительных устройств
уровень III	Информационная подсистема	Поддержка когнитивной подсистемы с помощью серверов, вычислительных центров и баз данных
уровень VI	Когнитивная подсистема	Функции прикладного искусственного интеллекта и интеллектуального управления объектами, располагающимися на I уровне архитектуры, в реальном масштабе времени
уровень V	Когнитивные прикладные процессы	Формирование перечня когнитивных предложений и адаптация под них функций когнитивного и других уровней

Пусть инфокоммуникационная система имеет N параметров ЭМП (например, для инфокоммуникационной системы на основе электрических кабелей: межкабельные наводки, переходные наводки на ближнем и дальнем конце кабеля, целостность проводов кабеля, отсутствие замыканий между ними и правильность заделки проводов в разъемы, волновое сопротивление кабеля, утечка и другие электрические параметры кабеля). Эта система описывается переменными $\{\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_N\}$, где для всех $i = 1, N$ π_i принадлежит некоторому множеству Σ_i (носителю i -го параметра), при этом подмножество контролируемых параметров входит в множество всех параметров [10].

Оценка уровня ЭМП инфокоммуникаций включает в себя формализацию взаимосвязи значений его контролируемых параметров (диагностических признаков) с фактами возникновения низкой производительности (полного отсутствия соединения) в отдельных подсистемах и узлах:

$$P = \{\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_N\} \rightarrow W = \{w_1, w_2, \dots, w_l\}, \quad (1)$$

где π_i – i -й параметр, определяющий уровень ЭМП системы (ее элементов); W – величина, связанная с оценкой уровня производительности инфокоммуникационного оборудования; символ « \rightarrow » – способ формализации диагностической функции.

Составной параметр W согласно выражению (1) должен обеспечить оценку помехозащищенности коммуникационного оборудования в целом, а также его отдельных элементов (узлов). По этой причине параметры, входящие в P , используются для контроля различных элементов (узлов) с учетом способа их измерения. Диагностическая функция в таком случае может быть записана в формате взаимосвязи частных функций:

$$Y = f(f_1(P_1), \dots, f_i(P_i), \dots, f_m(P_m)), \quad (2)$$

где f_i – функция оценки состояния i -го элемента инфокоммуникационного оборудования на основе значений диагностических признаков P_i , входящих в состав вектора параметров P .

Формирование вектора параметров P может также проводиться по признаку принадлежности диагностического параметра к определенной группе методов измерений (методы измерений параметров электрических и оптических кабелей, методы измерений параметров беспроводных линий передачи).

Рассматриваемый в общем виде способ комплексной оценки помехозащищенности оборудования интегрированных инфокоммуникационных систем направлен на оперативное определение, устранение и предупреждение потенциальных случаев снижения производительности инфокоммуникационной системы за счет появления блокировок и импульсных помех, в том числе узкополосных помех с негауссовским характером распределения за счет устранения «узких мест», влияющих на изменение производительности сети, для каждого типа «узких мест» и для каждого вида производительности сети. В этом случае диагностическая функция (2) может быть представлена аналогичным образом, но с учетом оценки перспективной помехозащищенности W_t оборудования (его элементов) согласно прогнозным значениям диагностических признаков W_{it} , где τ – период упреждения.

В основе интеллектуальной системы мониторинга находятся база данных (БД) и база знаний (БЗ). В БД хранятся эталонные настройки данных параметров, которые могут быть с помощью вычислительных операций сравнены с текущими параметрами инфокоммуникационного оборудования.

На рисунке 4 предложен алгоритм, отражающий ключевые этапы мониторинга информации и технического состояния оборудования ИИС в результате его системного обследования.

Первым этапом формализации задачи (1) является анализ исследуемого оборудования и выбор перечня ключевых диагностических признаков P (блок 1). В результате формирования структуры параметров исследуемого объекта составляется итоговая диагностическая функция объекта (2).

На рисунке 4 приняты следующие обозначения: ИИС – интегрированная инфокоммуникационная система; Т – «да» (true); F – «нет» (false).

На начальном этапе алгоритма (блок 1) происходит формализация оборудования ИИС, определяется, к какому из перечисленных уровней (в табл. 2) оно принадлежит. В соответствии с функциями уровня происходит обработка качественной и количественной информации о параметрах элементов этого уровня, в первую очередь, о параметрах помехозащищенности.

На практике для решения задачи, представленной в блоке 2, как правило, необходимым является применение не классических детерминированных и стохастических подходов [11], а комбинированных методов, учитывающих как накопленные знания (информацию качественного содержания) в области эксплуатации коммуникационного оборудования, так и ретроспективные данные. Для реализации предложенного варианта решения рекомендуется использовать математический аппарат нечеткой логики с формированием баз знаний и адаптивных алгоритмов нечеткого вывода [12]. При этом для построения диагностических функций применяется не только статистическая (блок 2), но и экспертная информация о работе оборудования как элемент аккумулированного опыта специалистов в исследуемой предметной области (блок 3).



Рисунок 4 – Алгоритм мониторинга информации и технического состояния оборудования интегрированных инфокоммуникационных систем

Для измерения диагностических параметров (блок 5) синтезируется нечеткая диагностическая модель (блок 4), в соответствии с которой измеряются диагностические параметры. Структурно-параметрический синтез нечетких диагностических моделей предполагает формирование интегрированной базы знаний (БЗ), которая обеспечивает взаимосвязь ключевых значений параметров коммуникационного оборудования в виде лингвистических переменных с соответствующими им терминами («низкая производительность», «средняя производительность», «высокая производительность», «нестабильность связи» и др.) для построения функций принадлежности, а также со значениями интегральной функции состояния W .

В блоке 6 осуществляется предварительная обработка исходных данных, которая частично реализуется в блоке 3, и инициализации модели прогнозирования, выбора наилучшей модели и адаптивной модели. Наилучшая модель отражает формирование начальных условий. Адаптивная модель отражает краткосрочное прогнозирование на основе ряда критериев прогнозирования и оценки адекватности результатов.

Согласно описанным этапам для формирования множества моделей начальных условий (НУ) могут быть использованы совершенно различные зависимости [11] исходя из специфики исследуемых информационных процессов и сред передачи. С учетом адаптивного прогнозирования изменения диагностических параметров происходит комплексная оценка помехозащищенности ИИС. При удовлетворительном состоянии ИИС принимается решение о том, что уровень ЭМП соответствует предъявляемым к нему требованиям. При неудовлетворительном состоянии ИИС генерируются предложения по организационно-техническим мероприятиям для улучшения уровня ЭМП.

Математическая постановка научной задачи исследования: обеспечить минимальную ошибку при поддержке принятия решений об определении уровня ЭМП путём разработки моделей, алгоритмов; методики выбора параметров интегрированных инфокоммуникаций; методики детализированного планирования работ по обеспечению помехоустойчивости инфокоммуникаций с применением N -мерных моделей для визуализации, трансформации и последующего анализа диагностических параметров; разработки правил в экспертных системах для анализа и оценки состояния оборудования интегрированных инфокоммуникационных систем.

$$V_{opt}: L_{err}(V_{opt}) = \min_V L_{err}(V), \quad (3)$$

где L_{err} – количество ошибок, V – некоторое заранее заданное значение ущерба от отклонения контролируемых параметров.

$$L_{err}(V) = f(E_V, P_V, C_i), \quad (4)$$

где E_V и P_V – оценочные критерии, C – факторы (параметры) ограничения.

Опыт эксплуатации интеллектуальных систем мониторинга показывает, что из множества параметров выбирается подмножество наиболее важных параметров для контроля $\Pi \subset \{1, \dots, N\}$, которое является подмножеством всех параметров инфокоммуникационной системы

В зависимости от количества контролируемых параметров Π_i временные

затраты T на мониторинг будут разными. Временные затраты можно выразить в условных единицах, причем каждый контролируемый параметр в мультизадачном режиме вносит затраты τ (в условных единицах) по отдельности:

$$T_i(Y) = \sum_{i \in Y} \tau_i t_i. \quad (5)$$

Также в условных единицах можно оценивать и все остальные величины, входящие в выражение (4).

Для анализа величины отклонения i -го параметра, характеризующего помехозащищенность инфокоммуникационной системы, используем семейство случайных величин $\{X_i / i = 1, N\}$, при этом X_i в совокупности независимы. Если какая-либо взаимосвязь между случайными величинами X_i имеется, она будет определяться отдельными слагаемыми. Стоимости отклонений для каждого из параметров также будут учитываться для определения этой взаимосвязи. Далее определим функцию для расчета вещественной неотрицательной величины $S_i(x)$, которая является монотонно неубывающей и борелевской, отображающей одно топологическое пространство в другое для каждого $i = 1, N$. Эта функция характеризует стоимость отклонения i -го параметра от эталонного значения, зафиксированного в специализированной БЗ. Также введем функцию для определения величины потерь пропускной способности вследствие ухудшения помехоустойчивости $xS_i(x)$.

Для определения величины потерь, связанных с принятием решения о достаточном уровне помехозащищенности инфокоммуникационных систем, необходимо учитывать все отклонения не только контролируемых параметров инфокоммуникационной системы от эталонных значений, но и отклонения неконтролируемых параметров инфокоммуникационной системы от эталонных значений. Для этого введём следующие случайные величины

$$\xi(Y) = \sum_{i \in Y} X_i S_i(X_i), \quad (2)$$

$$\eta(Y) = \sum_{i \in \{1, \dots, N\} \setminus Y} X_i S_i(X_i), \quad (3)$$

также выраженные в условных единицах.

В качестве ограничений C_i учитываются пороговые значения ЭМП, показатели стоимости потери времени на анализ и оценку отклонения контролируемого параметра от требуемого значения.

Приведем примеры пороговых значений помехозащищенности: межкабельное переходное затухание на ближнем конце кабеля A_N (N от англ. Near – ближний) и значения погонного затухания тракта передачи длиной L A_L , задаваемые международными стандартами ISO/IEC FDIS 11801-1 [13], ISO/IEC FDIS 11801-5 IS 15018 [14], IS 15018. Стандарт IS 11801 устанавливает требования к проводке для коммерческих зданий (кабельные системы класса F (категории 7)).

Согласно анализу методов и способов обеспечения ЭМС интегрированных инфокоммуникационных систем, представленному в [2], а также сформулированному критерию оптимизации, современные интегрированные телекоммуникационные системы должны проектироваться с

применением методов и способов, представленных на рисунке 5.

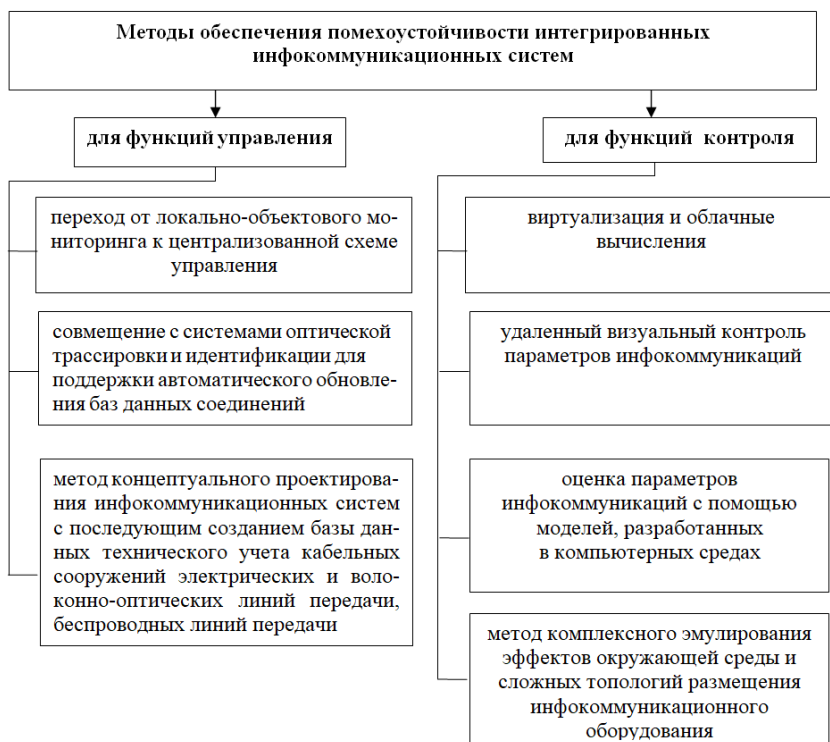


Рисунок 5 – Классификация методов и способов обеспечения помехоустойчивости инфокоммуникационных систем

С помощью процесса конвертирования в расчетные программные среды можно уменьшить затраты на проектирование инфокоммуникационных систем и обеспечение их помехоустойчивости, а также уменьшить ошибки первого и второго рода, в соответствии с критерием оптимизации.

Заключение

Разработан алгоритм мониторинга информации и технического состояния оборудования интегрированных инфокоммуникационных систем. Полученные аналитические зависимости для минимизации ошибки при принятии решения об уровне помехозащищенности современного инфокоммуникационного оборудования послужит в дальнейшем основой для анализа существующих и синтеза новых систем мониторинга распределенных интегрированных инфокоммуникационных систем.

Литература

1. Кузовкова Т.А., Тимошенко Л.С. Анализ и прогнозирование развития инфокоммуникаций (2-е издание, переработанное и дополненное) // М.: Горячая линия-Телеком. 2016. 174 с.
2. Аббасова Т.С. Совмещение управляющих и измерительных функций при интерактивном управлении телекоммуникационными системами //

- Информационно-технологический Вестник. 2015. № 2(04). С. 14-38.
3. Аббасова Т.С., Зиновьев В.Н., Стреналюк Ю.В., Самаров К.Л. Политика контроля электромагнитной совместимости телекоммуникаций в контексте системного анализа // Двойные технологии. 2016. № 2 (75). С. 46-48.
 4. Загайнова Л.А., Кузовкова Т.А. Оценка динамики развития сектора инфокоммуникационных технологий в России, США и Германии // Телекоммуникации и информационные технологии. 2016. № 2. Т. 3. С. 69-72.
 5. Аббасова Т.С. Анализ самоподобия мультимедийного трафика и его влияния на электромагнитную совместимость оборудования телекоммуникационных систем // Двойные технологии. 2015. № 1. С. 21-24.
 6. Комашинский В., Мардер Н., Парамонов А. От телекоммуникационной к когнитивной инфокоммуникационной системе // Технологии и средства связи. 2011. № 4. С. 52-54.
 7. Акимкина Э.Э. Развитие и адаптация имитационного и компьютерного моделирования в системах поддержки принятия решений // Современные информационные технологии / сборник трудов по материалам II-ой межвузовской научно-технической конференции 14 сентября 2016 года, г. Королев, «МГОТУ» / Под общей науч. ред. док. техн. наук, проф. В.М. Артюшенко // М.: Издательство «Научный консультант». 2016. С. 112-121 (182 с.).
 8. Акимина Э.Э. Оптимизация обработки данных в системах поддержки принятия решений с элементами обслуживания // Вестник ВГУ. Серия: Системный анализ и информационные технологии. 2017. № 2. С. 90-97.
 9. Зудилова Т.В. Методы моделирования и оптимизации в инфокоммуникационных системах и сетях // Учебное пособие. Санкт-петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики 2013. 131 с.
 10. Аббасова Т.С., Самаров К.Л. Системный анализ параметров эффективности телекоммуникационного оборудования // Информационно-технологический Вестник. № 2(08). 2016. С. 49-60.
 11. Барзилович Е.Ю. Модели технического обслуживания сложных технических систем // М.: Высш. Школа. 1982. 231 с.
 12. Khoroshev N.I., Kazantsev V.P. Management support of electroengineering equipment servicing based on the actual technical condition // Automation and Remote Control. 2015. Vol. 76. iss. 6. P. 1058-1069.
 13. ISO/IEC FDIS 11801-1:2017. Информационные технологии. Структурированная кабельная система для помещений заказчиков. – Часть 1. – Общие требования.
 14. ISO/IEC FDIS 11801-5:2017. «Информационные технологии. Структурированная кабельная система для помещений заказчиков. – Часть 5. – Центры обработки данных».

УДК 621.391.01

Математическое моделирование преобразования негауссовских случайных процессов, сигналов и помех в линейных и нелинейных системах

В.М. Артюшенко, доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Информационные технологии
и управляющие системы»,

Государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования Московской области

«Технологический университет», г. Королев, Московская область,

В.И. Воловач, доктор технических наук, доцент,

заведующий кафедрой «Информационный и электронный сервис»,

Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
Поволжский государственный университет сервиса, г. Тольятти

Рассмотрены и проанализированы вопросы, связанные с математическим моделированием преобразования негауссовских случайных процессов, сигналов и помех, в линейных и нелинейных системах. Проанализировано математическое преобразование случайных процессов в линейных инерционных системах, состоящих как из последовательно, так и параллельно соединенных звеньев, а также с положительной и отрицательной обратной связью. Рассмотрено математическое преобразование случайных процессов с полигауссовской плотностью распределения вероятностей при их прохождении через такие системы. Проанализированы нелинейные безинерционные и инерционные системы.

Математическое моделирование, плотность распределения вероятностей, негауссовские случайные процессы, линейные инерционные системы, нелинейные безинерционные системы, полигауссовские плотности распределения вероятностей.

Mathematical modeling of conversion of non-Gaussian random processes, signals and noise in linear and nonlinear systems

V.M. Artyushenko, doctor of Technical Sciences, Professor,
State Educational Institution of Higher Education

Moscow Region «University of technology», Korolev, Moscow region,

V.I. Volovach, doctor of technical Sciences, associate Professor,

head of the Department «Information and electronic service»,

State budgetary educational institution of higher education Volga region state
University of service, Tolyatti

The questions connected with mathematical modeling of transformation of non-Gaussian random processes, signals and noise in linear and nonlinear systems are considered and analyzed. The mathematical transformation of random processes in

linear inertial systems consisting of both series and parallel connected links, as well as positive and negative feedback is analyzed. The mathematical transformation of random processes with polygamous density of probability distribution during their passage through such systems is considered. Nonlinear inertial and non-linear systems are analyzed.

Mathematical modeling, probability density distribution, non-Gaussian random processes, linear inertial systems, nonlinear non-inertial systems, poly-Gaussian probability density distribution.

Введение. Большое значение в статистической радиотехнике играет математическое моделирование случайных процессов, сигналов и помех, при их прохождении через линейные и нелинейные системы, подразделяющиеся на инерционные и безынерционные системы.

Задача математического анализа преобразования случайных процессов ставится следующим образом. Считая параметры систем и статистические характеристики входного процесса $\xi(t)$ известными, требуется определить статистические характеристики выходного процесса $\eta(t)$ [2, 6].

Преобразование случайных процессов в линейных инерционных системах (ЛИС). Линейная система с импульсной переходной функцией (ИПФ) $h(t, \tau)$ для физически реализуемых систем, (см. рисунок 1), преобразует случайный процесс $\xi(t)$, в соответствии с выражением:

$$\eta(t) = \int_0^t h(t, \tau) \xi(\tau) d\tau.$$

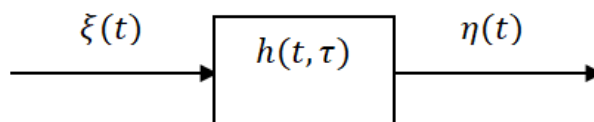


Рисунок 1 – Преобразование случайных процессов в ЛИС

Применяя простейшие операции, можно получить соотношения для математического ожидания процесса на выходе

$$m_\eta(t) = \int_0^t h(t, \tau) m_\xi(\tau) d\tau,$$

корреляционной функции

$$B_{\eta\eta}(t_1, t_2) = \int_0^{t_1} \int_0^{t_2} h(t_1, \tau_1) h(t_2, \tau_2) B_{\text{вх}}(t_1, t_2) d\tau_1 d\tau_2 \quad (1)$$

и взаимокорреляционной функции

$$B_{\xi\eta}(t_1, t_2) = \int_0^{t_2} h(t_2, \tau) B_{\text{вх}}(t_1, t_2) d\tau_1 d\tau_2.$$

Аналогично можно найти соотношения, связанные с моментами процесса на выходе линейной системы с постоянными параметрами с моментами функции входного стационарного случайного процесса и импульсной характеристикой системы.

Так, в дискретном времени

$$m_{k\eta} = m_1\{\eta^k(n)\} = m_1\{\sum_{r_1=-\infty}^{\infty} \dots, \sum_{r_k=-\infty}^{\infty} h(r_1), \dots, h(r_k) \times \\ \times \xi(n - r_1), \dots, \xi(n - r_k)\} = \{\sum_{r_1=-\infty}^{\infty} \dots, \sum_{r_k=-\infty}^{\infty} h(r_1), \dots, h(r_k) \times$$

$$\times m_{k\xi}(r_1, \dots, r_k), k = 1, 2, 3, \dots,$$

где $m_{k\xi}(r_1, \dots, r_k) = m_1\{\xi(n - r_1), \dots, \xi(n - r_k)\}$ – моментная функция входной последовательности.

Соответственно, для линейной системы в непрерывном времени

$$m_{k\eta} = m_1\{\eta^k(n)\} = m_1\left\{\int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} h(u_1), \dots, h(u_k) \times \right.$$

$$\left. \times \xi(t - u_1), \dots, \xi(t - u_k)\right\} du_1 \dots du_k =$$

$$= \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} h(u_1), \dots, h(u_k) m_{k\xi}(u_1 \dots u_k), \dots, k = 1, 2, 3, \dots,$$

где $m_{k\xi}(u_1 \dots u_k) = m_1\{\xi(t - u_1), \dots, \xi(t - u_k)\}$ – моментная функция входного процесса.

Как видно из приведенных соотношений, для определения k -мерной моментной функции необходимо знать k -мерную плотность распределения вероятностей (ПРВ) входного процесса.

Из выражения (1), в частности, видно, что процесс на выходе линейной системы с переменными параметрами нестационарен в том случае, когда на ее входе действует стационарный случайный процесс. Когда ПРВ $W_\eta(\eta)$ процесса $\xi(t)$ отличается от гауссовской, определение ПРВ $W_\eta(\eta)$ выходного процесса наталкивается на ряд трудностей.

Существуют отдельные приближенные методы решения, базирующиеся на оптимальных предложениях относительно вероятностных характеристик входного случайного процесса $\xi(t)$ и свойств линейной системы.

Преобразование случайных процессов с полигауссовской ПРВ в ЛИС. В [7], было показано, что полигауссовские случайные процессы, как и гауссовские, инвариантны относительно линейных инерционных преобразований.

Реакция линейной системы на полигауссовское воздействие также является полигауссовской при том же числе компонентов N и тех же коэффициентах взвешивания, то есть

$$W_\eta(\eta) = \sum_{n=1}^N q_n W_n[\eta, m_{n.вых}, B_{n.вых}], \sum_n q_n = 1,$$

где

$$W_n[\eta, m_{n.вых}, B_{n.вых}] = \left[(2\pi)^{0,5r} B_{n.вых}^{0,5} \right]^{-1} \times$$

$$\times \exp\{-0,5(\eta - m_{n.вых})^T B_{n.вых}^{-1} (\eta - m_{n.вых})\}.$$

Векторы математического ожидания $m_{n.вых}$ коррелированные матрицы $B_{n.вых}$ гауссовских компонент выходного процесса и характеристики $h(t, \tau)$ линейной системы связаны соотношениями

$$m_{n.вых}(t) = \int_0^t h(t, \tau) m_{n.вх}(\tau) d\tau; \tag{2}$$

$$B_{n.вых}(t_1, t_2) = \int_0^t \int_0^t h(t_1, \tau_1) h(t_2, \tau_2) B_{n.вх}(\tau_1, \tau_2) d\tau_1 d\tau_2. \tag{3}$$

Этими же соотношениями можно пользоваться и в том случае, когда линейная система представляет собой, последовательно соединены линейные звенья (рисунок 2).

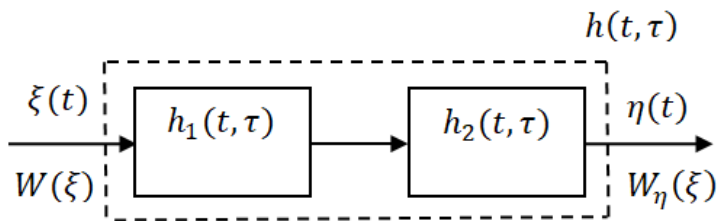


Рисунок 2 – Преобразование случайных процессов в ЛИС, состоящей из последовательно соединенных звеньев

В этом случае при расчете характеристик выходного процесса $\eta(t)$ надо пользоваться результирующей ИПФ

$$h(t, \tau) = \int_0^t h_2(t, \tau_1) h_1(\tau_1, \tau) d\tau_1. \quad (4)$$

Если линейные звенья соединены параллельно (рисунок 3), их результирующая ИПФ будет:

$$h(t, \tau) = \sum_{k=1}^K h_k(t, \tau).$$

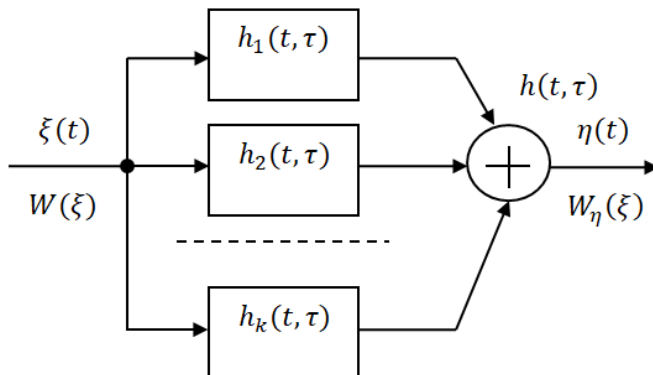
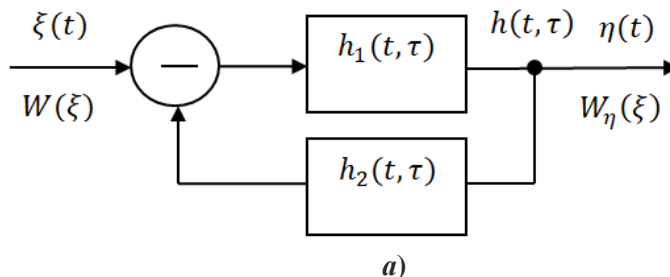
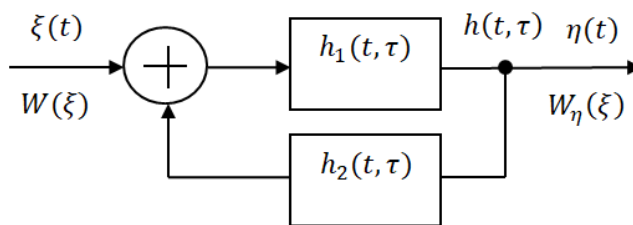


Рисунок 3 – Преобразование случайных процессов в ЛИС, при параллельно соединенных звеньях

Довольно часто в радиотехнических системах и устройствах встречаются структуры с обратными связями, как отрицательной (рисунок 4а), так и положительной (рисунок 4б).





б)

Рисунок 4 – Преобразование случайных процессов в ЛИС с обратной связью; а – отрицательной; б - положительной

Определим ИПФ замкнутых систем, представленных на рисунке 4.

Как известно [5], если на вход системы поступает единичный импульс $\delta(t - \tau)$, то на выходе формируется процесс $h(t, \tau)$.

В этом случае, с учетом (4), на выходе систем формируется сигнал:

$$\delta(t - \tau) \mp \int_0^t h_2(t, \tau_1) h_1(\tau_1, \tau) d\tau_1.$$

В свою очередь, эта разность (сума) будет соответствовать процессу на выходе

$$h(t, \tau) = \int_0^{\tau_2} h_1(t, \tau_2) \{ \delta(\tau_2 - \tau) \mp \int_0^{\tau_2} h_2(\tau_2, \tau_1) h(\tau_1, \tau) d\tau_1 \},$$

или после преобразований,

$$h(t, \tau) = h_1(t, \tau) \mp \int_0^{\tau} h(t, \tau_2) \int_0^{\tau_2} h_2(\tau_2, \tau_1) h(\tau_1, \tau) d\tau_1 d\tau_2. \quad (5)$$

То есть, в случае линейных замкнутых систем импульсную характеристику находят, решая интегральное уравнение.

Таким образом, при данном подходе, последовательность анализа прохождения случайного процесса $\xi(t)$ с негауссовской ПРВ в общем случае следующая:

- представляют (аппроксимируют) ПРВ $W_\xi(\xi)$ смесью гауссовских ПРВ;
- определяют импульсную характеристику линейной системы одним из рассмотренных способов;
- анализируют каждую гауссовскую компоненту в отдельности в соответствии с выражениями (2) и (3).

В результате ПРВ исходного процесса $W_\eta(\eta)$ также является полигауссовской. Общее число гауссовских компонент N и коэффициенты взвешивания остаются неизменными.

Преобразование характеристик линейных сигналов в линейных системах. В [3] был предложен метод приближенного анализа ПРВ случайного процесса на выходе линейной системы с использованием модели так называемых линейных случайных процессов.

Стохастический сигнал $\xi(t)$ принято называть линейным, если в дискретном времени

$$\xi_h = \sum_{i=-\infty}^{\infty} g(h - i) v_i = \sum_{i=0}^{\infty} g(i) v_{h-i}, \quad i = 0, 1, 2, \quad (6)$$

где $\{v_i\}$ – случайная последовательность с независимыми значениями.

В непрерывном времени

$$\xi_t = \int_{-\infty}^{\infty} g(t - u) d\chi(u) = \int_{-\infty}^t g(t - u) v(u) du, \quad (7)$$

где $\chi(t)$ – случайный процесс с независимыми приращениями; $v(t)$ – обобщенный случайный процесс с независимыми приращениями.

В моделях сигналов с дискретным временем линейные стохастические сигналы характеризуются весовой последовательностью $\{g_h, h = 0, 1, 2\}$ и ПРВ величин $\{v_h, h = 0, 1, 2\}$. При непрерывном времени они характеризуются весовой функцией $g(t), t \geq 0$ и функцией распределения процесса $\chi(t)$.

Случайный процесс $\chi(t)$ в моделях с непрерывным временем может быть либо гауссовским случайным процессом, либо, согласно теории Леви, суммой этих процессов. Следовательно, процесс $v(t)$ может быть гауссовским, пуассоновским либо смешанным случайным процессом.

Таким образом, представление линейного сигнала в виде (6) и (7) можно трактовать как реакцию линейной системы на воздействие белого шума.

Например, если входной сигнал – пуассоновский белый шум

$$v(t) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} \alpha_i \delta(t - t_i),$$

где $\alpha_i; i = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ – независимые случайные величины и $t_i, i = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ – случайные моменты времени, имеющие распределение Пуассона, то прямое представление сигнала на выходе линейной системы имеет вид

$$\xi(t) = \sum \alpha_i \delta(t - t_i), t \in (0, t).$$

Для определения ПРВ линейного сигнала рекомендуется применять ее аппроксимацию с помощью кумулянтов [4].

Связь между кумулянтами порождающего и линейного сигналов для дискретного времени имеет вид:

$$\kappa_{\xi k} = \kappa_{vk} \sum_{h=0}^{\infty} g_h^k,$$

а непрерывного –

$$\kappa_{\xi k} = \kappa_k \int_0^{\infty} g^k(t) dt. \quad (8)$$

Рассмотрим преобразование характеристик линейных сигналов в линейных системах. Структура эквивалентной системы представлена на рисунке 5.

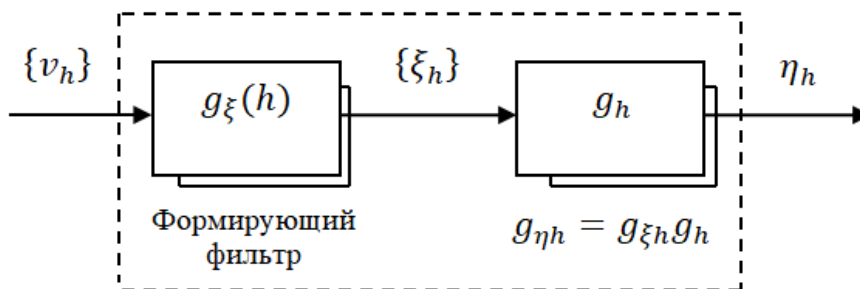


Рисунок 5 – Структурная схема эквивалентной системы

Выходной сигнал линейной системы, на вход которой действует линейный сигнал, также является линейным [3]. На основании этого предположения можно найти выражения для кумулянтов выходного сигнала:

$$\kappa_{\eta k} = \kappa_{vk} \sum_{h=0}^{\infty} [g_{\eta}(h)]^k = \kappa_{vk} \sum_{h=0}^{\infty} [\sum_i g_{\xi}(h - i)g(i)]^k. \quad (9)$$

Соответствующее выражение для непрерывного времени имеет вид

$$\kappa_{\eta k} = \kappa_k \int_0^\infty \left[\int_0^\infty g_\xi(t-u)g(u) \right]^k dt, k = 1, 2.$$

Подставляя (8) в (9), найдем

$$\kappa_{\eta k} = \kappa_{\xi k} \frac{\sum_{h=0}^\infty \left[\sum_{i=0}^\infty g_\xi(h-i)g(i) \right]^k}{\sum_{h=0}^\infty [g_\xi(h)]^k}.$$

В случае непрерывного времени

$$\frac{\kappa_{\eta k}}{\kappa_{\xi k}} = \frac{\int_0^\infty \left[\int_0^\infty g_\xi(t-u)g(u) \right]^k dt}{\int_0^\infty [g_\xi(h)]^k dt}.$$

Из изложенного видно, что отношение кумулянтов выходного и входного сигналов не зависит от кумулянтов $\kappa_{\nu k}$ порождающего линейный сигнал белого шума.

Таким образом, последовательность определения статистических характеристик случайных сигналов на выходе линейной инерционной системы, в предположении, что входной сигнал линеен, следующая:

- вычисляют кумулянты $\kappa_{\xi k}$ входного сигнала $\{\xi_h\}$ по его известной ПРВ;
- вычисляют кумулянты выходного сигнала $\{\eta_h\}$ по выражению (9);
- по найденным кумулянтам одним из изложенных выше способов аппроксимируют ПРВ выходного сигнала $W_\eta(\eta)$.

Заметим, что только предположив линейность входного сигнала, можно получить однозначное соответствие одномерных ПРВ входного $\xi(t)$ и выходного $\eta(t)$, при известной весовой функции $g_\xi(t)$ формирующего фильтра. В противном случае для решения поставленной задачи требуется полное вероятностное описание входного сигнала с помощью неограниченной последовательности конечномерных распределений.

Нелинейные безинерционные системы. Пусть на вход блока нелинейного преобразования (БНП) с характеристикой $f(x)$ поступает случайный процесс $\xi(t)$ с известной ПРВ $W_\xi(\xi)$. Требуется определить ПРВ $W_\eta(\eta)$ случайного процесса на выходе БНП (см. рисунок 6)

$$\eta(t) = f[\xi(t)].$$

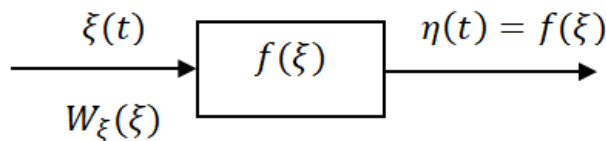


Рисунок 6 – Структурная схема нелинейной безынерционной системы

Если существует однозначная обратная функция $x = \varphi(y)$, то для ПРВ на выходе БНП справедливо выражение

$$W_\eta(\eta) = W_\xi(\xi) \frac{d\xi}{d\eta} = W[\varphi(\eta)] \left| \frac{d\varphi(\eta)}{d\eta} \right|.$$

Если функция $\eta = f(\xi)$ такова, что обратная ей функция $\xi = \varphi(\eta)$ неоднозначно, то одному значению η соответствует L ветвей $\varphi_l(\eta)$, $l = \overline{1, L}$, функции $\varphi(\eta)$. В этом случае ПРВ процесса на выходе

$$W_\eta(\eta) = \sum_{l=1}^L W[\varphi_l(\eta)] \left| \frac{d\varphi_l(\eta)}{d\eta} \right|.$$

В общем случае, если на входе задана многомерная ПРВ $W_\xi(\xi_1, \dots, \xi_n, t_1, \dots, t_n)$, то ПРВ преобразованного процесса

$$W_\eta(\eta_1, \dots, \eta_n) = \sum_{l=1}^L W[\varphi_l(\eta_1, \dots, \eta_n)] \left| \frac{d[\varphi_l(\eta_1, \dots, \eta_n)]}{d(\eta_1, \dots, \eta_n)} \right|,$$

где

$$\left| \frac{d(\chi_1, \dots, \chi_n)}{d(y_1, \dots, y_n)} \right| = \begin{vmatrix} \frac{d\chi_1}{dy_1} & \dots & \frac{d\chi_1}{dy_n} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{d\chi_n}{dy_1} & \dots & \frac{d\chi_n}{dy_n} \end{vmatrix}$$

- якобиан преобразования; $\eta_i = \eta(t_i)$; $\varphi_l(\eta_1, \dots, \eta_n)$; $l = \overline{1, L}$ - l -я ветка обратного преобразования.

Последовательное соединение линейного инерционного и нелинейного безынерционного звеньев. Возможны два способа включения линейного и нелинейного звеньев (рисунок 7).

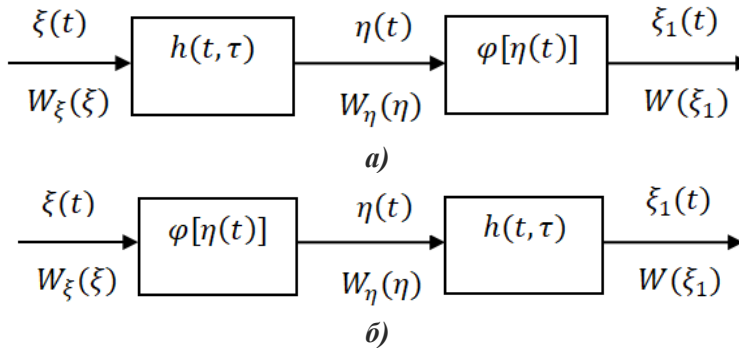


Рисунок 7 – Структурная схема последовательного соединения звеньев: а – линейного инерционного и нелинейного безынерционного; б – нелинейного безынерционного и линейного инерционного

При первом (рисунок 6а) на выходе включено линейное инерционное звено с характеристикой $h(t, \tau)$, за которым следует БНП с характеристикой $\varphi[\eta(t)]$.

При втором способе (рисунок 6б) порядок следования линейного инерционного и нелинейного безынерционного звеньев меняется.

Полигауссовское приближение. Пусть, как и прежде, ЛИС имеет импульсную характеристику $h(t, \tau)$, а амплитудная характеристика БНП $\xi = f(\eta)$. Принимая во внимание, что входной процесс $\xi(t)$ описывается полигауссовской ПРВ с известными $N, g_n, m_{n.вх}, B_{n.вх}, n = \overline{1, N}$, многомерную ПРВ $W_\xi(\xi)$; $\xi = \xi(t_1), \dots, \xi(t_1)$ можно записать в виде

$$W_\xi(\xi) = \sum_{n=1}^N g_n (2\pi)^{-r/2} \left| B_n^{(\xi)} \right|^{-0,5} \sum_{k=1}^K J_{kn} \times \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[\eta_k(\xi) - m_n^{(\eta)} \right]^T (B_n^{(\eta)})^{-1} \left[\eta(\xi) - m_n^{(\eta)} \right] \right\}.$$

где $\eta_k(\xi)$ - k -я ветвь обратной функции $\eta(\xi)$; J_{kn} - якобиан преобразования k -й ветви от η к ξ .

При последовательном включении (см. рисунок 6б), используя подход

описанный в нелинейных безынерционных системах, можно найти ПРВ $W_\eta(\eta)$ случайного процесса $\eta(t)$ на выходе БНП с характеристикой $\varphi[\xi(t)]$. Затем, используя полигауссовскую аппроксимацию для ПРВ $W_\eta(\eta)$ на выходе линейного инерционногвозвена вновь найдем полигауссовскую ПРВ, у которой среднее значение и элементы корреляционной матрицы рассчитываются из соотношений (1).

Нелинейные инерционные системы. Предположим, что стационарный случайный процесс $\eta(t)$ на выходе системы можно записать в виде нелинейного функционала:

$$\eta(t) = F[\xi(t)].$$

Любую функциональную стационарную систему без обратной связи, образованную соединением инерционных линейных и нелинейных систем, можно описать рядом Вольтерра [1]:

$$\begin{aligned} \eta(t) = & H_0 + \int_0^\infty H_1(\tau)\xi(t-\tau)dt + \\ & + \iint_0^\infty H_2(\tau_1, \tau_2)\xi(t-\tau_1)\xi(t-\tau_2)d\tau_1d\tau_2 + \dots + \\ & + \iint_0^\infty \dots \int_0^\infty H_n(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n)\xi(t-\tau_1)\xi(t-\tau_2), \dots, \times \\ & \times \xi(t-\tau_n)d\tau_1d\tau_2, \dots, d\tau_n. \end{aligned}$$

Функции $\int_0^\infty H_n(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n)$ носят название ядер Вольтерра, n -й член ряда называется оператором Вольтерра n -го порядка.

Перый член H_0 постоянная составляющая. Второй член – линейный функционал – соответствует линейному преобразованию, то есть пропусканию $\xi(t)$ через линейную цепь с импульсной переходной характеристикой $H_1(\tau)$. Остальные члены описывают нелинейное в общем случае инерционное преобразование.

Рассмотрим функциональные полиномы с конечным числом членов:

$$\eta(t) = H_0 + \sum_{v=1}^p \int_{-\infty}^\infty \dots \int_{-\infty}^\infty H_v(t, \tau_1, \tau_2, \dots, \tau_v) \prod_{i=1}^v \xi(\tau_i) d\tau_i, \quad (10)$$

где $\tau^v = \tau_1, \tau_2, \dots, \tau_v$.

Если $H_j = 0, \forall j > 1$, то получаем линейную систему. В противном случае добавление членов $j > 1$ означает введение нелинейности.

Предположим, что ядра v -го порядка строятся в виде линейных комбинаций из импульсных характеристик $h_k(t, \tau_1, \tau_2, \dots, \tau_v)$ соответствующей степени:

$$H_v(t, \tau^v) = \sum_{k=1}^{K_v} \Gamma_k^{(v)} h_k(t, \tau^v), \quad v = 1, 2.$$

В свою очередь, импульсная характеристика $h_k(t, \tau^v)$ комбинируется из произведений и степеней импульсных характеристик линейных систем:

$$h_k(t, \tau^v) = h_{k,1}(t, \tau_1)h_{k,2}(t, \tau_2), \dots, h_{k,v}(t, \tau_v),$$

где $k = \overline{1, K_v}$ – номер перестановки индексов k_1, k_2, \dots, k_v ; v – означает степень нелинейности, порядок импульсной характеристики; K – число представляемых импульсных характеристик $h_{k,1}, \dots, h_{k,v}$ фильтров.

С учетом сказанного функциональный ряд Вольтерра преобразуется к виду [1]:

$$\begin{aligned} \eta(t) = & H_0 + \sum_{v=1}^p \sum_{k=1}^{K_v} \Gamma_k^{(v)} \int_{-\infty}^\infty \dots \int_{-\infty}^\infty h_k(t, \tau^v) \prod_{i=1}^v \xi(\tau_i) d\tau_i = \\ = & H_0 + \sum_{v=1}^p \sum_{k=1}^{K_v} \Gamma_k^{(v)} \int_{-\infty}^\infty h_{k,1}(t, \tau_1) \xi(\tau_1) d\tau_1 \dots \end{aligned}$$

$$\dots \int_{-\infty}^{\infty} h_{k,v}(t, \tau_v) \xi(v) d\tau_v. \quad (11)$$

Структурная схема нелинейной инерционной системы общего вида, содержащая линейную инерционную и нелинейную неинерционную части, соответствующая выражению (11), представлена на рисунке 8.

Здесь K – число фильтров, p – порядок:

1. При $K = 0, v = 0$ система превращается в линейный безынерционный усилитель с коэффициентом передачи H_0 .

2. При $k = 1, p = 1$ система превращается в линейную инерционную систему с одним входом и одним выходом.

3. При $k = \overline{1, K}, v = 1$ нелинейная инерционная система преобразуется в параллельное соединение линейных инерционных фильтров.

4. При $k = 1, v = \overline{1, p}$ система преобразуется в последовательно соединенные линейную инерционную систему и нелинейный неинерционный элемент, описываемый полиномом p -й степени.

При преобразовании ПРВ $W_{\xi}(\xi)$ инерционными системами пользуются аппаратом дифференциальных уравнений, передаточными функциями и импульсными характеристиками.

Наряду с записью функциональных полиномов во временной области возможно их представление и в частотной области, которое получается подстановкой в (10) интеграла Фурье – Стильтьеса.

В этом случае вместо ядер Вольтерра используют их многомерные преобразования Фурье:

$$K_1(\omega) = \int_0^{\infty} H_1(\tau) \exp\{-j\omega\tau\} d\tau;$$

$$K_2(\omega_1, \omega_2) = \iint_0^{\infty} H_2(\tau_1, \tau_2) \exp\{-j(\omega_1\tau_1 + \omega_2\tau_2)\} d\tau_1 d\tau_2;$$

$$\dots \dots \dots$$

$$K_N(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n) = \int_0^{\infty} \dots \int_0^{\infty} H_v(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n) \times$$

$$\exp\{-j(\omega_1\tau_1 + \omega_2\tau_2 + \dots + \omega_n\tau_n)\} d\tau_1 d\tau_2 \dots$$

Функцию $K_N(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)$ принято называть коэффициентом передачи n -го порядка.

После подстановки в (10) спектрального представления $\xi(t)$ и коэффициентов передачи получаем выражение для функционального полинома в частотной области:

$$\eta(t) = \sum_{v=1}^p \frac{1}{2^v} \int_0^{\infty} K_v(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_v \prod_l X(\omega_l, d\omega_l)) \exp\{j\omega_l t\}.$$

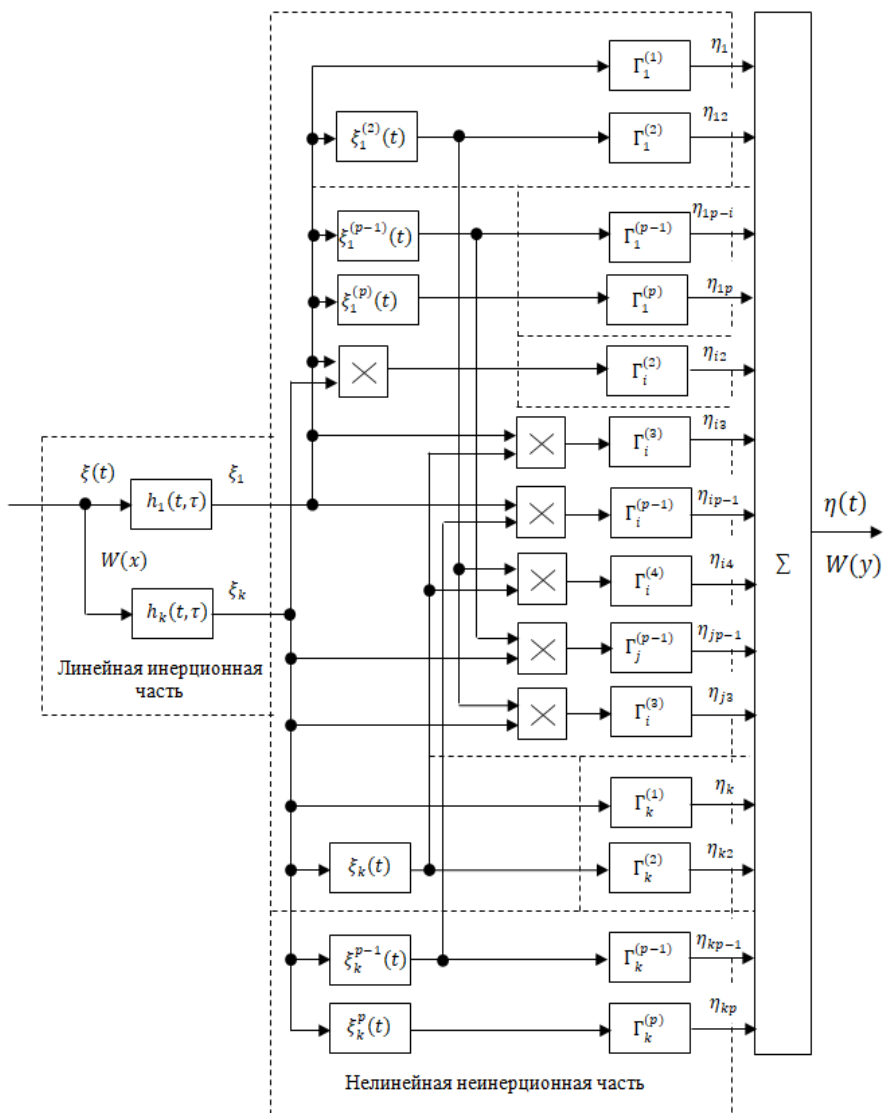


Рисунок 8 – Структурная схема нелинейной инерционной системы общего вида

Свойства коэффициентов передачи вытекают из свойств ядер Вольтерра. Заметим, что обратное преобразование Фурье для $K_n(\omega_1, \dots, \omega_n)$ имеет вид:

$$H_n(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n) = \int_0^\infty \dots \int_0^\infty K_n(\omega_1, \dots, \omega_n) \times \exp\{j(\omega_1 \tau_1 + \dots + \omega_n \tau_n)\} \frac{d\omega_1}{2\pi}, \dots, \frac{d\omega_n}{2\pi}.$$

Задача анализа преобразования негауссовского случайного процесса системой, описываемой степенным рядом Вольтерра (11), решается на основе представления заданной произвольной многомерной ПРВ входного процесса $\xi(t)$ взвешенной суммой гауссовских ПРВ той же размерности:

$$W_r(\xi) = \sum_{n=1}^N q_n W_{rn}(\xi, m_n^{(\xi)}, B_n^{(\xi)}), \quad q_n \geq 0, \quad \sum_{n=1}^N q_n = 1,$$

$$W_{rn}(\xi, m_n^{(\xi)}, B_n^{(\xi)}) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^r |B_n^{(\xi)}|}} \times$$

$$\times \exp\left\{-\frac{1}{2}(\xi - m_n^{(\xi)})^T (B_n^{(\xi)})^{-1} (\xi - m_n^{(\xi)})\right\}.$$

Найдем совместную k, r -мерную ПРВ при прохождении процессов $\xi(t)$ через линейную инерционную часть линейной системы, представляющей собой параллельное соединение K линейных инерционных фильтров.

В силу инвариантности полигауссовских моделей относительно линейных преобразований

$$W_{kr}(\xi^k) = \sum_{n=1}^N q_n W_{n.kr}(\xi^k, a_n, A_n),$$

где

$$\xi^k = (\xi_1, \dots, \xi_k); \quad \xi_k = (\xi_{k.1}, \dots, \xi_{k.r}), \quad k = \overline{1, K};$$

$a_n = (m_{n.11}, \dots, m_{n.1r}, m_{n.k1}, \dots, m_{n.kr})$ – вектор-столбец математических ожиданий; A_n – блочная матрица ковариаций случайных процессов

$$A_n = \begin{pmatrix} B_{n.11} & \dots & B_{n.1k} \\ \dots & \dots & \dots \\ B_{n.k1} & \dots & B_{n.kk} \end{pmatrix}.$$

$$\text{Здесь } B_{n.ik}(t_l, t_j) = B_{n.\eta_i \eta_j}(t_l, t_j), \quad k = \overline{1, K}; \quad l, j = \overline{1, r}.$$

Математические ожидания, корреляционные и взаимные корреляционные функции выходного сигналов фильтров соответствующих гауссовских компонент связаны со входными интегралами соотношениями

$$m_{ni}(t) = \int_0^r \Gamma_i^{(1)} h_i(t, \tau) m_n^{(\xi)}(\tau) d\tau, \quad i = \overline{1, K};$$

$$B_{n.\eta_i \eta_j}(t_1, t_2) = \int_0^r \int_0^r \Gamma_i^{(1)} \Gamma_j^{(1)} h_i(t_1, \tau_1) h_j(t_2, \tau_2) \times$$

$$\times B_n^{(\xi)}(\tau_1, \tau_2) d\tau_1 d\tau_2, \quad i = \overline{1, K};$$

$$B_{n.\eta_i \eta_k}(t_1, t_2) = \int_0^r \int_0^r \Gamma_i^{(1)} \Gamma_k^{(1)} h_i(t_1, \tau_1) h_k(t_2, \tau_2) \times$$

$$\times B_n^{(\xi)}(\tau_1, \tau_2) d\tau_1 d\tau_2, \quad i = \overline{1, K}.$$

Воспользовавшись результатами вычислений [7], опуская промежуточные выкладки, определим многомерную совместную ПРВ процессов на выходе безынерционной части системы.

Распределение выходного процесса представляет собой взвешенную сумму гауссовских ПРВ с теми же вероятностями, коэффициентами взвешивания, q_n и числом компонент N входного процесса:

$$W_{Rr}(\eta_1, \dots, \eta_k, y_{kv}, \dots, y_{kp}) = \sum_{n=1}^N q_n N(\eta_1, \dots, \eta_k, a_n, A_n) \times$$

$$\times \prod_{v=2}^p \prod_{k=1}^{K_v} \delta[\eta_{kv} - \Phi_{kv}(\eta_1, \dots, \eta_k)],$$

где $\Phi_{kv}(\cdot)$ – функция, зависящая от степеней или произведений процессов $\eta_1(t), \dots, \eta_k(t)$.

В общем случае, хотя метод гауссовских сумм и позволяет формально описать нелинейные инерционные системы общего вида, однако он довольно сложен и неконструктивен, поэтому на практике для математического моделирования он широкого применения он не нашел.

Выводы. Таким образом, рассмотрены и проанализированы вопросы, связанные с математическим моделированием преобразования негауссовских

случайных процессов, сигналов и помех, при их прохождении через линейные и нелинейные системы, имеющие как инерционный, так не инерционный характер.

Проанализированы различные структурные схемы, в том числе схема нелинейной инерционной системы общего вида. Проанализировано преобразование случайных процессов с полигауссовской плотностью распределения вероятностей.

Показано, что метод гауссовских сумм довольно сложен и неконструктивен, поэтому на практике широкого применения он не нашел, хотя он и позволяет осуществлять математическое моделирование нелинейных инерционных систем общего вида.

Литература

1. Кашкин В.Б. Функциональные полиномы в задачах статистической радиотехники // Новосибирск: Наука. 1981. 145 с.
2. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники // М.: Сов. Радио. 1974. 552 с.
3. Левин Б.Р., Шварц В. Вероятностные модели и методы в системах и управления // М.: Радио и связь. 1985. 312 с.
4. Малахов А.Н. Кумулятивный анализ случайных негауссовских процессов и их преобразований // М.: Сов. Радио. 1978. 376 с.
5. Тихонов В.И. Нелинейное преобразование случайных процессов // М.: Радио и связь. 1986. 296 с.
6. Тихонов В.И., Кульман Н.К. Нелинейная фильтрация и квазикогерентный прием сигналов // М.: Сов. радио. 1975. 704 с.
7. Чабдаров Ш.М., Сафуиулин Н.З. Феоктистов А.Ю. Основы статистической теории радиосвязи. Полигауссовские модели и методы: Учеб. пособие // Казань: КАИ. 1983. 86 с.

УДК 004.056.5

Использование программного обеспечения Kaspersky Industrial CyberSecurity для критической защиты информации промышленных предприятий

А.В. Познякевич, менеджер по развитию бизнеса,
Лаборатория Касперского, г. Москва,

Е.Н. Горбанева, методист, Центр педагогического Мастерства, г. Москва,

Н.А. Кирилина, аспирант направления подготовки «Экономическая социология и демография» НИУ ВШЭ, г. Москва

В наши дни очень остро стоит вопрос информационной защиты автоматизированных систем управления технологическими процессами в Российской Федерации. Число кибератак на промышленные системы увеличиваются с каждым годом, что критически влияет на экологическую, социальную и макроэкономическую составляющей государства.

Кибербезопасность, информационные технологии, операционные технологии, ИТ-безопасность.

Usage of the software Kaspersky Industrial CyberSecurity for critical information protection of industrial enterprises

A.V. Poznyakevich, business developer manager, Kaspersky Lab, Moscow,

E.N. Gorbaneva, the metodologist in the Center of Pedagogical Skills of Moscow,

N.A. Kirilina, graduate student specializing in «Economic sociology and demography», National Research University Higher School of Economics, Moscow

Today the question of information protection of automated process control systems in the Russian Federation is particularly acute. The number of cyber attacks to industrial systems increase every year that critically influences on ecological, social and macroeconomic component the state.

Cybersecurity, information technology, operating technology, IT-security.

Nowadays hacker attacks lead to serious problems not only for owners of computers, but also for industrial control systems, different information systems supporting city life and other critical information infrastructures. Number of reported incidents on industrial objects has been dramatically growing from 11 incidents in 2010 to 290 incidents per year these days (based on ICS CERT US report). Business and technological interruption has ranked as the number one risk concern globally. Traditional security measures are not enough for protection of industrial environments against cyber threats. The aim of the research is to identify and analyze software solutions with new holistic approach to cybersecurity of industrial enterprises. The stages of the work include analysis of research works and analytical reports in the field industrial cybersecurity; investigation of standard and legal documents regulating

industrial cybersecurity in the Russian Federation; industrial cybersecurity software market research; software selection; determination requirements of industrial software; comparison of the software.

Introduction

Background. Current technology transformation (IoT, IIoT, Industry 4.0 etc.) and business pressure to make decisions faster and better than competitors creates new big opportunity – «industrial digitalization». Essential part of it – industrial cyber security – to avoid those cyber-physical systems will be out of the control. Last research of Kaspersky Lab, published on July 2016, showed that about 220.000 of ICS elements are available from the Internet globally. Even one incident can cause significant losses, reputation of the company and even human or ecological victims.

Problem statement. Thereby the problem that studied in this work is growing number of cyber threats and new approaches to protect industrial systems.

Professional significance. Modern challenges require now to build new approach to provide comprehensive operational technology protection as it should be addressed to the level of company, protected elements and stakeholder's communication. Therefore, industrial cyber security is transforming into industrial cyber risk management and it is essential to use more complicated and holistic software to mitigate risks.

The subject of the study is the functionality of the software «Kaspersky Industrial CyberSecurity» developed by Kaspersky Lab.

Delimitations of the study. The aim of this investigation is to identify and analyze software solutions with new holistic approach to cybersecurity of industrial enterprises. In accordance with the aim the following objectives were set:

1. to study the research works and analytical reports in the field industrial cybersecurity;
2. to analyze the standard and legal documents regulating industrial cybersecurity in the Russian Federation;
3. to identify cyber security software on Russian market and make their comparative analysis;

In particular, the research will include the following methods:

- scientific generalization method;
- method of comparison;
- method of systematic analysis.

Literature review

Industrial cybersecurity scientific and regulating documentation in the Russian Federation began to develop quite recently. The question of industrial cybersecurity emerged only after the number of cyber-attacks on industrial plants in Iran, the USA and Europe. That is why almost all Russian cybersecurity researches based on European and American experience. Another argument is that all occurring cyber incidents in the USA are subjected to criminalistics inspection and should be reported in government. Similar cooperation of industrial enterprises with government and information security experts will be possible in Russia only in few years in accordance with the Federal law «About Safety of Critical Information Infrastructure of the Russian Federation» № 187-FZ. The State Duma and the Federation Council assented

the document on July 26, 2017 and it took legal effect on January 01, 2018. The law establishes the general principles of legal regulation of the relationship in the field critical information infrastructure safety in the Russian Federation. In conformity with the law, all critical infrastructure objects have to be referred to one of the category of importance. After categorizing, they need to follow requirements for safety of significant critical information infrastructure objects and the requirement for creation of security systems of this objects and ensuring their operability. Also critical information infrastructure objects should immediately inform the Federal executive authority of occurred computer incidents.

Today Russian and foreign theorists and practitioners in the field of information security quite often open up the question of industrial control systems security in their research works and analytical reports of the malicious software. In the report «To Kill a Centrifuge» by Ralph Langner (2013) the author analyses the first reported cyber-physical attack on industrial plant named «Stuxnet». The document combines results from reverse engineering the code of the attack with information about attacked plant and background information on the attacked uranium technological process. Ralph Langner shows that it was a targeted attack created by motivated and qualified hackers. They knew every detail of technological process and even models of programmable logic controllers that operate centrifuges. The author describes how difficult it would be to use Stuxnet as a blueprint for cyber-physical attacks against critical infrastructure of the United States and their allies. The overall aim of this report is to show problems in the area of cybersecurity and to explain how industrial enterprises and governments can protect their infrastructures against sophisticated cyber-physical attacks like Stuxnet.

Another paper that has made a significant contribution to understanding the problem of industrial cybersecurity is «SCADA Safety in Numbers» by Gleb Gritsai, Alexander Timorin, Yury Goltsev, Roman Ilin, Sergey Gordeychik and Anton Karpin (2012). The group of experts compare discovered vulnerabilities in industrial hardware for the period from 2005 to October 1, 2012. The paper shows that about a half of industrial supervisory control and data acquisition systems are available from the Internet are vulnerable and can be hacked by poorly trained malware users. In general, it means that such systems should be protected by problem-oriented software designed with understanding of industrial characteristic aspects.

In recent years a considerable amount of work has been written to identify risks and safeguard industrial control systems and networks from malicious and targeted attacks. The survey «Securing Industrial Control Systems-2017» written by Bengt Gregory-Brown gathers and analyzes different data from hundreds of IT and industrial control systems (ICS) security practitioners from a huge amount of industries. The paper shows that industrial managers understand cyber risks and increases budgets of their companies on security of systems that control and monitor industrial and infrastructure processes. Nowadays specialists consider the top threat vector to their ICS to be adding devices to the network that cannot protect themselves. Industrial automation vendors also recognize these risks and publish their own reports about industrial cybersecurity, for example the paper «Cybersecurity for Industrial Automation & Control Environments» by Industry Director of Schneider Electric Ivan Fernandez (2013). The author argues that more open and collaborative industrial networks can make industrial control systems more vulnerable to hackers' attacks. Ivan

Fernandez explains how to minimize the risks of cyber-attacks and prevent potentially significant monetary loss. The expert also dramatizes the importance of using security solutions that can protect critical information infrastructures of industrial enterprises.

Methods

The common idea of all used methods is to analyze thematic research works and analytical reports, find out the best practices of industrial cybersecurity and then using this background compare the industrial cybersecurity software presented on Russian market.

Method of scientific generalization was used to study the current state of the problem of critical information infrastructures security, gather and analyze basic research works and analytical reports in this area.

Systematic analysis and comparison methods were used to identify key features of software for industrial cybersecurity, to compare them and find out the most complex software designed with understanding of industrial characteristic aspects. The absence of methods below consists in lack of publicly available data about software. In this case, it is possible to compare indicators to averages or assume such data away.

The review of decisions on ensuring cyber security of automated control systems

Modern digital transformation of technologies (The Internet of things, the Industry 4.0, etc.) and requirements of business departments of the companies to make decisions quicker and more effectively, than competitors, creates new opportunities – "the digital industry". Her important part is an industrial cyber security. Approach to ensuring cyber security of automated control systems cardinally differs from approach to protection of IT infrastructures. In a technological segment emergence even of one incident can cause falling of reputation of the company, considerable financial losses and even the human or ecological victims. So, one of the last purposeful attacks is the attack to power supply networks in December, 2015 in Ukraine which has caused blackout in 5 regions for 6 hours [1, page 12].

Emergence of large-scale cyberincidents of IB in the industry and objects of critical infrastructure has revealed need for detailed study of vectors of the attacks and models of the violators inherent in directly industrial systems. There was a need for development of complex strategy of providing IB for the industrial control system systems. Modern problems in the field of providing IB industrial control system lead to creation of new approach to providing a comprehensive protection of Operational technologies which has to be directed to all levels of the company, protecting elements and communications between them. Thus, the industrial cyber security is transformed to industrial department of cyber-risks.

The industrial companies impose more serious requirements to decisions on protection of industrial control system, they have to be adapted to work in a technological segment and consider features which haven't been realized in traditional means of anti-virus protection. Approach to providing IB industrial control system requirements and recommendations have to be the cornerstone of both the Russian, and international normative documents on IB [2, with. 6].

Perhaps, for this reason today in the market of decisions on IB industrial control system in the Russian Federation a small amount of competitive decisions is observed.

Thus, in the analysis of the Russian market of decisions on ensuring cyber

security of industrial control system the following criteria have been defined:

1. the decision has to provide cyber security of the industrial control system components – the SCADA, RSU elements, industrial networks and PLK;
2. the decision has to provide comprehensive cyber defense without impact on technological process;
3. the decision has to trace in real time safety events at the level of certain teams of technological process;
4. the decision has to be developed taking into account operational compatibility to give ample opportunities to integration with third-party SIEM, MES systems, etc.

For the purpose of detection of the decisions corresponding to the criteria described above within this work the materials from open sources published by the authoritative Russian companies experts in the field of IB namely by Kaspersky Lab, Infosistema Jett, DialogNauka, Softline, Positive Technologies and drugm have been analysed.

As a result of the analysis of sources, for further detailed consideration and comparison solutions of DATAPK, InfoWatch ASAP, Kaspersky Industrial CyberSecurity and Positive Technologies Industrial Security Incident Manager of development of the companies the Ural Center of Security systems, InfoWatch, Kaspersky Lab and Positive Technologies respectively have been chosen. Lower in work will be considered in more detail these decisions are described.

1) DATAPK

The decision of the company the Ural Center of Security systems has been officially submitted in 2015. The vendor developed a product as the system of monitoring and detection of invasions in technological network. The main functionality and purpose of the decision are presented in the Figure 1.



Figure 1 – Functionality of DATAPK

Source of <https://www.slideshare.net/zlonov/datapk>

DATAPK provides control and the analysis of a condition of security of industrial control system of production objects and combines to a vseba the following functionality:

- functionality of map development of technological network, identification in her unauthorized changes;
- control of a configuration of the industrial control system components;
- management of safety events;
- detection of the computer attacks in the industrial control system technological network, identification of network anomalies;
- detecting of vulnerabilities in the industrial control system components.

The considered product has undergone approbation at a number of customers of the UTsSB company from fuel and energy complex, metallurgy and other industries of Russia. In separate projects the decision is introduced in trial operation.

In addition It should be noted that in 2017 DATAPK has undergone certification of FSTEC of Russia. The certificate of conformity issued by the regulator certifies that the software of DATAPK is the software of control (analysis) of security of information which isn't containing the data which are the state secret and also conforms to requirements of specifications at implementation of instructions on operation. The certificate is issued for the term of three years [31].

2) InfoWatch ASAP

The product has been developed by the InfoWatch company, officially released in 2016 and represents a hardware and software system (further – the PACK ICE) for safety of industrial control system as it is presented in the Figure 2.

The functionality of the decision allows to find and prevent the attacks directed to information infrastructure of systems of automated control systems [3].

It is possible to allocate the following key opportunities of the decision:

- detection of invasions into industrial network and protection against insert in data transmission channels;
- a possibility of firewalling at the level of industrial protocols;
- ensuring control of correctness of technological process;
- control of integrity of transmitted data;
- monitoring of vulnerabilities of industrial control system;
- support of proprietary protocols of industrial systems of automation.

МНОГОУРОВНЕВЫЙ ПОДХОД К ЗАЩИТЕ АСУ ТП



Figure 2 – Structure of the Solution of InfoWatch ASAP

Source: https://www.anti-malware.ru/products/InfoWatch_ASAP

3) Positive Technologies Industrial Security Incident Manager (далее – PT

ISIM).

The decision of the Positive Technologies company has been officially submitted to the public in the field of IB in 2016. PT ISIM is an implementation of approach of the Positive Technologies company to protection of industrial control system. It should be noted that for different industries specialists of the company create various interfaces, and at each introduction PT ISIM adapts to a real operational environment – to protocols, architecture, rules of correlation and the equipment, typical for her. According to the head of this direction of the Positive Technologies company, at similar approach the efficiency of detection of the attacks increases many times. Physical service conditions in the industry happen extremely aggressive therefore industrial execution of PT ISIM is selected under a real operational environment taking into account specifics of specific industry. However it should be noted that this approach can be considered and on the other hand. The decision of PT ISIM isn't «box» and demands completion under almost each client, and even up to completion under this or that installation of the customer. These completions, for example in the conditions of the compressed delivery time, can be not fully tested and in a consequence to lead to failure in work on an object. Besides, the customer should be engaged constantly in «custom» projects on each new installation [4]. The developer company states that the product of PT ISIM helps to fight both with internal, and against external threats of information security. From them it is possible to allocate such threats as:

- unauthorized connection
- attempts of selection of the password
- illegal managing directors of team
- substitution of an insertion of the industrial equipment,
- potentially dangerous actions of personnel
- equipment configuration errors.

The principle of work of PT ISIM consists in collecting and the analysis of the copy of traffic of technological network, standard introduction of the decision is presented in the Figure 3. The mechanism of intellectual processing of events used by PT ISIM allows to connect separate events of safety in chains of actions of the malefactor and to reveal the attacks distributed in time (even on the long periods), notifying on an incident of employees on places or in the situational center. In this decision the functionality of monitoring and control of technological network is worked perfectly out, however protection of final knots is presented very modestly.

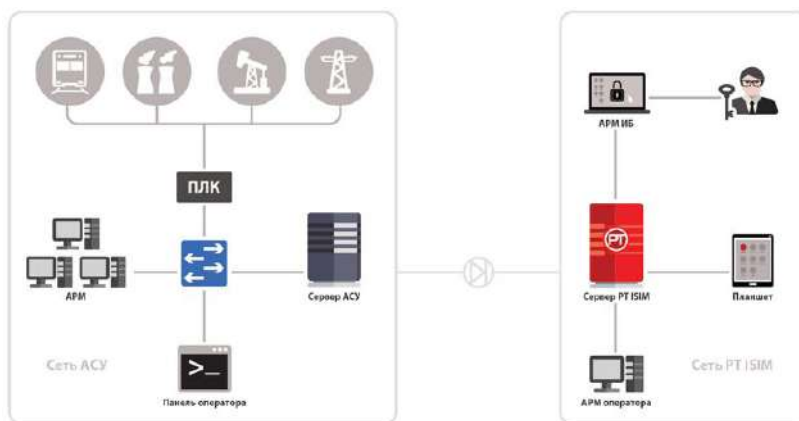


Figure 3 – Standard introduction of the decision of PT ISIM

Source: <http://www.connect-wit.ru/pt-industrial-security-incident-manager-pt-isim.html>

Distinctive feature of this system is the built-in mechanism of correlation of events which can connect all preventions in a certain chain of events. Thanks to this function it is possible to restore a full picture of the taken place safety event. Also it should be noted that well worked user's interface. Today the company has finished a number of pilot projects with application of this decision.

4) Kaspersky Industrial CyberSecurity (далее – KICS)

The decision of KICS has been officially submitted by the JSC Kaspersky Lab company in 2015. It should be noted that development of the decision was conducted since 2012, i.e. the decision has entered the market rather worked and tested. An integrated approach to providing IB industrial control system which realizes as protection of final knots of technological network (jobs, SCADA servers, HMI panels), and monitoring of integrity and identification of the attacks in technological network is the cornerstone of a product.

The solution of Kaspersky Industrial CyberSecurity includes the functional components and services of the company presented in the Figure 4. The functional component includes 3 main components:

- ✓ Kaspersky Industrial CyberSecurity for Nodes – protection of final knots of technological network, servers and workstations;
- ✓ Kaspersky Industrial CyberSecurity for Networks – protection of technological network, detection of anomalies and control of integrity of network;
- ✓ Kaspersky Security Center – the centralized management of protection of knots, reception and transfer to the external systems of events of information security.



Figure 4 – Functional components and services of the decision of KICS
Источник <http://www.bash.ru/index.php/new-innovasii/21042-kics-na-strazhe-promyshlennoy-bezopasnosti>

From remarkable functions it is expedient to allocate the following:

- The centralized management (control is exercised from the uniform Kaspersky Security Center console)
- Protection against malicious software (signature, heuristic analysis)
- Passive analysis of dens of OS
- Control of integrity of network (applications launch control, control of integrity of industrial process and PLK projects, control of devices)
- Protection against encoders
- Prevention of invasions (protection against the network attacks, exploits and firewall)
- Integration with other systems
- Certification of industrial control system by vendors and state regulators [4, 5]

In section 2.2 of Chapter 2 detailed comparison of the above-stated decisions on their functional and nonfunctional signs will be carried out, the most reliable and complex decision on ensuring cyber security of industrial control system is revealed and also the possibilities of use and commercial operation of the chosen decision are considered.

Results

After applying three different methods may be obtained that the most complex and reliable software solution is «Kaspersky Industrial CyberSecurity» developed by Kaspersky Lab. Specialized component based software solution was launched globally in 2016. It distinguish from its competitors by holistic protection of the whole environment of industrial systems – end network nodes, industrial network and

programmable logic controllers. The software provides comprehensive cyber protection in a passive way without any technology process influence and includes anomaly detection engine that can monitor real time events on the level of particular technology process command. Another essential figure is that it is based on multi-year research of KL and insight from more than 270 thousand customers of the company.

Conclusion

A survey of the main thematic research works and analytical reports proved that nowadays industrial companies and government work extensively to protect industrial environment from malicious programs and hackers attacks, but the problem of industrial cybersecurity exists and much still remains to be done in this area. The study is focused on identification key features of software for industrial cybersecurity, comparison of these solutions and finding out the most complex software with new holistic approach, designed with understanding of industrial characteristic aspects. The detailed analysis revealed that the software solution «Kaspersky Industrial CyberSecurity» developed by Kaspersky Lab is more relevant to protect industrial enterprises than its competitors. The software may be recommended to increase the level of protection and quality of industrial cyber landscape.

References

1. Gregory-Brown B. (2017). Securing Industrial Control Systems. 2017. A SANS Survey 5. London (UK), 27-30.
2. Gritsai G., Timorin A., Goltsev U., Ilin R., Gordeychik S., Karpin A. (2013) SCADA Safety in Numbers. Positive technologies. Moscow (Russia), 10, 16-23.
3. Fernandez I. (2013). Cybersecurity for Industrial Automation & Control Environments. A Frost & Sullivan White Paper in Partnership with Schneider Electric. Munich (Germany). 7. 13-17.
4. Friedman A. (2013). Cybersecurity and Trade: National Policies, Global and Local Consequences. The Brookings Institution. Washington, D.C. (USA). 2, 16-17.
5. Langner R. (2013). To Kill a Centrifuge. The Langner Group. Hamburg (Germany). 3. 18-26.
6. Федеральный закон «О безопасности критической информационной инфраструктуры Российской Федерации» № 187-ФЗ (2017). Москва (Российская Федерация). 5. 12-15.

УДК 338.2

**Обеспечение безопасности информационных систем организаций
и регулирование деятельности в области их защиты**

В.Ю. Савин, кандидат экономических наук, руководитель группы
международной и управленческой отчетности,
ЗАО «РосБизнесКонсалтинг» (РБК), г. Москва

В статье рассказывается о том, что в современном мире одной из глобальных проблем для компаний стали кибератаки, представляющие серьезную опасность для их деятельности. В качестве важнейших направлений решения данной проблемы названы необходимость разработки и утверждения компаниями стратегии защиты информационных систем, включающей антивирусное программное обеспечение.

Большой вклад в решение указанной проблемы внес принятый в 2002 году в США закон о борьбе с нарушениями финансовой и операционной дисциплины руководителями торгующих на фондовых биржах компаний, получивший название SOX.

Исследования и практический опыт работы с большим числом проектов, требующих соответствия с SOX, свидетельствуют, что информационные технологии становятся приоритетным инструментом, обеспечивающим надежность системы внутреннего контроля, особенно над подготовкой финансовой отчетности организаций. Использование программного обеспечения быстро окупает затраты на его установку за счет повышения эффективности контроля, в то время как отказ от автоматизации процессов и процедур контроля оборачивается непредвиденными затратами и рисками.

Поэтому организациям-участникам внешнеэкономической деятельности, желающим соблюдать требования закона SOX, обязательно следует провести предварительную оценку обеспечения им достаточно высокой степени интегрированности процесса подготовки финансовой отчетности с процессом ее поэтапного контроля.

Интеграция финансовой отчетности с системой внутреннего контроля делает возможным активное отображение текущего состояния и эффективности работы системы внутреннего контроля в привязке к формируемой отчетности, создающее условия для мониторинга потенциальных рисков и анализа информации о финансовых результатах, а также для автоматизации процесса предотвращения неавторизованных записей и прочих отклонений.

В свете рассмотренного вопроса одной из важнейших составляющих документов, прилагаемых к годовой финансовой отчетности и признанием ответственности компании за достоверность ее информации, становится отчет о результатах проверки эффективности внутрифирменного контроля над подготовкой отчетности.

Обеспечение безопасности информационных систем, обеспечение безопасности, информационные системы, внешнеэкономическая деятельность, система

безопасности, кибератаки, киберугрозы, защита информационных систем, правила SOX, SOX-software, финансовая отчетность, внутренний контроль.

Ensuring the security of information systems of organizations and regulating activities in the field of their protection

V.Y. Savin, Candidate of Economic Sciences, Head of International and Management Reporting Group,
RosBusinessConsulting CJSC (RBC), Moscow

The article describes the fact that in the modern world one of the global problems for companies have become cyberattacks, representing a serious danger to their activities. As the most important directions of solving this problem is called the need for the development and approval of the companies of strategy of protection of information systems, including antivirus software.

A great contribution to the solution of this problem was made by the law on combating violations of financial and operational discipline by the heads of companies trading on the stock exchanges, called SOX, adopted in the United States in 2002.

Research and practical experience with a large number of projects requiring SOX compliance show that information technology is becoming a priority tool for ensuring the reliability of the internal control system, especially over the preparation of financial statements of organizations. The use of the software quickly recoups the cost of its installation by improving the efficiency of control, while the refusal to automate the processes and procedures of control results in unforeseen costs and risks.

Therefore, organizations-participants of foreign economic activity, wishing to comply with the requirements of the SOX law, it is necessary to carry out a preliminary assessment of ensuring a sufficiently high degree of integration of the financial reporting process with the process of its phased control.

Integration of financial statements with the internal control system makes it possible to actively display the current state and efficiency of the internal control system in relation to the reporting, creating conditions for monitoring potential risks and analysis of information on financial results, as well as to automate the process of preventing unauthorized records and other deviations.

In the light of the considered issue, one of the most important components of the documents attached to the annual financial statements and the recognition of the company's responsibility for the accuracy of its information, is the report on the results of the audit of the effectiveness of internal control over the preparation of reports.

Information systems security, security, information systems, foreign economic activity, security system, cyber attacks, cyber threats, information systems protection, SOX, SOX-software rules, financial reporting, internal control.

Одной из серьезнейших экономических проблем в век глобальных информационных систем для организаций-участников внешнеэкономической деятельности стали киберугрозы. В последние годы киберпреступники распространяют свои угрозы во всем мире часто и изоциренно.

Натренировавшись на домашних пользователях, они серьезно взялись за организации: банки, государственные учреждения, акционерные общества, холдинги, организации малого и среднего бизнеса. Ежедневно миллионы компаний получают вредоносные коды различной целенаправленности.

Всем российским организациям важно наладить собственную систему безопасности и разработать внутрифирменный стандарт, в котором следует:

- составить перечень наиболее предрасположенных к кибернападениям участков в работе информационных систем;
- прописать четкий и сжатый порядок действий в части реагирования на случаи возникновения соответствующих инцидентов;
- указать порядок принятия мер, предотвращающих или максимально снижающих возможность проявления в реальной действительности форс-мажорных обстоятельств, связанных с кибератаками.

Практика показывает, что наиболее распространенными угрозами, которых следует предостерегаться российским организациям являются:

- письма, содержащие угрозы (киберпреступники чаще всего распространяют свои вредоносные коды через электронную почту, используемую организациями для переписки с деловыми партнерами, а также для внутрифирменных сообщений между сотрудниками. К одним из современных угроз электронной почты относится Win32/Bayrob, наиболее распространенный в Аргентине, Чили, Мексике, Колумбии, распространяемый раздельно, маскируясь как купон Amazon. Вредоносное программное обеспечение, полученное через вложенные файлы, создает огромные проблемы, как это было замечено в случае с STB-Locker, в котором различные волны атак на разных языках распространяли троян, обнаруженный ESET как Win32/TrojanDownloader.Elenoocka.A., при проникновении которого установленный им ransomware для шифрования файлов жертвы, требует от пользователя оплаты выкупа, прежде чем сделать файлы доступными снова. Для того чтобы защитить корпоративные учетные записи электронной почты от данного вида кибератаки необходимо своевременно обнаруживать вредоносные файлы в электронных письмах, а также защитить сервер электронной почты и отфильтровать эти элементы, прежде чем они появятся в почтовых ящиках организаций);
- внешние устройства, способные удалить файлы (распространяют вредоносный код USB-накопителей и других типов внешних устройств. Основным методом такого типа заражения является злоупотребление ссылками прямого доступа (LNK), которые при подключении устройства USB к зараженному компьютеру удаляет все файлы и каталоги, заменив их ссылками прямого доступа. Если одно и то же устройство USB вставляется в новый компьютер, когда пользователь дважды щелкает по этим ссылкам, они заражают систему. Некоторые семейства вредоносных программ на протяжении многих лет использовали эту технику для распространения Win32/Dorkbot, Python/Liberty.A, JS/Bondat, VBS/Agent. NDH и даже вариантов Win32/IRCBot. В целях предотвращения кражи информации организациям рекомендуется устанавливать политики использования внешних устройств хранения

данных, в частности использовать решение, позволяющее выборочно блокировать их использование);

- эксплойты (распространяют вредоносный код программных уязвимостей через офисные приложения, браузеры и веб-сайты. Исследования уязвимости операционных систем Microsoft показали, для него одним из приложений с большинством инцидентов, позволявшим киберпреступникам удаленно управлять системой был Internet Explorer. Опасность таких эксплойтов в том, что они влияют не только на конечную точку, но и на веб-серверы и другие устройства, напрямую подключенные к Интернету. Для того чтобы предотвратить возникновение подобных угроз нужны проактивные решения безопасности с такими функциональными возможностями, как блокиратор Exploit ESET, помогающие предотвратить выполнение эксплойтов и защитить пользователей от таких известных примеров этих угроз, как 0-дневные эксплойты);
- Ransomware (способны создать много уязвимых точек в информационной системе. Независимо от того, выполняют ли организации конфигурацию антивирусных решений или подвергаются частым обзорам безопасности, такая атака означает, что очень важно продолжать бизнес, и в зависимости от того, в какую ее информацию проникнет какой-либо вирус, связанный с вымогательством, необходимо создавать резервные копии информационного массива, позволяющие минимизировать последствия воздействия Ransomware);
- незащищенные мобильные устройства (во многих случаях мобильные устройства подключаются к той же сети, что и компьютеры организации и не защищены, по этой причине они могут стать мишенью для атак и послужить для утечки информации. Защита мобильных устройств не только предотвращает заражение их вредоносным кодом, но также помогает продолжать защищать внутреннюю сеть, когда эти устройства подключены к ней. В связи с этим мобильные устройства целесообразно управлять с единой консоли управления для конечных точек. Организациям следует разработать эффективные политики для мобильных устройств и четкие правила, регулирующие использование смартфонов и других устройств).

Задача команд безопасности информационных систем организации – защитить ее, гарантируя, что никакое оборудование в их сети не заражено, и в случае возникновения какого-либо вируса как можно быстрее среагировать, минимизируя его влияние на бизнес.

В целях проактивной защиты от таких угроз следует выяснить, какие угрозы могут причинить наибольший вред организации. В совокупности все это поможет сохранить безопасность бизнеса и, прежде всего, их информационный массив [4].

Каждый ведущий специалист, ответственный за безопасность информационных систем организации, должен систематически проводить мониторинг на выявление угроз ее целостности, основные виды которых приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Основные виды угроз безопасности информационной системы

Виды угроз	Краткая характеристика угроз
Приоритетная эскалация	Программные продукты часто содержат ошибки, которые могут быть использованы для доступа к определенным ресурсам с более высокими привилегиями и способны обходить элементы управления безопасностью
Вирус	Представляет собой компьютерную программу, обладающую способностью реплицировать и заражать другие компьютеры, передающуюся по сетям или через USB-накопители и другие переносные носители
Червь	В отличие от типичного вируса, его цель состоит не в том, чтобы изменять системные файлы, а в том, чтобы тиражировать столько раз, сколько позволяет пространство на жестком диске или память, замедляя работу компьютеров или вызывая их сбои
Троянская программа	Маскируется под обычные безопасные приложения, но ее задача – позволить хакеру удаленный доступ к компьютеру. В свою очередь, зараженный компьютер может использоваться как часть атаки на отказ в обслуживании и кражи конфиденциальной информации для захвата паролей, номеров кредитных карт
Шпионское программное обеспечение	Вторгается в компьютеры через загрузку программного обеспечения. Обычные и бесплатные загрузки, в дополнение к совместному использованию файлов peer-to-peer, являются типичными точками заражения. Как и трояны, шпионские программы могут добывать конфиденциальную информацию, но часто используются в качестве рекламных инструментов. Цель состоит в том, чтобы собирать информацию о пользователе, контролируя активность его действий в Интернете
Спам	Нежелательная почтовая рассылка, поставляемая в виде рекламы. американский закон CAN-SPAM, был введен в действие, чтобы защитить пользователей от спама, потребляющего пропускную способность сети, замедляя работу компьютеров
Рекламное ПО	Рекламное программное обеспечение наблюдает привычки пользователя в интернете с целью целенаправленного отображения веб-рекламы
Руткиты	Самые труднообнаруживаемые вирусы, активирующиеся при загрузке системы – до запуска антивирусного программного обеспечения, позволяющие устанавливать файлы и учетные записи, предназначенные для перехвата конфиденциальной информации
Ботнеты	Создаются с помощью троянца и находятся в сетях IRC. Бот может запустить IRC-клиент и присоединиться к чат-комнате, чтобы спамить и запустить атаки на отказ в обслуживании
Логическая бомба	Бит кода, добавленный к программному обеспечению, которое будет устанавливать определенную функцию, похож на вирус, поскольку удаляет файлы и повреждает информационные массив

В целях борьбы с данной проблемой организациям необходимо разработать и утвердить стратегию защиты информационных систем, включающую антивирусное программное обеспечение [3].

Весомый вклад в усиление безопасности информационных систем организаций внес принятый в 2002 году в США закон о борьбе с нарушениями финансовой и операционной дисциплины руководителями торгующих на фондовых биржах компаний, получивший название SOX. А к лету 2002 года был принят Акт, в котором были предложены меры защиты, способствующие защите интересов инвесторов в виде внутреннего мониторинга обусловленности управленческих решений ведущих специалистов, стандартов внешнего аудита в части оценки качества работы системы внутрифирменного контроля компаний, а также комплекса документов, разграничивающих аналитические процедуры по обеспечению их безопасности от бизнес-процессов, связанных с принятием инвестиционных решений.

Практически все западноевропейские страны приняли нормативные документы, опирающиеся на общие понятия SOX, однако, полностью соответствующие местному законодательству. В России вопросы защиты информационных систем хозяйствующих субъектов законодательно не регулируются, но это, скорее всего, вопрос времени.

Основное преимущество SOX проявляется в том, что он позволяет привлечь и усилить внимание к качеству управления в части операционных, инвестиционных и кредитных рисков. В развитых странах руководители компаний начинают понимать роль информационных технологий в обеспечении стратегических задач бизнеса. Во многих крупных корпорациях ИТ-директора стали играть ведущую роль в советах директоров, проявляя особую активность в разработке и управлении корпоративной стратегией, бюджетированием и рисками.

О значимости защиты информационных систем свидетельствует множество фактов, например, летом 2008 года компания Levi's на неделю задержала поставки продукции оптовикам и потеряла по этой причине 45 млн. долл. Причиной инцидента было неудачное внедрение системы SAP в головном офисе компании Levi's и в ее филиалах, что привело к нарушению системы резервного копирования и пропаже данных о заказах. Аудиторами консалтинговой фирмы PriceWaterhouse Coopers в качестве основной причины этих нарушений было названо несоблюдение правил SOX.

В целях выполнения требований SOX, ИТ-департаменты усиливают степень детализированности управленческой отчетности всех уровней, начиная от управления текущей деятельностью, заканчивая оценкой эффекта от применения программного обеспечения на конечные финансовые результаты бизнеса компании в разрезе показателей ее проектов.

Одним из распространенных подходов к руководству ИТ-услугами является ITIL, отличающийся качественной постановкой процессов, гарантирующей выполнение работ в полном соответствии с требованиями стандартов SOX, которой в частности предусмотрено возложение ответственности на разных сотрудников, а также полное документирование всех процессов и их регулярный контроль.

Вот несколько значимых требований, способствующих усилению защиты от современных угроз информационным системам организаций:

- для пользования сотрудниками должно быть доступно только авторизованное программное обеспечение SOX control F19/1a-1c c

функционалом, позволяющим выявить и предотвратить его неавторизованное использование;

- программное обеспечение должно быть маркировано и периодически подвергаться проверке и инвентаризации SOX control F19/1f – именно в этом заключается суть процесса управления конфигурациями ИТIL;
- изменения в информационных технологиях возможны только после детального тестирования SOX control F14/E1, составляющего формально обязательную часть управления релизами и изменениями, детально проработанного в библиотеке ИТIL;
- базисные конфигурации должны быть разработаны для всех ИТ-активов и систематически обновляться, а процесс создания базисных конфигураций должен быть формализован SOX control F19-2D,2E/2F, что также составляет ключевой принцип управления конфигурациями ИТIL [1].

Организации, осуществляющие внешнеэкономическую деятельность должны соблюдать международные требования, предъявляемые к содержанию финансовой отчетности, точнее ее надежности. В целях усиления достоверности информации своей отчетности американские компании применяют программное обеспечение SOX-software, представляющее интерес в России не только для организаций-участников внешнеэкономической деятельности, но и для предпринимателей, которые намерены продать свой бизнес иностранным инвесторам, и для иностранных компаний, имеющих филиалы в стране.

В настоящее время согласно требованиям американского закона Sarbanes-Oxley (SOX) и аналогичных законов других развитых стран, компании формируют кроме финансовой отчетности и другие документы, подтверждающие эффективность внутрифирменного контроля над ее подготовкой. Эти требования одинаково касаются всех видов информационных систем, – и недорогих программных обеспечений типа «1С Бухгалтерия», и «мощных» ERP-решений. Для пользователей отчетности теперь стало главным, чтобы программное обеспечение позволяло организации формировать финансовую отчетность, вызывающую полное доверие акционеров и инвесторов.

Поэтому крайне важно совершенствовать качество работы внутреннего контроля и российским организациям-участникам внешнеэкономической деятельности, которых затрагивают требования европейских и российских фондовых бирж, потому что это стало для американских и западных инвесторов как бы свидетельством качества финансовой отчетности по умолчанию.

Компании с котируемыми на российских биржах акциями обязаны иметь аудиторские комитеты с независимыми директорами в составе, контролирующие качество внутрифирменного контроля и весь поэтапный процесс формирования финансовой отчетности на всех его этапах, требования которых целесообразно привести в соответствие с требованиями МСФО.

Мы считаем, что в современном деловом мире наибольшим шансом для получения инвестиций располагают только организации с прозрачным бизнесом и достоверной финансовой отчетностью.

Таким образом, руководители российских организаций-участников внешнеэкономической деятельности должны понять, что для признания достоверности финансовой отчетности недостаточно одного факта

использования ERP-системы для ее подготовки, так как теперь еще требуется документальное подтверждение факта эксплуатации ERP-системы в среде, исключаяющей какие-либо мошеннические схемы. Требования SOX касаются не только ERP-систем, но и информационных систем любых типов.

Исследования и практический опыт работы с большим числом проектов, требующих соответствия с SOX, свидетельствуют, что информационные технологии становятся приоритетным инструментом, обеспечивающим надежность системы внутреннего контроля, особенно над подготовкой финансовой отчетности организаций. Использование программного обеспечения быстро окупает затраты на его установку за счет повышения эффективности контроля, в то время как отказ от автоматизации процессов и процедур контроля может обернуться непредвиденными затратами и рисками.

Для российских организаций такая «фетишизация» внутреннего контроля, станет не только признаком соответствия регуляторам мировых фондовых рынков, но и способом борьбы акционеров с нецелевым расходованием средств их менеджментом.

Официальные требования и процедуры установления внутреннего контроля над информационными системами нашли отражение в публикации Ассоциации по аудиту и контролю информационных систем «IT Control Objectives for Sarbanes-Oxley», определяющей конкретные цели и бизнес-процессы мероприятий ИТ-контроля и значение основанных на информационных технологиях процедур системы внутреннего контроля, отвечающей за раскрытие информации и надежность финансовой отчетности.

Практика показывает, что в реальности ERP-системы не располагают всей необходимой бизнесу функциональностью: если 10 лет назад действующая ERP-система покрывала в среднем 70% потребностей организации, то сегодня – только 40%. Поэтому организациям приходится располагать целым набором разнообразных приложений, формирующих в совокупности единое информационное пространство.

Масштабы работ, связанных с оценкой работы системы внутреннего контроля над информационной системой, довольно велики и на крупных предприятиях число ключевых контрольных процедур может достигать до 1000, потому что контролировать нужно и бухгалтерские документы, и бизнес-процессы. К примеру, чтобы оценить одну прикладную контрольную процедуру потребуется: проанализировать присущие риски; сформулировать цели контроля; документировать бизнес-процессы; идентифицировать основные точки ввода, изменить, обработать или вывести данные; оценить устройства контрольной процедуры; оценить ее эффективность.

Этап оценки следует предусмотреть в обязательном порядке, потому что разработка эффективных процедур предотвращения рисков невозможна без их комплексной оценки. Следовательно, работы следует начинать с детального планирования контрольных процедур, позволяющих выявить и устранить недостатки в системе внутреннего контроля. Еще на этапе планирования контрольных процедур следует определиться с бизнес-процессами, существенно влияющими на достоверность финансовой отчетности: подготовкой финансовой отчетности; закупкой; продажами; запасами; общим компьютерным контролем и пр.

Приведение информационных систем организаций в соответствие с требованиями закона сопровождается ростом расходов на услуги SOX-консультантов, а также вложений связанных с разработкой или приобретением программных и аппаратных решений, позволяющих обеспечить процедуры прикладного компьютерного контроля. Руководителями американских компаний данный психологический барьер уже преодолен, так как соответствие требованиям закона SOX стало для них по значимости приоритетнее, чем снижение затрат, что многие из них даже отложили на время проекты по развитию своего бизнеса. Оно и понятно, обязанность включения заключительной оценки работы системы внутреннего контроля независимым аудитором в состав приложений к годовому финансовому отчету компании установлена главой 404 закона Sarbanes-Oxley.

Поскольку возник такой спрос, производители программных обеспечений разработали соответствующий программный продукт SOX-software, автоматизирующий и оптимизирующий внутренний контроль над составлением финансовой отчетности, объединяющий в единую систему все его компоненты, активизируя тем самым процессы отслеживания внутрифирменного контроля и информируя руководство компании о необходимости действий по устранению его недостатков.

Организациям-участникам внешнеэкономической деятельности, желающим соблюдать требования закона SOX, необходимо руководствоваться следующими рекомендациями.

Выбор конкретного SOX-приложения предусматривает оценку обеспечения им достаточно высокой степени интегрированности процесса подготовки финансовой отчетности с процессом ее поэтапного контроля. Другими словами, задачу усиления интеграции процессов формирования финансовой отчетности с обеспечением ее внутреннего контроля следует рассматривать как приоритетное направление рынка SOX-software.

Благодаря интеграции финансовой отчетности с системой внутреннего контроля становится возможным активное отображение текущего состояния и эффективности ее работы в привязке к формируемой отчетности, создающее условия для мониторинга потенциальных рисков и анализа информации о финансовых результатах, а также для автоматизации процесса предотвращения неавторизованных записей и прочих отклонений.

Например, компания Oracle полностью проинтегрировала свой Internal Controls Manager с Oracle Financial Consolidation Hub – модулем Oracle E-Business Suite, позволяющим трансформировать и консолидировать финансовую отчетность. Благодаря этому Oracle Financial Consolidation Hub теперь оснащен инструментальными панелями для одновременного отражения текущих статусов процессов финансовой консолидации и сертификации внутреннего контроля в Internal Controls Manager, что позволяет финансистам и контролерам получать наглядную текущую информацию, позволяющую с уверенностью утверждать достоверность финансовой отчетности организации [2].

В целях приведения информационной системы организации в соответствие с современными требованиями, целесообразно:

- включить в бюджет смету расходов, связанных с обеспечением внутреннего контроля над подготовкой финансовой отчетности, а также анализом и

информационной поддержкой бухгалтерии и контролирующих подразделений;

- утвердить в качестве внутрифирменного стандарта порядок ведения учета во всех новых проектах задач системы внутреннего контроля;
- протестировать систему внутреннего контроля или воспользоваться услугами независимых внешних консультантов для оценки ее готовности к эффективному функционированию;
- обозначить в составе задач оценку, разработку, документирование и мониторинг общих и прикладных контрольных процедур за процессом автоматизированной обработки финансовой информации, внося тем самым SOX-коррективы в стратегию по информационным технологиям.

Таким образом, отчет о результатах проверки эффективности внутрифирменного контроля над подготовкой отчетности становится одной из важнейших составляющих документов, прилагаемых к годовой финансовой отчетности и признанием ответственности компании за достоверность ее информации. Российским организациям-участникам внешнеэкономической деятельности целесообразно выполнять требования данного международного правового документа, что потребует от них в частности внесения SOX-корректив в стратегии по информационным технологиям.

Литература

1. Левинсон А. Волшебники изумрудного города SOX: принуждение к честности [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.osp.ru/os/2008/08/5661516> (дата обращения: 03.04.2018).
2. Ровный С. Путь к финансовой прозрачности: ERP или SOX-система? [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.cnews.ru/reviews/free/security2006/articles/erp_sox/ - 2006 г. (дата обращения: 03.02.2018).
3. Veronica Henry/ Top 10 Security Threats Every IT PRO Should Know/ [Electronic resource]. Access mode: <https://www.pluralsight.com/blog/it-ops/top-10-security-threats> (date accessed: 09.02.2018).
4. Pablo Ramos/ 5 threats every company needs to pay attention to [Electronic resource]. Access mode: <https://www.welivesecurity.com/2016/02/29/5-threats-every-company-needs-pay-attention/> (date accessed: 3. 05.2018).

УДК 629.7

Влияние конструктивных особенностей симметричных цепей передачи данных на процесс оптимизации физического уровня инфокоммуникационных систем

А.Б. Семенов, доктор технических наук, профессор,
НИУ Московский государственный строительный университет, МГСУ, г.
Москва,

А.Л. Зубилевич, кандидат технических наук, профессор,
Московский технический институт связи и информатики, МТУСИ, г. Москва,

Т.С. Аббасова, кандидат технических наук, доцент,
Государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования Московской области
«Технологический университет», г. Королев, Московская область

Проводится исследование влияния шагов скрутки витых пар горизонтальных LAN-кабелей категории б на первичные и ключевые вторичные параметры электрической среды передачи инфокоммуникационных систем. Исследованы первичные параметры, которые дают возможность определить вторичные параметры симметричного электропроводного тракта: волновое сопротивление и коэффициент затухания. Показано, что применительно к витой паре с наименьшим шагом скрутки целесообразно применить для расчета электрического тракта передачи модель высоких частот.

Инфокоммуникационная система, витая пара, первичные параметры передачи, вторичные параметры, волновое сопротивление, коэффициент затухания, шаг скрутки.

Influence of constructive features of symmetric data transmission chains on the process of optimizing the physical level of infocommunication systems

A.B. Semenov, Doctor of Engineering Science, professor,
Moscow State University of Civil Engineering, MGSU, Moscow,

A.L. Zubilevich, candidate of technical Sciences, professor,
Moscow Technical Institute of Communications and Informatics, MTUCI, Moscow,

T.S. Abbasova, candidate of technical Sciences, assistant professor,
State Educational Institution of Higher Education
Moscow Region «University of technology», Korolev, Moscow region

The influence of the twisting steps of twisted pairs of horizontal LAN cables of category б on the primary and key secondary parameters of the electrical transmission medium of infocommunication systems is investigated. The primary parameters are investigated, which make it possible to determine the secondary parameters of a symmetrical conductive path: wave impedance and attenuation coefficient. It is shown that, with respect to a twisted pair with the smallest twist pitch, it is expedient to apply

the high-frequency model to calculate the electric transmission path.

Infocommunication system, twisted pair, primary transmission parameters, secondary parameters, wave impedance, attenuation coefficient, pitch.

Введение

Сетевые интерфейсы терминальных устройств современных инфокоммуникационных систем в основной массе случаев работают на физическом уровне по симметричным электрическим кабелям из витых пар. Для их обозначения в дальнейшем используем термин LAN-кабели. Его выбор обусловлен тем, что подобные изделия используются как для реализации структурированных кабельных систем, так и для построения оконечного участка сетей доступа.

Отдельные витые пары LAN-кабеля подвергаются воздействию как внешних, так и внутренних помех. Последние возникают в процессе функционирования соседних цепей передачи одного кабеля. Известен ряд методов уменьшения влияния соседних пар на качество передачи. Наибольшую эффективность обеспечивает скрутка жил с различным шагом.

При конструировании LAN-кабелей требуется знание их первичных и вторичных параметров передачи. Первичные параметры характеризуют физическую природу тракта передачи: например, погонное активное сопротивление, погонную индуктивность, погонную емкость и погонную проводимость изоляции электрического кабеля или зависимость коэффициента преломления оптического волокна от расстояния от оптической оси. Вторичные параметры выражают обобщенный результат процесса распространения сигнала по тракту передачи и не зависят от ее природы – например, величина ослабления мощности сигнала при прохождении им определенного расстояния вдоль линии передачи (затухание сигнала); величина ослабления помехи от соседней витой пары для медных электрических кабелей.

Методики расчета первичных и вторичных параметров известны, однако они не учитывают влияние на ключевые параметры различных шагов скрутки отдельных пар. Целью работы является устранение этого недостатка применительно к изделиям категории 6, объем применения которых в современных инфокоммуникационных системах увеличивается быстрыми темпами.

Рассматриваются конструкции U/UTP как наиболее распространенные в нашей стране. Кроме того, они позволяют получить дальности связи, намного превышающие 100 м [1,2]. Параметры определялись в частотном диапазоне 1 – 250 МГц, нормированном стандартами ISO/IEC 11801 и ГОСТ Р 54429-2011.

Расчетная модель

Известно несколько разновидностей электрических кабелей витая пара, которые потенциально могут быть использованы в LAN-кабелях, рисунок 1.

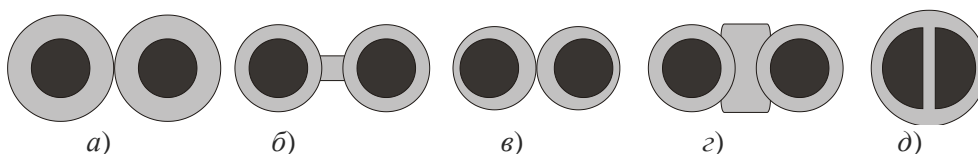


Рисунок 1 – Структуры витых пар LAN-кабелей:

- а) классическая; б) сцепленные пары; в) с несимметричной изоляцией; г) с жесткой вставкой; д) сегментного типа

Анализируются только структуры, приведенные на Рисунок 1а, как наиболее простые в реализации и получившие наибольшее распространение на практике [3,4].

Витую пару как структуру с распределенными параметрами в процессе анализа ее свойств удобно описывать эквивалентной схемой, которая исчерпывающе описывается четырьмя первичными параметрами. Активные элементы представлены погонным сопротивлением R и проводимостью изоляции G . Реактивные элементы, определяющие инерционность витой пары как среды передачи, определяются индуктивностью L и емкостью C . Такой подход дает возможность заметно упростить вычислительные процедуры при сохранении точности расчетов, достаточных для удовлетворения основных потребностей широкой инженерной практики.

В таблице 1 приведены исходные значения параметров, используемые для расчета.

Геометрические характеристики

Для структуры витой пары на рисунке 1а расстояние a между центрами проводников равно диаметру d_1 изоляции и составляет [3]:

$$a = a = \frac{2 \cdot d}{2} + 2 \cdot t_{и} = 1,01 \text{ мм.} \tag{1}$$

Диаметр пары:

$$D = 2 \cdot d + 4 \cdot t_{и} = 2,02 \text{ мм.} \tag{2}$$

Таблица 1 – Характеристики кабеля категории 6

Наименование параметра	Размерность	Обозначение	Значение параметра
Число пар			4
Диаметр токопроводящей жилы	мм		0,57
Толщина изоляции проводника	мм	$t_{и}$	0,22
Толщина оболочки кабеля	мм	T_0	0,6
Материал изоляции			полиэтилен
Диэлектрическая проницаемость изоляции		ϵ_r	2,1
Шаги скрутки пар	мм		
• оранжевой			6,2 12
• синей			7,2 14
• зеленой			8,7 17
• коричневой			10,1 20

Первичные параметры передачи

Характерной особенностью витых пар является то, что их первичные параметры в случае классического дизайна зависят преимущественно от геометрических характеристик скрученной пары проводов.

Активное сопротивление определяется как [3]:

$$R = 2k_y R_0 \left[1 + F(kr_0) + \frac{PG(kr_0) \left(\frac{d}{a}\right)^2}{1 - H(kr_0) \left(\frac{d}{a}\right)^2} \right], \quad (3)$$

где $k_y = \frac{L_{цепи}}{L_{кабеля}} > 1$ – коэффициент укрутки, характеризующий увеличение длины цепи к длине кабеля; k – коэффициент вихревых токов; r_0 – сопротивление постоянному току; P – коэффициент, учитывающий вид скрутки (для парной $P = 1$); r – радиус проводника без изоляции, $d = 2r$ – диаметр проводника без изоляции, a – расстояние между центрами проводников, $F(x), G(x), H(x)$ – специальные функции Бесселя.

Фактически сопротивление имеет три слагаемых, описывающих, соответственно, вклад в активное сопротивление тепловых потерь в металле R_0 , поверхностного эффекта $R_{п.эфф.}$ и эффекта близости $R_{эфф.б.}$ [3]:

$$R = R_0 + R_{п.эфф.} + R_{эфф.б.} \quad (4)$$

С потерями в окружающих металлических массах в случае U/UTP-конструкций и 250-мегагерцовой верхней граничной частоты рабочего диапазона можно не считаться.

Коэффициента вихревых токов k в общем случае находится как

$$k = \sqrt{\omega \mu_a \sigma}, \quad (5)$$

где $\mu_a = \mu_0 \mu_r$ – абсолютная магнитная проницаемость; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-4}$ Гн/км – магнитная проницаемость вакуума; $\mu_r = 1$ – относительная магнитная проницаемость медного проводника.

Для конкретных инженерных расчетов в случае медного проводника удобно пользоваться произведением kr , которое является аргументом специальных функций Бесселя и составляет

$$kr = 0,0105d\sqrt{f}. \quad (6)$$

Для техники категории 6 практический интерес представляет диапазон 1 – 250 МГц. Для таких частот необходимую точность инженерных расчетов обеспечивают следующие асимптотические приближения

$$\begin{aligned} F(kr) &= \frac{\sqrt{2}kr-3}{4}; \\ G(kr) &= \frac{\sqrt{2}kr-1}{8}; \\ H(kr) &= \frac{1}{4} \left[\frac{3\sqrt{2}kr-5}{\sqrt{2}kr-1} - \frac{2\sqrt{2}}{kr} \right]. \end{aligned} \quad (7)$$

Коэффициент укрутки можно определить с привлечением модели винтовой линии, показанной на Рисунок 2 как [3]:

$$k_y = \sqrt{1 + (\pi d / H)^2} \cdot 1 + (\pi d / H)^2 / 2, \quad (8)$$

где h – шаг скрутки пары; $D = 2,02$ мм – средний диаметр витой пары, мм.

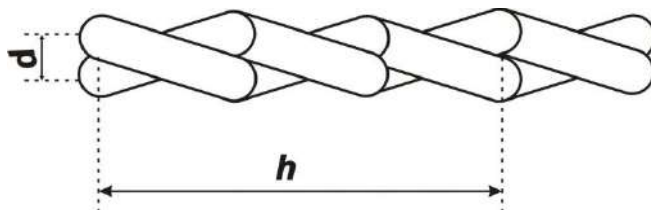


Рисунок 2 – Расчетная модель витой пары для определения коэффициента укрутки

Результаты расчета коэффициента укрутки приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Расчетные значения коэффициента укрутки отдельных витых пар

Цвет пары	Коэффициент укрутки
Оранжевая	1,131
Синяя	1,098
Зеленая	1,067
Коричневая	1,049

Сопротивление по постоянному току провода из чистой электротехнической меди с удельным сопротивлением $\rho = 0,0175$ Ом·мм²/м и диаметром $d = 0,57$ мм составляет $R_0 = 66,62$ Ом/км [3]:

Результаты вычислений R с учетом коэффициента укрутки витых пар приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Активное сопротивление цепи, 10³ Ом/км

f , МГц	1	20	100	250
Оранжевый	0,422	1,79	3,98	6,28
Синий	0,409	1,74	3,86	6,10
Зеленый	0,397	1,69	3,75	5,93
Коричневый	0,391	1,66	3,69	5,83

При определении индуктивности симметричной кабельной цепи принимается во внимание внутренняя $L_{вн}$ и межпроводная $L_{мп}$ составляющие [5]:

$$L = k_y \left[4 \ln \left(\frac{a-r_0}{r_0} \right) + Q(kr_0) \right] \cdot 10^{-4}, \frac{\text{Гн}}{\text{км}}. \quad (9)$$

Результаты вычислений L приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Индуктивность, мкГн/км

<i>f</i> , МГц	1	20	100	250
Оранжевый	799,8	726,9	715,7	712,8
Синий	776,5	705,6	694,8	691,6
Зеленый	754,6	684,6	675,2	672,0
Коричневый	741,9	673,2	663,8	660,6

Кабель категории 6 со структурой U/UTP (от англ. unfoiled twisted pair – неэкранированная витая пара) может быть реализован по трем основным схемам, как показано на рисунке 3.

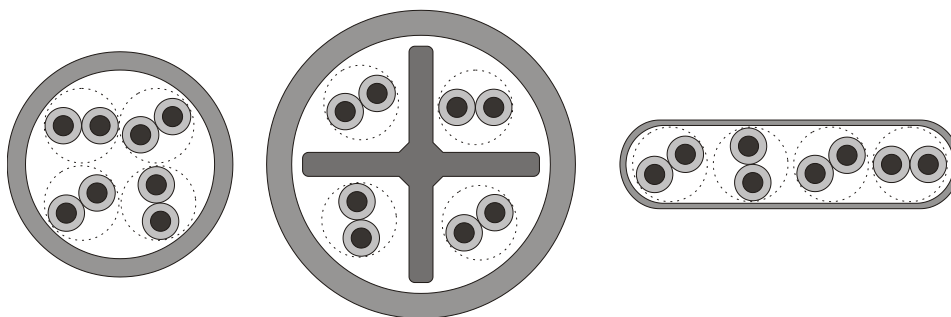


Рисунок 3 – Варианты реализации 4-парных LAN-кабелей категории 6:

а) классическая конструкция; б) 4-камерная конструкция на основе звездообразного сепаратора; в) рядная структура

Плоские структуры с улучшенными параметрами влияния в обычном и суммарном вариантах не получили широкого распространения из-за неудобства прокладки и неэкономичного использования рабочего пространства кабельных каналов.

Основным видом исполнения линейных кабельных изделий являются круглые кабели с сепаратором витых пар, Рисунок 3б. Форма исполнения сепаратора может быть самой различной [6], но на практике наибольшее распространение получили звездообразные варианты этого элемента кабельного сердечника.

Наличие сепаратора эффективно уменьшает электромагнитную связь отдельных пар, которая проявляется в конструкциях Рисунок 3а. С целью упрощения монтажных работ обычно используется свободная укладка витых пар в камерах сердечника. С точки зрения дальнейшего рассмотрения данная конструктивная особенность важна тем, что ее наличие

- уменьшает коэффициент электромагнитной связи между парами до уровня, позволяющего обеспечить заданные качественные показатели по параметрам влияния;
- делает ненужным учет влияния диэлектрика самого сепаратора, соседних

пар и оболочки на первичные и большинство вторичных параметров.

Одновременно анализируемый LAN-кабель имеет небольшое количество пар и не содержит экрана. Совокупность этих обстоятельств сопровождается тем, что ёмкость симметричной кабельной цепи определяется [7]:

$$C = \frac{k_y \varepsilon_r}{36 \ln \frac{a-r}{r}} \text{ нФ/100 м.} \quad (10)$$

Результаты расчета представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Ёмкость, нФ/100 м

Цвет пары	Оранжевый	Синий	Зеленый	Коричневый
Ёмкость C	5,75	5,59	5,43	5,34

Проводимость симметричной кабельной цепи определяется по формуле [7]:

$$G = \frac{1}{R_{из}} + \omega C t g \delta, \quad (11)$$

где $R_{из}$ – сопротивление изоляции кабельной цепи, $t g \delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь, который приведён в таблице 6, $\omega = 2\pi f$ – круговая частота.

В таблице 6 приведены значения тангенса угла диэлектрических потерь для применяемого типа изоляции – полиэтилена.

Таблица 6 – Тангенс угла диэлектрических потерь для полиэтилена

f , МГц	1	20	100	250
$t g \delta$	$6 \cdot 10^{-6}$	$200 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$2,4 \cdot 10^{-3}$

Результаты вычислений G приведены в таблице 7.

Таблица 7 – Проводимость, мСм/км

f , МГц	1	20	100	250
Оранжевый	0,003	18,12	90,06	270,18
Синий	0,003	17,48	87,44	262,32
Зеленый	0,003	16,99	84,96	254,88
Коричневый	0,003	16,70	83,52	250,56

Вторичные параметры передачи

Первичные параметры дают возможность определить вторичные параметры симметричного электропроводного тракта. Среди их довольно длинного перечня в широкой инженерной практике наиболее востребованы волновое сопротивление и коэффициент затухания.

Волновое сопротивление симметричной цепи находится как [3,7]:

$$Z_B = \sqrt{L/C}.$$

Результаты вычислений Z_B приведены в таблице 8.

Таблица 8 – Волновое сопротивление, Ом

f , МГц	1	20	100	250
Оранжевая	105,608	100,677	99,899	99,699
Синяя	105,607	100,673	99,894	99,697
Зеленая	105,612	100,593	99,903	99,664
Коричневая	105,612	100,603	99,902	99,661

Коэффициент затухания сигнала в неэкранированной кабельной симметричной цепи составляет [8]:

$$a = \left[\frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}} + \frac{G}{2} \sqrt{\frac{L}{C}} \right] \cdot 8,69 \text{ дБ/100 м.}$$

Результаты вычислений коэффициента a приведены в таблице 9.

Таблица 9 – Коэффициент затухания, дБ/100 м

f , МГц	1	20	100	250
Оранжевый	1,734	8,51	21,20	39,06
Синий	1,683	8,27	20,58	37,95
Зеленый	1,633	8,04	19,98	36,88
Коричневый	1,609	7,90	19,66	36,26

Отдельно укажем на то, что во всем рабочем частотном диапазоне кабелей категории 6 выполняется условие $R/2Z_B \gg (G/2)/2$.

Выводы

1. Инженерный расчет первичных параметров витых пар LAN-кабелей категории 6 должен проводиться по модели высоких частот.

2. Волновое сопротивление витой пары заметно отличается от номинального 100-омного значения в нижней части рабочего частотного диапазона (1 – 10 МГц), что приводит к значимому рассогласованию с выходом/входом передатчика/приемника сетевого интерфейса и сопровождается появлением дополнительных потерь, которые снижают пропускную способность линии и должны быть скомпенсированы ужесточением норм по ее предельной протяженности.

3. Во всем рабочем частотном диапазоне LAN-кабелей категории 6 проводимость изоляции определяется исключительно ее реактивной составляющей.

4. Основным направлением снижения коэффициента затухания является уменьшение потерь в металле жилы.

5. С учетом принятого в стандартах принципа нормирования параметров линейной части физического уровня информационных систем по

наиболее «слабому звену», компонентная оптимизация характеристик симметричного LAN-кабеля должна осуществляться в направлении улучшения характеристик витой пары с минимальным шагом скрутки.

Литература

1. Семенов А.Б., Королев Р.Н. Горизонтальные кабели с расширенным частотным диапазоном // Журнал сетевых решений LAN. 2017. № 1-2. С. 43-46.
2. Семенов А.Б., Кандзюба Е.В., Руденко В.И. «Длинный» Ethernet становится еще длиннее // Первая миля. 2017. № 2 (63). С. 42-48.
3. Аббасова Т.С., Артюшенко В.М. Электромагнитная совместимость электропроводных кабелей и коммутационного оборудования высокоскоростных структурированных кабельных систем // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2008. №4. Т. 4. С. 22-29.
4. Семенов А.Б. Классические структурированные кабельные системы // М.: Горячая линия – Телеком. 2016. 462 с.
5. Портнов Э.Л., Зубилевич А.Л. Электрические кабели связи и их монтаж: Учебное пособие для вузов // М: Горячая линия – Телеком. 2005. 264 с.
6. Семенов А.Б. Сепараторы витых пар LAN-кабелей // Вестник связи. 2014. № 9. С. 39-41.
7. Андреев В.А., Портнов Э.Л., Кочановский Л.Н. Направляющие системы электросвязи: Учебник для вузов. Том.1 – Теория передачи и влияния 7-е изд. // М.: Горячая линия – Телеком. 2009. 424 с.
8. Зубилевич А.Л. Здесь готовят связистов-линейщиков // Кабель-news. 2013. № 3. С.48-50.

УДК 621.398

Искусственный интеллект в технологии облачных вычислений

Н.П. Сидорова, кандидат технических наук, доцент кафедры «Информационные технологии

и управляющие системы»,

Ю.Ю. Сидоров, аспирант кафедры «Информационные технологии и управляющие системы»,

Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Московской области

«Технологический университет», г. Королев, Московская область

В статье рассмотрены вопросы развития технологии облачных вычислений. Выделено применение методов искусственного интеллекта как основное направление развития облачных технологий. Приведен обзор интеллектуальных облачных сервисов.

Облачные вычисления, искусственный интеллект, машинное обучение.

Service-oriented analysis and design of corporate information systems

N.P. Sidorova, candidate of technical Sciences, Associate Professor, Department of information technology and system management,

Yu. Sidorov, graduate of the Department Of Information technology and management systems,

State Educational Institution of Higher Education

Moscow Region «University of technology», Korolev, Moscow region

The article deals with the development of cloud computing technology. The application of artificial intelligence methods as the main direction of development of cloud technologies is singled out. An overview of intelligent cloud services is given.

Cloud Computing, Artificial Intelligence, Machine Learning.

Введение

Технологический прогресс и состояние современной экономики вывели на новый уровень решение задач развития бизнеса. Как показывают исследования [9], все больше организаций и предприятий в России проявляют интерес к использованию облачных сервисов, которые становятся важным инструментом развития бизнеса. Поэтому важно рассмотреть и оценить тенденции развития этого вида информационных технологий.

Модели использования облачных вычислений

Облачные вычисления (Cloud computing) являются технологией удаленного доступа к различным ресурсам (вычислительным, информационным, программным), которые реализованы на распределенных вычислительных сетях,

обладающих большими вычислительными мощностями. Они обеспечивают предоставление масштабируемых вычислительных ресурсов в виде сервиса Интернет. В зависимости от способа использования различают несколько моделей облачных технологий [6, 10,11]: сервис как услуга (SaaS), платформа как сервис (PaaS), инфраструктура как сервис (IaaS).

Модель SaaS характеризуется тем, что предоставляет пользователю готовый программный продукт (сервис), который пользователь может использовать для решения своей задачи. Самым распространенным примером использования такого сервиса является работа с электронной почтой. Модель SaaS широко применяется для решения задач управления проектами, организации системы электронного документооборота, управления взаимодействием с клиентами (CRM-системы), для организации дистанционного обучения и др. Пользователь осуществляет доступ к SaaS (рис. 1) через привычный web-интерфейс.

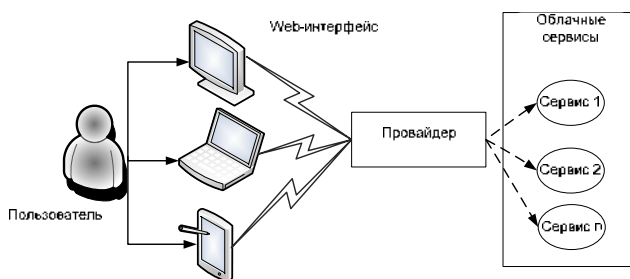


Рисунок 1 – Схема использования SaaS

Модель SaaS является наиболее распространенной. Её активно развивают отечественные разработчики. Согласно аналитическим исследованиям [8] ведущими поставщиками SaaS в России стали СКБ Контур, Softline, Манго Телеком (1), B2B-Center, Ай-Теко.

В модели PaaS пользователь может использовать программно-технологическую платформу (операционную систему, программные среды разработка и отладки программ, системы управления базами данных и др.) для разработки своих программ и программных систем. Важно отметить, что реализация модели PaaS возможна несколькими вариантами:

- без виртуализации (на физической машине),
- на виртуальной машине,
- в виде контейнера в многоарендной программной среде.

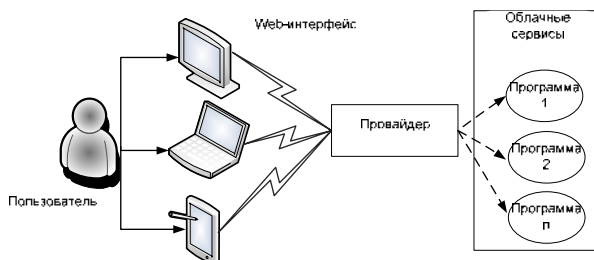


Рисунок 2 – Схема использования PaaS

Пользователями облачных технологий на основе модели PaaS являются, как правило, разработчики программных продуктов. Эта модель позволяет им быстрее разработать, протестировать и вывести на рынок новый программный продукт.

В настоящее время существует несколько предложений по развертыванию модели PaaS в облачной среде. Такие платформы предоставляют компании Oracle (Oracle Cloud Platform) [1, 3, 4, 5, 12, 13], Amazon (Amazon Web services), IBM (IBM Smart Cloud), Google (Google App Engine), Microsoft (Windows Azure).

Модель IaaS предлагает пользователям вычислительную инфраструктуру, которая включает серверы, операционные системы, сети, средства для хранения данных. Она позволяет реализовывать программные решения в инфраструктуре поставщика услуг. Такая модель позволяет организовать такую инфраструктуру для развертывания программных систем компании, которая обеспечивает оптимальную конфигурацию используемых ресурсов при разных нагрузках, повышает надежность, позволяет использовать самое современное оборудование. Основными пользователями такой модели облачных вычислений являются, как правило, ИТ-службы предприятий и организаций. Платформы для реализации IaaS предлагают различные компании, в том числе российские [8]: ИД-Град, DataLine, Крок, Softline, Ай-Теко и др.

Применение облачных технологий уже доказала свою состоятельность и позволяет существенно снизить расходы на содержание ИТ-инфраструктуры, ускорить внедрение новых программных разработок, упростить задачи модернизации имеющегося программного обеспечения и многое другое.

Переход на технологии облачных вычислений является мировым трендом развития информационных технологий. На основе прогноза, сделанного аналитической компанией Gartner, приведенной в [2], рынок облачных вычислений будет показывать устойчивый рост (рис. 3).

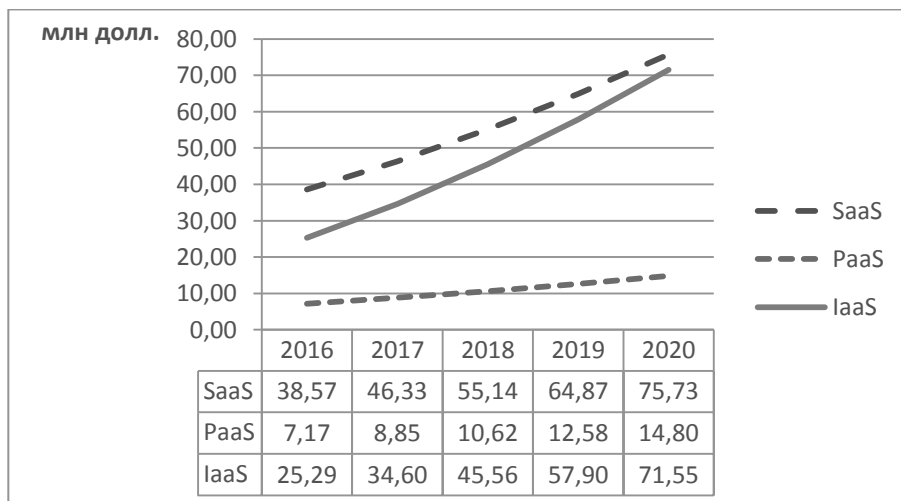


Рисунок 3 – Прогноз компании Gartner развития рынка облачных услуг

Особое значение развитие облачных технологий играет в реализации

государственной программы «Цифровая экономика Российской Федерации». По данным аналитического центра TAdviser [9] около 60% организаций в настоящее время используют облачные сервисы. В основном используется модель SaaS. Так согласно данным, приведенным в [14] 63,4% облачных технологий в России приходится на использование SaaS, 28,3% - IaaS, 8,3% - PaaS (рис. 4).

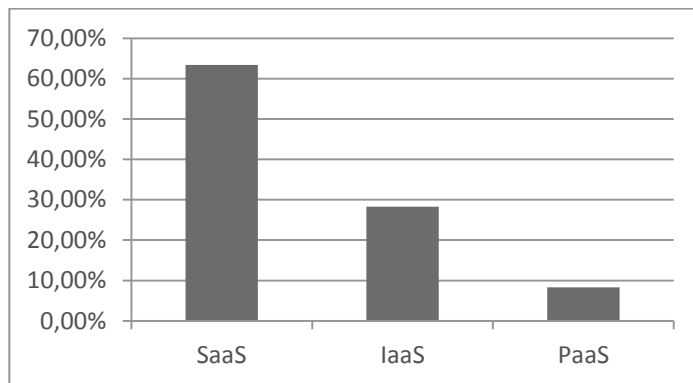


Рисунок 4 – Рынок облачных технологий России в 2017г.

По прогнозам аналитического центра TAdviser (рис. 5) рынок SaaS в России будет развиваться более высокими темпами в отличии от мировой тенденции, которая предполагает более быстрый рост IaaS.



Источник: Исследование Forrester Russia 2017 по заказу SAP

Рисунок 5 – Прогноз российского рынка облачных услуг (материалы сайта <http://www.tadviser.ru/>)

Роль методов искусственного интеллекта в развитии облачных вычислений

Искусственный интеллект (Artificial Intelligence) определяет область исследований, которая изучает принципы интеллектуальной деятельности человека и создает на этой основе модели интеллектуального поведения искусственных, в том числе, программных систем. Его становление связано не в последнюю очередь с развитием информационных технологий. Эмпирический тест, определяющий принадлежность искусственной системы к системам

искусственного интеллекта, был предложен еще в 50-х годах XX века Аланом Тьюрингом.

Задачи, решаемые искусственным интеллектом, предполагают не столько проведения сложных вычислений, сколько логико-информационную обработку информации для решения сложных слабо формализованных задач. К настоящему времени нет точного перечня таких задач, да и вряд ли возможно его составление. Однако к ним, безусловно, относят:

- представление и обработку знаний,
- распознавание речи и системы общения,
- машинное обучение,
- распознавание образов.

Решение этих задач осуществляется в рамках привычных нам программных систем, таких как экспертные системы, системы виртуальной реальности, нейросетевые системы и др.

В настоящее время происходит соединение технологий искусственного интеллекта и облачных вычислений. Оно касается, прежде всего, следующих направлений:

- машинное обучение,
- когнитивные вычисления,
- чат-боты,
- виртуальная реальность,
- распознавание образов.

Машинное обучение (Machine Learning) связано с разработкой и использованием методов разработки программных систем, способных обучаться. Для решения этого класса задач используются, как правило, методы математической статистики, методы оптимизации, методы теории алгоритмов. Методы машинного обучения предполагает не столько решение какого-то класса задач, а направлены на разработку именно методов обучения, которые могут быть применены в различных условиях. Например, при решении задачи распознавания спама.

Когнитивные вычисления были предложены компанией IBM [5] для определения систем, которые не заменяют человека при решении интеллектуальной задачи, а дополняют его возможности. Например, при определении диагноза пациенту, при выборе финансовых инструментов и др. По своей сути это сервисы, реализующие экспертные системы.

Чат-боты представляют собой отдельный вид сервисов, которые [7] могут поддерживать общение с человеком на естественном языке и имитируют поведение человека при таком общении. Они позволяют получить ответы на часто задаваемые вопросы, организовывать работу с другими сервисами, например, с сервисами «умного дома», организовывать работу в социальных сетях и др. Они находят применение в системах обслуживания заказов, службах доставки, службы технической поддержки и прочее.

Виртуальная реальность представляет собой особый вид программных систем, которые позволяют получить трехмерную модель некоторой среды. В эту среду виртуально помещается человек. Находясь в ней, он может действовать привычным для образом с помощью жестов, речи, движения. Работа с системами виртуальной реальности включает решение нескольких задач: распознавание

образов, сервис речи, голосовую настройку, генерация изображения и др.

Распознавание образов относится к задачам классификации объектов по нескольким признакам. Сервисы распознавания образов используются как составная часть других интеллектуальных сервисов, таких как виртуальная реальность. Они применяются в системах обеспечения безопасности, медицине, в системах документооборота и др.

Согласно исследованиям, проведенным аналитической компанией Gartner, лидерами в развитии облачных технологий являются Amazon Web Services, Microsoft, Google, Oracle, IBM, Alibaba Cloud. Каждый из этих разработчиков определяет применение интеллектуальных технологий как главный вектор развития своих облачных технологий.

Интеллектуальные сервисы в технологии облачных вычислений сегодня развиваются в виде двух моделей: облачные сервисы в модели SaaS и облачные платформы в модели PaaS на основе предлагаемого программного обеспечения, использующего методы искусственного интеллекта.

Интеллектуальные облачные сервисы на основе модели SaaS предлагают Amazon Amazon Web Services, которые позволяют решать задачи распознавания образов (AWS DeepLens), распознавания речи (Amazon Transcribe), автоматического перевода (Amazon Translate).

Компания Google развивает технологию машинного обучения для решения задач распознавания изображений, распознавания речи. Новая технология машинного обучения (Learning Cloud Machine) при помощи сервисов искусственного интеллекта обрабатывает данные, которые пользователь хранит в облачной системе Google. В частности, клиентам доступны системы распознавания лиц и объектов на фото из Google Photos, голосового поиска в Google и определитель голосовых команд в смартфонах Android

Предложения Oracle в модели SaaS [12] затрагивают развитие облачной платформы Oracle Cloud и платформы для мобильных приложений Oracle Mobile Cloud. Облачные сервисы платформы Oracle Cloud предоставляют сервисы для ведения CRM-системы (Oracle Fusion CRM Cloud Service), повышение эффекта от использования CX-, ERP-, SCM-систем за счет включения механизмов интеллектуальной обработки данных. Эти сервисы, получившие в компании название Adaptive Intelligent Applications, базируются на применении облачного хранилища, содержащего огромный объем данных (Oracle Adaptive Intelligent Applications for ERP, Oracle Adaptive Intelligent Applications for CX, Oracle Adaptive Intelligent Applications for SCM). Их использование основывается на применении интеллектуальных технологий обработки данных и обеспечивает проведение глубокого анализа, который помогает улучшить результаты работы компаний.

Платформа Oracle Mobile Cloud развивает сервисы чат-ботов с технологией искусственного интеллекта, сервисы аналитики. Развитие этой платформы базируется на применении методов машинного обучения, когнитивных вычислений, глубокого машинного обучения.

Компания IBM [3, 5] предлагает платформу IBM Watson и готовые сервисы на её основе для анализа текстов на естественном языке (Watson Speech to Text, Watson Language Translator, Watson Natural Language Understanding), которые могут применены как отдельные сервисы в модели SaaS, так и внедрены

в собственные программные продукты в модели PaaS. Особое внимание компания уделяет развитию когнитивных вычислений.

Интеллектуальные облачные сервисы на основе модели PaaS предлагают облачную платформу с набором готовых программных решений, которые могут быть встроены в программные системы пользователя.

Так компания Microsoft [8, 13] на основе развития облачных технологий в рамках платформы Azure развивает сервисы, реализующие методы машинного обучения и работы с глубокими нейронными сетями (Project Brainwave), сервисы распознавания речи (Azure Cognitive Services), сервисы распознавания изображений (Custom Vision). Все это позволяет рассматривать платформу Azure как модель PaaS для разработки интеллектуальных приложений.

В компании Amazon Web Services [4] разработаны сервисы для анализа прогнозов, использующие технологии машинного обучения для решения задач анализа для сбора и анализа данных, машинное обучение (Apache MXNet AWS), сервисы для разработки систем искусственного интеллекта (TensorFlow AWS).

Компания Oracle [12] реализует сервис облачной базы данных (Oracle Database Cloud Service), которая по праву считается лидером на рынке СУБД. Для разработки своих облачных решений компания предлагает платформу Oracle Java Cloud Service, в которой также реализованы методы искусственного интеллекта для решения задач прогнозирования и устранения угрозы безопасности (Oracle Identity Security Operations Center) и управления производительностью (Oracle Management Cloud) на основе интеллектуального анализа данных систем безопасности.

Выводы

В статье рассмотрены модели применения облачных сервисов, которые во многом определяют возможные сферы их использования и группы пользователей. Рассмотренные тенденции развития облачных технологий определяют перспективу их развития на основе широкого применения методов искусственного интеллекта. Имеющиеся предложения на рынке облачных сервисов показывают, что все активные разработчики облачных услуг связывают развитие своих продуктов с их интеллектуализацией.

Литература

1. Cloud AI. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://cloud.google.com/products/> (дата обращения 30.05.2018).
2. ECM-journal. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://ecm-journal.ru/post/>(дата обращения 25.05.2018).
3. Product documentation for Cloud. [Электронный ресурс]. Режим: <https://www.ibm.com/support/knowledgecenter/ru/> (дата обращения 25.05.2018).
4. AWS и облачные вычисления. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://aws.amazon.com/ru/> (дата обращения 30.05.2018).
5. Облачные сервисы 2017. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.cnews.ru/reviews/cloud2017/> (дата обращения 25.05.2018).
6. Когнитивные системы IBM. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.ibm.com/cognitive/ru-ru/> (дата обращения 30.05.2018).
7. Исаева Г.Н., Логачева Н.В. Облачные технологии в современном образовании // Эволюционные процессы информационных технологий / сборник трудов по

- материалам II межвузовской научно-технической конференции под ред. В.М. Артюшенко // М.: «Научный консультант». 2017. С.21-26.
8. Логачева Н.В., Сидорова Н.П., Польшин С.Н. Возможности и перспективы чат-ботов // Информационные технологии. Эволюционные процессы / Сборник научных статей под ред. д.т.н. В.М. Артюшенко // М.: «Научный консультант». 2018. С. 108-115.
 9. Облачные сервисы 2017. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.cnews.ru/reviews/cloud2017/> (дата обращения 25.05.2018).
 10. Облачные сервисы (рынок России). [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.tadviser.ru/> (дата обращения 25.05.2018).
 11. Сидорова Н.П. Создание единого информационного пространства вузов на основе облачных сервисов // Перспективы, организационные формы и эффективность развития сотрудничества российских и зарубежных вузов / сборник // Королев МО: «Алькор-Публишерс». Технологический университет. 2015. С. 285-288.
 12. Стреналюк Ю.В. Облачные технологии в банковских информационных системах // Современные информационные технологии / сборник трудов по материалам межвузовской научно-теоретической конференции МГОТУ под научн. ред. В.М. Артюшенко. 2015. С 23-32.
 13. Обзор Oracle Cloud. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.oracle.com/ru/cloud/> (дата обращения 30.05.2018).
 14. Решения Azure. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://azure.microsoft.com/ru-ru/> (дата обращения 25.05.2018).
 15. Цифровая экономика и ИКТ политика в странах Евразии. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://digital.report> (дата обращения 25.05.2018).

УДК 621.385:06

Влияние информационных технологий на развитие медицины

Е.С. Харламова, ведущий инженер,
Государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования Московской области
«Технологический университет», г. Королев, Московская область

Дан обзор мобильных устройств и беспроводных технологий, применяемых сегодня в медицине развитых стран по двум основным направлениям: лечение и уход за пациентами и поддержание здорового образа жизни человека. Обозначены тенденции дальнейшего развития мобильных технологий в медицине. Показана роль искусственного интеллекта в лечении больных на современном этапе и в будущем. Выявлены проблемы, тормозящие дальнейшее развитие искусственного интеллекта в медицине. Указано на возможность применения мобильных технологий здравоохранения к стареющей части населения планеты для решения проблем, связанных с повышением пенсионного возраста. Описаны направления современной телемедицины как одного из способов решения вопроса увеличения продолжительности жизни. Особое внимание уделено 3D-печати человеческих органов при помощи биопринтера. Перечислены новые профессии на стыке медицины и компьютерных технологий, которые должны появиться в будущем для внедрения IT-технологий в традиционную медицину. Намечены основные направления развития медицины будущего.

Информационные технологии, мобильное здравоохранение, искусственный интеллект, телемедицина, биопринтеры.

The influence of information technology on the development of medicine

E.S. Kharlamova, leading engineer,
State Educational Institution of Higher Education
Moscow Region «University of technology», Korolev, Moscow region

The review of mobile devices and wireless technologies used today in medicine developed countries in two main areas: treatment and care for patients and maintaining a healthy lifestyle. Tendencies of the further development of mobile technologies in medicine are indicated. The role of artificial intelligence in the treatment of patients at the present stage and in the future is shown. Problems that inhibit the further development of artificial intelligence in medicine are identified. It is indicated that mobile health technologies can be applied to the aging part of the world's population to solve the problems associated with raising the retirement age. The directions of modern telemedicine are described as one of the ways to solve the issue of increasing life expectancy. Particular attention is paid to 3D printing of human organs with the help of a bioprinter. New professions are listed at the intersection of medicine and computer technologies, which should appear in the future

for the introduction of IT technologies into traditional medicine. The main directions of future medicine development are outlined.

Information technology, mobile healthcare, artificial intelligence, telemedicine, bioprinters.

Введение. Нашествие компьютерных технологий на медицину сегодня очевидно для любого, кто пользуется услугами поликлиник. Запись к врачу – через Интернет. Персональные компьютеры есть практически во всех врачебных кабинетах, благодаря чему в медучреждениях улучшилась доступность медицинской информации и скорость её предоставления медработникам. Хотя более половины медицинских документов существует пока только на бумажном носителе, в будущем запланировано перевести их в электронный формат. Человеческий фактор, как водится, тормозит наступление светлого будущего. Врачи и медсёстры недостаточно хорошо владеют навыками работы на ПК и не готовы к массовому и систематизированному применению компьютерных технологий в медицине. Несмотря на сложности с финансированием и отсутствием курсов для обучения медработников работе с ПК, эта проблема всё равно решится, рано или поздно. Наступление эры компьютерных технологий в медицине неотвратимо и неизбежно, как восход солнца по утрам.

Актуальность. Повышение качества и продолжительности жизни человека – эта задача включена в список приоритетных по развитию отечественной медицины до 2030 года.

Цель работы: выявление изменений в качестве медицинских услуг всвязи с информатизацией медицинской отрасли.

Задачи:

- Изучить по литературным источникам современные проблемы традиционной медицины и основные направления развития мобильного здравоохранения;
- Выявить изменения, которые привнесли в медицину IT-технологии;
- Исследовать проблемы, возникающие всвязи с применением IT-технологий в медицине;
- Определить возможные последствия применения IT-технологий в медицине.

Основная часть.

Проблемы медицины на сегодняшний день и в нашей стране можно отобразить несколькими основными пунктами:

- быстро попасть на приём к нужному специалисту, а также без лишней волокиты пройти все необходимые обследования, назначенные эскулапами, не всегда получается;
- не хватает опытных врачей в поликлиниках и больницах, а также просто не хватает врачей и медицинского персонала любого качества (двери практически всех лечебных учреждений сегодня украшают объявления типа: требуются на работу, далее идёт весьма пространный список специалистов с высшим медицинским образованием), также постоянно требуются медсёстры и санитарки);
- в отдалённых регионах нашей необъятной Родины с качественным

лечением и наличием квалифицированного персонала дела обстоят ещё хуже.

Мобильные технологии приходят на помощь.

Мобильные приложения для диагностики на смартфонах, хирургические роботы, ручные ультразвуковые аппараты, облачные медицинские базы данных – это уже сегодняшний день медицины развитых стран. Мобильные технологии [1] дают людям возможность самостоятельно следить за своим здоровьем. Мобильные устройства и беспроводные технологии в целях обеспечения здоровья сегодня бурно развиваются по двум направлениям:

- 1) лечение и уход за пациентами;
- 2) поддержание здорового образа жизни человека.

На рисунке 1 представлена схема мобильного здравоохранения по обоим направлениям.

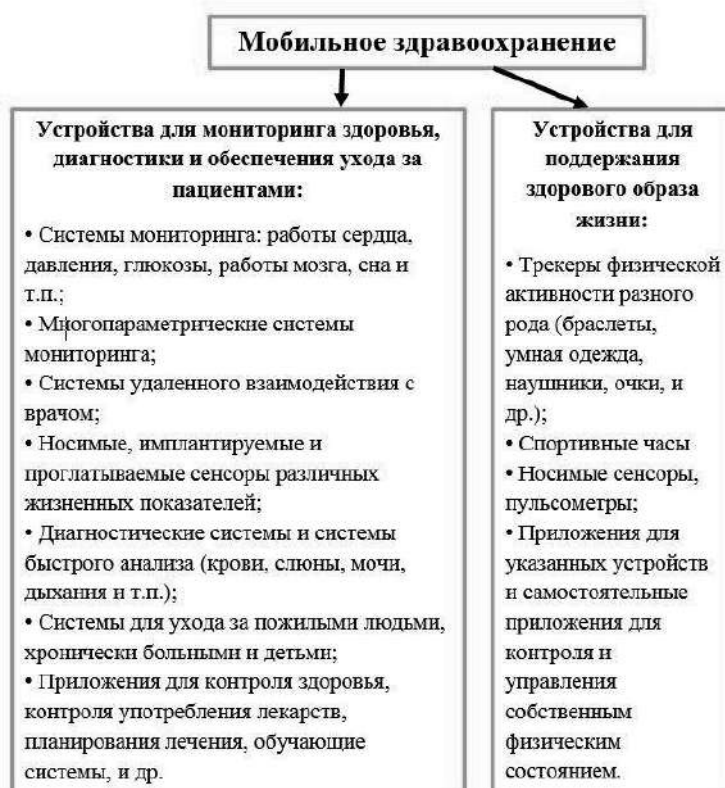


Рисунок 1 – Направления развития мобильного здравоохранения

Сегодня в мире уже разработаны тысячи мобильных приложений, которые позволяют определить остроту зрения (рисунок 2) и выдать рецепт на очки, если таковые понадобятся, снять ЭКГ (рисунок 3), измерить артериальное давление, даже проверить купленные в аптеке лекарства на предмет их подлинности.



Рисунок 2 – Проверка остроты зрения с помощью смартфона



Рисунок 3 – Снятие ЭКГ с помощью смартфона

Устройства контроля физической активности и физического состояния относятся ко второму направлению мобильного здравоохранения, которое сегодня по темпам развития опережает первое. Для лечения больных людей новые продукты и услуги обретают право на существование после многочисленных испытаний, клинических исследований и согласований по различным инстанциям. К фитнес-устройствам предъявляются менее строгие требования, поэтому им найти дорогу к покупателю легче.

Трекерами физической активности (рисунок 4) пользуются не только спортсмены, но и обычные люди, например, офисные работники. Всех их объединяет стремление к здоровому образу жизни, желание лично контролировать своё физическое состояние. Трекеры осуществляют не только функцию контроля образа жизни владельца (сон, питание, физическая

активность), но и функцию коррекции, которая соответствует современным представлениям о здоровье человека. На смартфон или планшет скачивается приложение для выбранного девайса. При активации приложение запрашивает рост, вес, возраст владельца, анализирует введённые данные и предоставит пользователю статистические данные активности людей с похожими параметрами.



Рисунок 4 – Трекер физической активности, внешний вид

Ожидается, что для дальнейшего развития мобильного здравоохранения [3] будут характерны следующие тенденции: быстрее, меньше, дешевле, качественнее.

Быстрее. Пациенты могут выбирать между посещением врача и онлайн-консультацией. Для онлайн-консультации по видеоканалу отправляются необходимые медицинские показатели с мобильных устройств пациентов.

Меньше. Сегодня видеочамера настолько уменьшилась в размерах, что теперь её можно вставить в капсулу, а капсулу проглотить. Электрокардиостимуляторы программируются с мобильного телефона, к смартфону также можно подключить лабораторию по анализу крови, глюкометр, цифровой стетоскоп. Искусственный интеллект врача можно интегрировать в мобильное устройство, таким образом, у любого владельца смартфона появится персональный медицинский ассистент, который будет в режиме реального времени решать вопросы, связанные со здоровьем конкретного человека.

Дешевле. С начала прошлого века чётко прослеживается основная тенденция развития медицины: она всё больше становится превентивной. Болезнь легче предупредить, чем потом её лечить с переменным успехом или без него. Мобильные технологии помогут выявлять заболевания на самой ранней стадии, что, возможно, предотвратит их развитие и сократит затраты на лечение. Развитие сетей сотовой связи и широкое распространение смартфонов позволит с помощью мобильных технологий стать современной медицине более доступной для небогатых слоёв населения, которые преобладают над богатыми в

соотношении 8:1 по одним оценкам и 9:1 – по альтернативным.

Качественнее. Медицина станет более доступной в отдаленных регионах и там, где нет квалифицированного персонала. На помощь придёт искусственный интеллект и роботы, например, в местах ведения боевых действий. Роботы могут выносить раненых солдат с поля боя. Но этим спектр их возможностей не ограничивается [6]. На рисунке 5 изображён хирургический робот. Обычно роботы являются лишь ассистентами на хирургической операции, выполняя строго определённый набор действий. В будущем роботов научат делать операции самостоятельно. Уже сегодня известен случай, когда раненый солдат был диагностирован и прооперирован роботом прямо на поле боя.

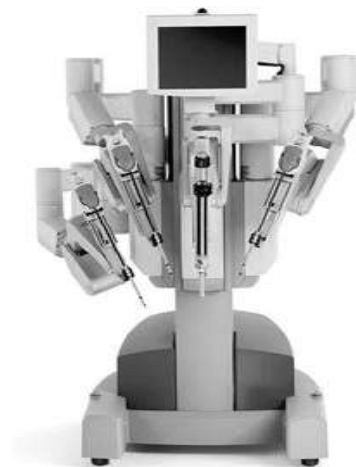


Рисунок 5 – Хирургический робот, внешний вид

Искусственный интеллект (ИИ) – ещё один помощник в лечении больных [2]. Врач не всегда может правильно диагностировать заболевание. Причинами могут явиться, например, недостаток профессионального опыта или редкость заболевания, с которым пришлось столкнуться медику. ИИ откроет доступ к тысячам историй болезней, научной литературе по нужной тематике, проанализирует случаи похожих заболеваний и даже предложит план лечения, мало того, обеспечит индивидуальный подход на основании предыдущих историй болезней пациента и сведений о его генетических особенностях.

На современном этапе развития медицины ИИ не может заменить врача, он – лишь полезный инструмент в деле диагностики и лечения. Но проблем у искусственного интеллекта хватает уже сейчас. Пресловутая боязнь восстания машин сидит глубоко внутри человека ещё с давних времён. Она-то и мешает нашим современным и высокообразованным врачам брать на вооружение такую замечательную новую технологию, как ИИ. У чиновников от медицины всех стран мира особенно ярко проявляются признаки этой не поддающейся лечению болезни в виде как необоснованных страхов, так и вполне реальных опасений утраты контроля за личными данными пациентов. Ведь личные данные могут попасть в руки страховых компаний или работодателей, и последние, кто бы сомневался, постараются использовать полученные сведения в своих корыстных целях. Также информационная безопасность ИИ-систем оставляет желать

лучшего, что наводит на мысли об удалённых взломах кардиостимуляторов, выдаче диагностическими системами неправильных рекомендаций по лечению вплоть до намеренного

предложения пациентам смертельно опасных лекарств и/или процедур. И с кого за всё это потом спрашивать – с врача, клиники, разработчика ИИ или же специалиста по информационной безопасности? Не найдя вразумительного ответа на этот актуальнейший вопрос нашего времени, чиновники одной рукой голосуют за новые технологии, а другой рукой пишут подзаконные акты, тормозящие развитие ИИ в медицине.

Киберпреступность и кибертерроризм – не единственные проблемы ИИ. В развитых странах уже нарисовалась проблема сокращения рабочих мест в медицине из-за внедрения интеллектуальных систем. Как вы понимаете, медикам нашей страны пока ничего не угрожает. ИИ придётся кстати для решения отечественных проблем медицинского обслуживания населения. А санитарок можно заменить роботами-уборщиками.

В основных направлениях развития отечественной медицины до 2030 года [5] много внимания уделяется повышению качества и продолжительности жизни человека. Увеличение продолжительности жизни уже сегодня породило новую группу заболеваний, связанных со старением населения. Именно этой группе пациентов понадобится удалённая диагностика и онлайн-консультации в первую очередь. В дальнейшем спрос на методы удалённой диагностики и контроля будет расти, потому что будет увеличиваться число старых людей, а от состояния здоровья стареющего человечества зависит, каким будет будущее нашей цивилизации. Продлить не только жизнь, но и здоровье – главный лозунг момента. В противном случае работоспособная часть населения не в силах будет обеспечить пожилых людей достойными пенсиями и надлежащим медицинским обслуживанием. Общество с увеличивающейся продолжительностью жизни ждёт изменение пенсионной политики, пересмотр границ пенсионного возраста, развитие переквалификации и обучения пожилых людей. Предполагается, что последние благодаря более качественному здравоохранению должны оказаться в силах зарабатывать себе на жизнь сами и не надеяться на пенсии.

Телемедицина [7] также призвана помочь решению наметившейся как у нас, так и во всех развитых странах мира проблеме увеличения продолжительности жизни. Направления телемедицины схематично изображены на рисунке 6.



Рисунок 6 – Направления современной телемедицины

Трансляция хирургических операций в режиме онлайн с помощью веб-камер даёт возможность опытным врачам контролировать ход операции, проводимой начинающим хирургом. Через дистанционные семинары, лекции и конференции проводится **телеобучение** молодых специалистов. Режим двусторонней связи или телеконференции позволяет проводить профессиональные **телемедицинские консультации** лучших специалистов. С помощью **домашней телемедицины** можно получать лечение, не выходя из дома. Схема общения с врачами в этом случае показана на рисунке 7.



Рисунок 7 – Схема проведения лечения

Больному, выбравшему такой способ лечения (как правило, это люди, нуждающиеся в периодических обследованиях), понадобится подключенное к компьютеру специальное оборудование, способное собирать и передавать врачам с помощью видеоконференцсвязи всю необходимую информацию: температура тела, давление, пульс и т.п.

Примерно по такой же схеме функционирует **дистанционный биомониторинг**. Он используется для работы с людьми в возрасте, не способными к самостоятельным действиям.

В местах аварий и чрезвычайных происшествий будут задействованы **мобильные телемедицинские комплексы**, основу которых составляет современный высокопроизводительный компьютер, подключаемый к различному медицинскому оборудованию и устройствам беспроводной связи.

Стремление к повышению качества и продолжительности жизни человека ставит перед медиками ещё одну проблему: пациент должен иметь возможность компенсировать утраченный орган. Сегодня людям приходится

проводить многие месяцы и даже годы в ожидании подходящего органа от подходящего донора. Заметим, далеко не все дожидаются операции. 3D-печать человеческих органов при помощи биопринтера призвана разрулить эту непростую ситуацию.

Биопринтер работает также, как обычный 3D-принтер, т.е. аналогично струйному (рисунок 8). Пока успехи органопечатания не очень впечатляют. Но в перспективе у этого занятия большое будущее: печень, почки, сердце – всё это можно будет получить искусственным путём для нужд больных пациентов. Ожидается, что через 5 лет 3D-принтер будет стоять в каждой больнице, через 15 – будет освоена технология печати внутри тела больного, что, по оценкам медиков, гораздо проще, чем печатать орган отдельно и затем с помощью сложных манипуляций помещать его внутрь.



Рисунок 8 – Биопринтер для печати человеческих органов, внешний вид

Головокружение от успехов медицины будущего сносит крышу уже сегодня. Вредные привычки вроде курения и распития спиртных напитков покажутся уже не такими вредными в свете возможности замены пострадавших внутренних органов (лёгкие, печень) на новые. А здоровый образ жизни поможет выжить тем, кому не хватит денег на трансплантацию обречённого органа. Такие вот проблемы этического характера поджидают нас в будущем.

Для внедрения IT -технологий в традиционную медицину одними курсами повышения квалификации медработников не обойтись. Должны появиться новые профессии [4] на стыке медицины и компьютерных технологий, такие как:

- **IT -медик** (создание программного обеспечения для лечебного и диагностического оборудования, а также баз физиологических данных);
- **Клинический биоинформатик** (при нестандартном течении болезни строит модель биохимических процессов болезни и выявляет нарушения на клеточном и субклеточном уровне, чтобы понять первопричины заболевания);
- **Оператор медицинских роботов** (программирует диагностических, лечебных и хирургических роботов);

- **IT -генетик** (занимается программированием генома под заданные параметры, в том числе, лечением наследственных заболеваний и других генетических проблем у детей);
- **Сетевой врач** (ставит диагнозы в онлайн-режиме, ориентирован на диагностику предболезней, профилактику).

Это далеко не полный перечень новых профессий, которые будут востребованы в медицине будущего уже через 15-20 лет. В первую очередь с помощью специалистов новых профессий будут реализовываться основные направления развития медицины будущего:

- персонализированная медицина;
- быстрый рост информационной базы;
- удаленная медицина: роботы телеприсутствия, удаленные хирургические роботы, приложения для диагностирования;
- искусственный интеллект;
- молекулярная и генетическая терапия для предотвращения и лечения болезней.

Выводы:

1. Использование мобильных технологий вряд ли полностью снимет проблему медицинских ошибок, но спрос на услуги мобильной медицины будет расти, так как численность населения и продолжительность жизни будут увеличиваются, и требования к качеству жизни будут повышаться;
2. Применение IT -технологий в медицине является перспективным в случаях:
 - нехватки либо некомпетентности медперсонала;
 - проживания пациента в географически удаленных регионах, сельской местности;
 - преклонного возраста либо ограниченных возможностей пациента;
 - нахождения пациента в замкнутых или организованных коллективах (тюрьмы, хосписы);
 - военной телемедицины (организация медицинской помощи в районах проведения боевых действий)
3. Помимо решения исключительно медицинских задач, применение информационных технологий в медицине способствует оптимизации управления учреждением здравоохранения;
4. Применение искусственного интеллекта в медицине возможно позволит в будущем перейти к сверхточной медицине, в результате чего появится возможность назначать индивидуальное лечение каждому отдельному человеку, учитывая его уникальные генетические и другие особенности.
5. Активному внедрению телемедицины препятствует отсутствие проработанной законодательной базы и стандартов оказания телемедицинских услуг, а также технологическая неготовность к повсеместному внедрению телемедицины в нашей стране.
6. Необходимо организовать в вузах обучение по новым специальностям и направлениям подготовки для освоения профессий медицины будущего.

Литература

1. mHealth – «мобильное» здравоохранение в современном мире [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://habrahabr.ru/company/medgadgets/blog/227159/> (дата обращения 06.07.2018).
2. Искусственный интеллект в медицине: главные тренды в мире [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://medaboutme.ru/zdorove/publikacii/stati/sovety_vracha/iskusstvennyu_intellekt_v_mediticine_glavnye_trendy_v_mire/?utm_source=copypaste&utm_medium=referral&utm_campaign=copypaste (дата обращения 06.07.2018).
3. Медицина + IT: что можно делать с данными [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://habrahabr.ru/company/digitaloctober/blog/137128/> (дата обращения 06.07.2018).
4. Медицина будущего: какие профессии будут востребованы [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://doctorpiter.ru/articles/11562/> (дата обращения 06.07.2018).
5. Прогноз научно-технологического развития России 2030 [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://prognoz2030.hse.ru/data/2014/12/25/1103939133/Prognoz_2030_final.pdf (дата обращения 06.07.2018).
6. Современные хирургические роботы помогают врачам выполнить операции [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://roboting.ru/1996-sovremennye-hirurgicheskie-roboty-pomogayut-vracham-vypolnit-operacii.html> (дата обращения 06.07.2018).
7. Что такое телемедицина [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://telemedicina.ru/news/world/chto-takoe-telemeditsina> (дата обращения 06.07.2018).

УДК 66.03

Система показателей качества углерод-углеродных композиционных материалов и технологии их изготовления

Т.Н. Антипова, доктор технических наук, профессор кафедры Управления качеством и стандартизации,

Д.С. Широян, аспирант кафедры Управления качеством и стандартизации,
Государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования Московской области
«Технологический университет», г. Королев, Московская область

В работе обоснована система показателей качества углерод-углеродного композиционного материала и технологических операций его изготовления. В результате проведенных экспериментальных исследований, применительно к имеющемуся лабораторному оборудованию, определено оптимальное количество циклов насыщения углеродной матрицей армирующего каркаса. Установлено, что для получения углерод-углеродного композиционного материала с невысокой стоимостью и требуемыми показателями качества, необходимо ввести дополнительные показатели расплава пека на стадии пропитки.

Показатели качества, углерод-углеродный композиционный материал, технологический процесс.

The system of indicators of the quality of the carbon-carbon composite materials and technologies of their production

T.N. Antipova, doctor Technical Science, Professor of the Department of Quality Management and Standardization,

D.S. Shiroyan, graduate student of the Department of Quality Management and Standardization,

State Educational Institution of Higher Education
Moscow Region «University of technology», Korolev, Moscow region

The system of indicators of quality of carbon-carbon composite material and technological operations of its production is proved in the work. As a result of the experimental studies, with respect to the existing laboratory equipment, the optimal number of cycles of saturation of the reinforcing frame with a carbon matrix is determined. It was found that to obtain a carbon-carbon composite material with a low cost and the required quality indicators, it is necessary to introduce additional parameters of the pitch melt at the impregnation stage.

Quality indicator, carbon-carbon composite materials, technology process.

Основные тенденции развития современной техники характеризуются интенсификацией использования материалов: увеличением температур

эксплуатации, качественным и количественным ростом механических и тепловых нагрузок. Среди материалов, применяемых в таких конструкциях, как тормозные диски, теплозащиты космических аппаратов, подшипники узлов трения находят широкое применение углерод-углеродные композиционные материалы (УУКМ) [2, (С. 50,51), 4, (С.31-55)].

Анизотропия свойств УУКМ зависит от структуры армирующего каркаса, который зачастую имеет разнонаправленное армирование. Изменение свойств материала удастся достичь при использовании различного вида исходного сырья, а также варьирования показателей технологического процесса.

В настоящее время при изготовлении УУКМ наиболее широко используется жидкофазный метод формирования углеродной матрицы, когда армирующий углеволокнистый каркас пропитывается расплавом каменноугольного пека, из которого в процессе карбонизации под давлением в инертной среде образуется пористый коксовый остаток. Данный процесс является многостадийным [1, (С.97-104)].

Количество циклов пропитка-карбонизация до достижения необходимой плотности УУКМ обуславливается пропитывающей способностью пекового расплава, величиной выхода кокса и его пористой структурой. Одним из основных показателей качества УУКМ является плотность.

Применение принципов управления качеством производства углерод-углеродных композиционных материалов невозможно без разработки системы показателей качества. Система показателей качества основана на процессном подходе и отражает следующие этапы изготовления (рис. 1).

Входной контроль исходных материалов включает в себя определение показателей качества углеродного наполнителя и связующего, а также сравнение полученных данных с паспортными значениями. Так, например, для углеродного наполнителя определяют внешний вид, прочностные характеристики, а также химический состав. Для связующего основными показателями качества являются внешний вид, химический состав и физические свойства.

К основным этапам производства УУКМ следует отнести изготовление армирующего каркаса и насыщение его углеродной матрицей. Так, на этапе изготовления армирующего каркаса используются следующие качественные показатели качества: ориентация расположения слоев армирующего компонента, отсутствие неоднородностей внутри каркаса и отсутствие посторонних включений. В процессе насыщения углеродной матрицей осуществляют контроль следующих компонентов:

- для процесса пропитки: химический состав связующего, температура, время и давление процесса;
- для процессов карбонизации и высокотемпературной обработки: давление, время и температура процесса.

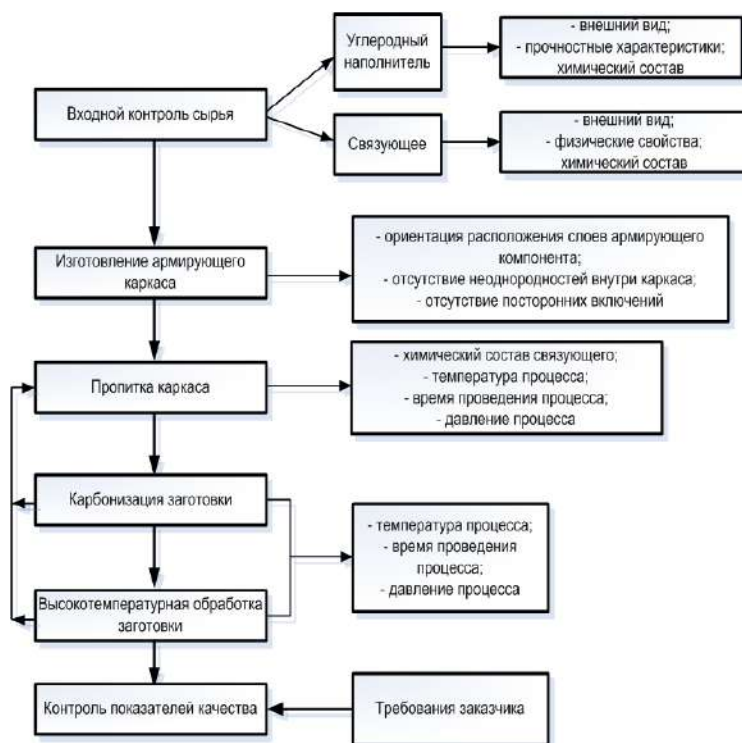


Рисунок 1 – Система показателей качества процесса изготовления УУКМ

При получении УУКМ характерным является относительно высокая пористость углеродной матрицы, а также наличие в ней трещин. Они возникают в матрице в процессе охлаждения из-за высоких термических напряжений. Поскольку технологический процесс получения УУКМ с заданными свойствами является ресурсозатратным, проведение дополнительных циклов приводит к увеличению стоимости материала. Следовательно, определение оптимального количества циклов насыщения углеродной матрицей армирующего каркаса является актуальной задачей.

Конечные технические показатели качества готовой продукции определяются требованиями заказчика, основными из которых являются плотность материала и физико-механические характеристики. В результате анализа возможности применения УУКМ, а также экономической целесообразности технологии его изготовления, разработана система показателей качества, которая включает две главных подсистемы: экономическую, включающую трудоемкость изготовления материала, а также его конечную стоимость, и техническую, включающую физико-механические свойства и плотность материала. Разработанная система показателей качества УУКМ представлена на рисунке 2.



Рисунок 2 – Система показателей качества УУКМ

С целью определения оптимального количества циклов насыщения углеродной матрицей для получения материала с заданной плотностью был проведен эксперимент по изготовлению модельных образцов УУКМ.

Изготовление УУКМ проводили путем насыщения армирующего каркаса, изготовленного на основе углепластиковых стержней, коксом каменноугольного пека марки Б по ГОСТ 10200. Насыщение армирующего каркаса углеродной матрицей проводили по жидкофазной технологии, включающей стадии пропитки пеком, карбонизации и графитации. Применительно к лабораторной установке, используемой в работе, пропитку пеком осуществляли следующим образом. Перед пропиткой армирующего каркаса твердый пек расплавляют в емкости, нагретой до 250 °С. Армирующий каркас, помещенный в металлический контейнер, нагревают до такой же температуры в емкости, расположенной рядом. Расплав пека через трубы, соединяющие обе емкости, продавливается азотом в контейнеры с заготовками. Когда заготовки полностью погружены в горячий пек, свободный объем емкости с заготовками заполняют азотом для выравнивания давления и прекращения подачи пека. Далее пропитанные заготовки в контейнерах перемещают в автоклав для проведения процесса карбонизации с последующим проведением высокотемпературной обработки.

Проведение процесса пропитки на имеющемся оборудовании имеет свои особенности. Увеличение плотности сопровождается привесами углеродной матрицы после пропиток, которые зависят от глубины вакуума, давления в автоклаве и вязкости пека. Изменения состава пека с течением времени негативно отражаются на его смачивающих и пропиточных свойствах к углеродному волокну и коксу, а также способности к образованию мезофазы, и в дальнейшем могут привести к снижению прочностных характеристик материала. Таким образом, необходимо избирательно подходить к выбору критериев качества пека-связывающего, в том числе к содержанию его фракций в зависимости от требуемых показателей качества готового материала.

Основными требованиями к качеству каменноугольного пека на первой стадии уплотнения УУКМ коксовой матрицей являются хорошая смачивающая способность и высокая адгезия к элементам углеродного наполнителя. После первой стадии пропитки происходит лишь закрепление армирующей структуры УУКМ. На последующих стадиях пропитки требуется высокий выход кокса и

спекающая способность для обеспечения прочности углеродной матрицы. Но пропитывающая способность пека очень важна в связи со снижением пористости, особенно открытой пористости по мере увеличения плотности материала.

Для обеспечения высоких прочностных свойств УУКМ, нужна большая прочность углеродной матрицы, низкая пористость, достаточно высокая сила адгезии между наполнителем и матрицей. Этого можно достичь снижением вязкости расплава пека, повышением выхода кокса, увеличением давления. Стоит отметить, что высокое содержание коксовой матрицы необходимо совместить с обеспечением некоторой доли открытой пористости, необходимой для проведения дальнейших процессов пропитки. Для устранения пористости, а также получения материала с высокими прочностными характеристиками цикл пропитка-карбонизация повторяют до достижения плотности больше или равной $1,95 \text{ г/см}^3$, что соответствует требованиям заказчика [1, (С. 97), 5 (С. 196)].

В результате проведения эксперимента получены графическая, изображенная на рисунке 3, и математическая зависимости конечной плотности материала от количества циклов пропитки.

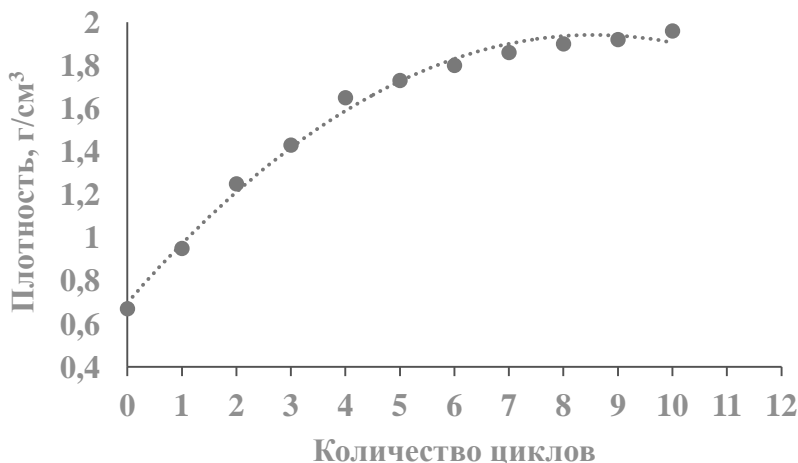


Рисунок 3 – Зависимость плотности материала от количества циклов насыщения

Полученное уравнение представляет собой математическую регрессионную зависимость вида:

$$y = - 0,017 x^2 + 0,2906x + 0,6976 \quad (1)$$

Таким образом, для имеющегося лабораторного оборудования с учетом требований заказчика по значению плотности УУКМ равному $1,95 \text{ г/см}^3$, оптимальное количество циклов насыщения углеродной матрицей равно 9. Однако, с точки зрения экономической подсистемы показателей качества, проведение процессов в таком количестве повышает трудоемкость изготовления материала и как следствие его стоимость.

В результате анализа возможности применения УУКМ, а также

экономической целесообразности технологии его изготовления, разработана система показателей качества углерод-углеродного композиционного материала, которая включает две главных подсистемы: экономическую, включающую трудоемкость изготовления материала, а также его конечную стоимость, и техническую, включающую физико-механические свойства и плотность материала. Кроме того, разработана система показателей качества углерод-углеродного композиционного материала и технологических операций его изготовления. Уникальность технологии изготовления данного вида материала состоит в том, что для получения материала с заданными свойствами насыщение углеродной матрицей армирующего каркаса проводят в несколько циклов. Для обоснования оптимального количества циклов насыщения были изготовлены модельные образцы УУКМ. На основании полученных экспериментальных данных, были построены регрессионные графическая и математическая зависимости плотности материала от количества циклов насыщения. Данные зависимости позволили получить оптимальное число циклов равное девяти, которые обеспечивают требования заказчика по плотности материала не менее 1,95 г/см³.

Литература

1. Бушуев Ю.Г., Персин М.И., Соколов В.А. Углерод-углеродные композиционные материалы, справочник // М.: «Металлургия». 1994 г. С. 128.
2. Воронков Б.Д. Подшипники сухого трения // Л: Машиностроение. 1979. С. 224.
3. Глоссарий по управлению качеством и инновациями: учебное пособие/ под ред. Т.Е. Старцевой, В.Г. Исаев, Т.Н. Антипова и др. // МГОТУ: Королев. Канцлер. 2017 г. 318 с.
4. Проценко А.К., Колесников С.А. Разработка углерод-углеродных технологий и перспективы их развития // Сборник «Научно-исследовательскому институту конструкционных материалов на основе графита – 55 лет» // М.: Научные технологии. 2015. С. 31-55.
5. Щурик А.Г. Искусственные углеродные материалы // Пермь. 2009. С. 342.

УДК 539.261

Новые технологии в области рентгеновского контроля, используемые на предприятиях космического машиностроения

Л.М. Архипова, аспирант,
О.А. Воейко, кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры «Управление качеством и стандартизации»
Государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования Московской области
«Технологический университет», г. Королев, Московская область

В статье рассматриваются новейшие отечественные методы и способы проведения неразрушающего контроля продукции на предприятиях космической отрасли. Подробно изучен рентгеновский способ выявления дефектов аппаратом «Градиент». Описывается новый метод, с применением инновационного оборудования, который позволяет получать более качественное изображение контролируемого объекта, а также существенно снизить негативное воздействие на персонал.

Неразрушающий контроль, рентген, современные технологии.

Modern native x-ray control technologies used at the enterprises of space mechanical engineering

L.M. Arkhipova, post-graduate student,
O.A. Voeйко, candidate of technical Sciences, associate Professor
Department of Quality Management and Standardization,
State Educational Institution of Higher Education
Moscow Region «University of technology», Korolev, Moscow region

The article considers the modern Russian non-destructive methods at the enterprises of the space industry. The X-ray method for revealing defects by the device «Gradient» has been studied in details. A new method is described, with the use of innovative equipment that allows to obtain a better image of the monitored object, as well as significantly reduce the negative impact on personnel.

Nondestructive control, X-ray, modern technologies.

В настоящее время в нашей стране, особое внимание уделяется модернизации машиностроительного комплекса [1]. Достаточно большое количество предприятий отрасли работают по методам и технологиям прошлого столетия, но есть и такие, которые прошли все стадии улучшения производственного процесса.

Методы и способы, используемые на большинстве предприятиях космического машиностроения при проведении неразрушающего контроля, можно смело назвать «ручными». Данная диагностика имеет ряд неоспоримых

недостатков. Одними из наиболее существенных, являются: низкая производительность труда и наличие высокой квалификации персонала, большое количество выявляемого брака. Одними из наиболее значимых областей научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в процессах неразрушающего контроля и технической диагностики при изготовлении космической техники, считается внедрение автоматизированных систем и комплексов. Такие системы используют различные методы контроля и диагностики с применением микропроцессорной и компьютерной техники.

Внедрение современных, наукоемких технологий, а так же обучение персонала, на предприятиях машиностроительного комплекса позволяет существенно снизить расходы на изготовление деталей, уменьшить количество бракованных агрегатов, узлов, а так же повысить эксплуатационную надежность космической техники.

В системе контроля качества изделий космической отрасли применяются различные средства и методы диагностики, которые основываются на понятиях и определениях, установленных федеральными нормативными документами [2, 3].

ГОСТ 16504-81 [3, 4] дает следующее определение технического контроля. Это «проверка соответствия объекта установленным техническим требованиям».

Основа любого контроля – это процесс, состоящий из двух первоочередных этапов (рис. 1):



Рисунок 1 – Основы контроля

Объектом контроля может быть как продукция, так и технологический процесс.

Диагностика – процесс выявления признаков, которыми можно характеризовать объект и его техническое состояние по внешним показателям, с указанием местонахождения дефекта, если он имеет место быть [4].

Средства и методы диагностики представлены на рисунке 2.



Рисунок 2 – Средства и методы диагностики

В качестве примера инновационных технологий стоит назвать разработки компании «Юнитест-Рентген» [5], которые с успехом внедрены и эксплуатируются. Широкое применение получили такие отечественные инновации как: рентгеновские аппараты «Руслан», рентгенотелевизионные системы «Контраст», универсальные и специализированные рентгенотелевизионные установки серии «Артикон», системы цифровой радиографии на основе сканера и запоминающих пластин «Градиент»).

Следует отметить автоматизированную рентгеновскую цифровую систему ScanTrack® с рентгеновским сканером. Она применяется в цифровой радиографии для дефектоскопии сварных швов трубопроводов, и других конструкций. Используя новейшую CMOS-технологии получения цифровых рентгеновских изображений, рентгеновский дефектоскоп ScanTrack® комплектуется рентгеновским сканером с высоким разрешением для контроля объектов шириной до 3 дюймов и длиной до 34 дюймов.

Используя разработанную систему улучшения и архивирования цифровых рентгеновских изображений «ВидеоРен», являющуюся, по отзывам специалистов, одной из лучших в мире в своем классе, фирма предлагает серию стационарных и переносных комплексов цифровой радиографии (компьютерных негатоскопов) «Унирен» (на базе сканера и цифровой фотокамеры). Эти приборы для компьютерной обработки и архивирования рентгеновских снимков пользуются заслуженной популярностью у специалистов.

Программа «ВидеоРен» используется также и для обработки цифровых рентгеновских изображений в отечественных универсальных рентгенотелевизионных установках серии «Артикон», предназначенных для комплексного решения различных задач рентгеновского, радиографического

неразрушающего контроля. Одним из наиболее часто используемых отечественных аппаратов, для проведения рентгеновского контроля является аппаратный комплекс «Градиент» на основе запоминаящих пластин. Его работа основана на методе компьютерной радиографии [6].

Основа данного метода сводится к использованию некоторых характеристик люминофоров, способных накапливать скрытое изображение (рис. 3). Данное изображение формируется на кристаллической матрице: на каждый пиксель воздействуют гамма- или рентгеновским излучением, в результате чего электроны перескакивают на более высокие энергетические уровни и находятся там в течение длительного времени. Соответственно чем больше количество перескочивших электронов, тем светлее получится эта точка на изображении. Из этого состояния электроны выводят лазерным пучком.

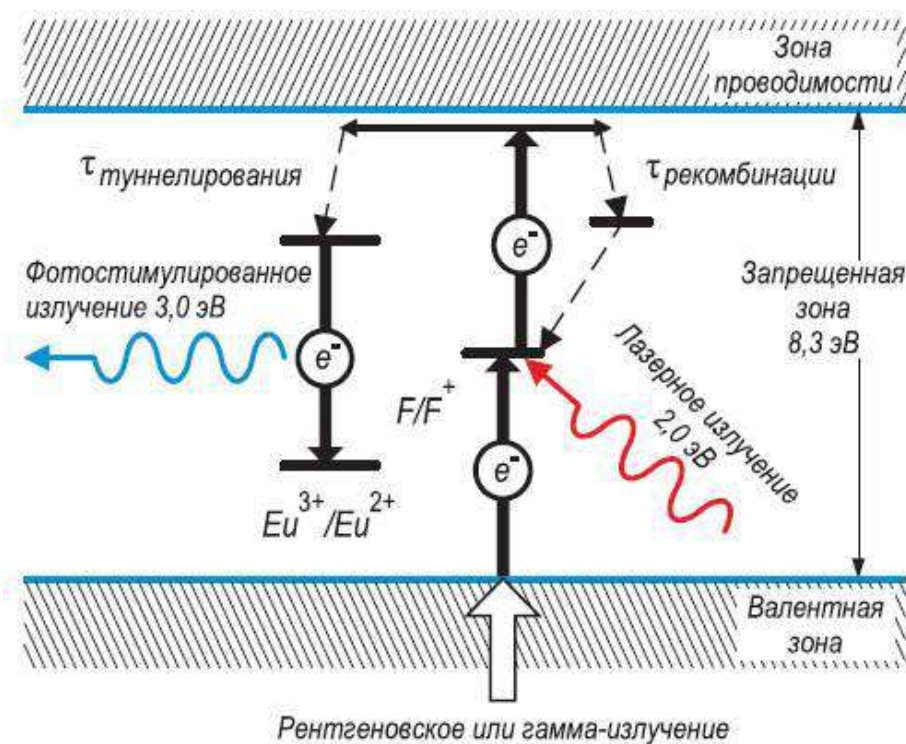


Рисунок 3 – Процесс появления теневого изображения на пластине под действием гамма-излучения

Расшифровать теневое изображение, записанное на гибкую пластину, можно только при использовании новейшей, прогрессивной компьютерной техники. Поэтому данная разработка и получила свое название, компьютерной или цифровой радиографии.

Свойства люминесцентных запоминаящих составов известны с прошлого века, однако, первый коммерческий сканер (основной элемент системы компьютерной радиографии) был разработан и выпущен компанией Fuji в 1983 г. С тех пор различными фирмами (AGFA, Kodak и др.) было выпущено

несколько моделей сканеров. Важный шаг был сделан в 1998-2000 гг., когда фирмами Ogeх и ICR были выпущены настольные варианты систем для компьютерной радиографии.

В компьютерной радиографии для получения качественного изображения на смену пленки пришла специальная гибкая пластина, которую используют многократно. Пластины собраны в кассеты и имеют типовые для рентгеновской пленки размеры 18x24, 18x30, 24x30 и 35x43 см. Образцы пластин с запоминающим слоем представлены на рисунке 4. Данные пластины можно резать, подбирая наиболее подходящий размер. Благодаря пластинам фотостимулируемой памяти стало возможно сохранение изображений.



Рисунок 4 – Образцы пластин с запоминающим слоем

Процесс радиографии состоит из нескольких этапов, представленных на рисунке 5.

На рисунке 7 показано, как с помощью компьютерной программы можно расшифровать изображение, выявить дефекты, сделать изображение более читаемым (сделать светокоррекцию) и дать заключение о годности изделия.

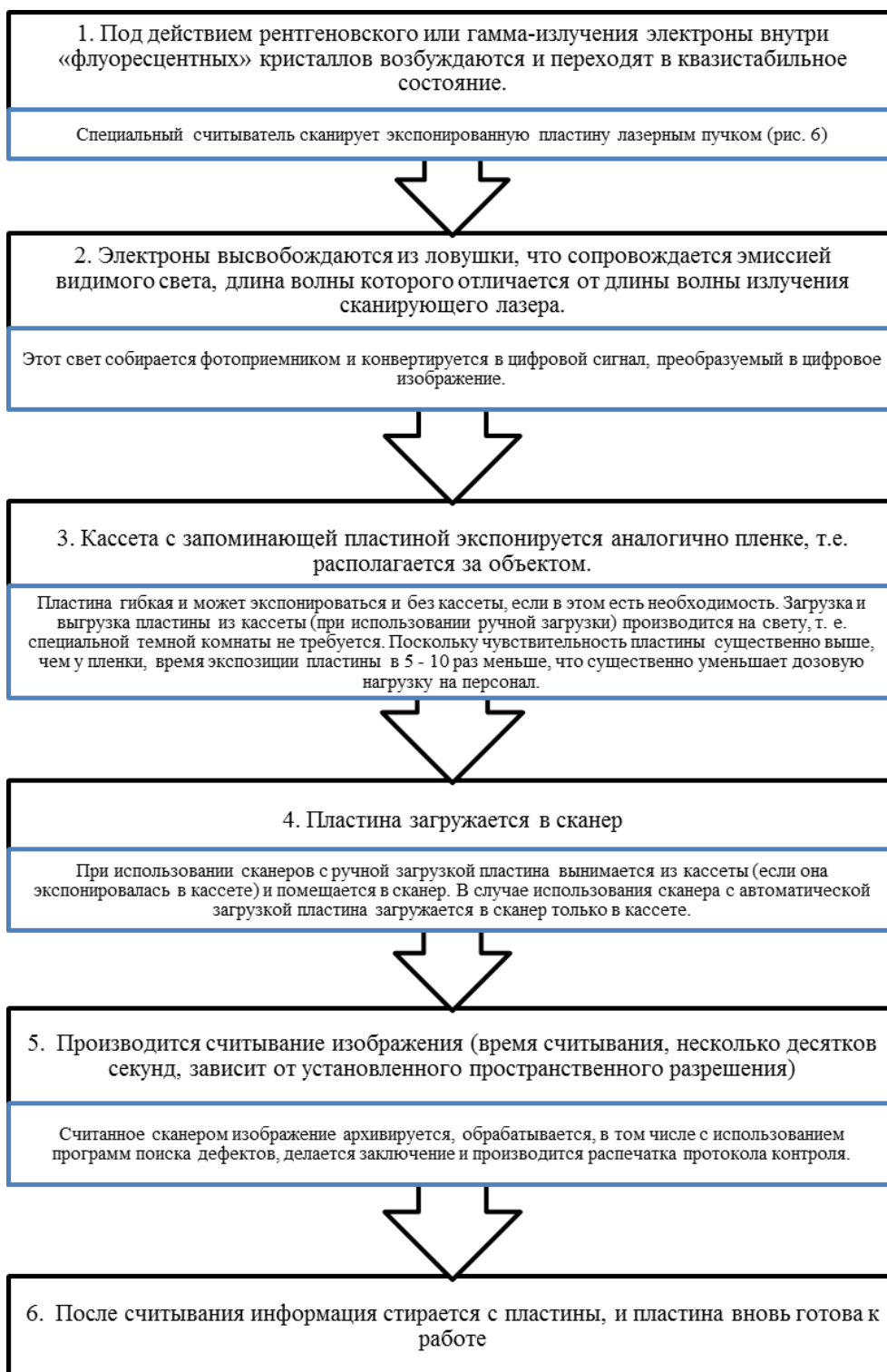


Рисунок 5 – Этапы проведения компьютерной радиографии

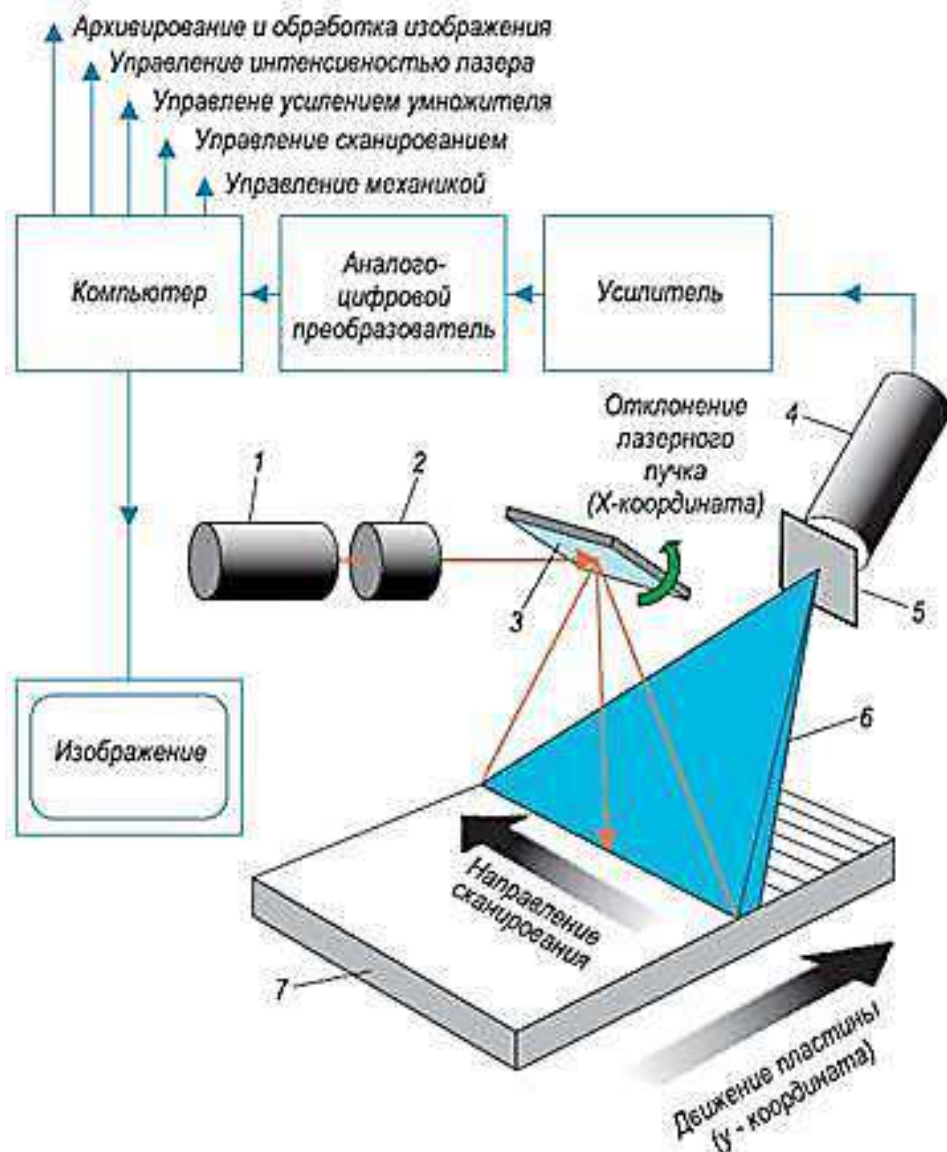


Рисунок 6 – Схема процесса сканирования гибкой пластины с запоминающим слоем и получения цифрового изображения:

- 1 – лазер; 2 – оптика формирования пучка; 3 – зеркало;
 4 – фотоумножитель; 5 – фильтр; 6 – оптика сбора света люминесценции; 7 – гибкая запоминающая пластина

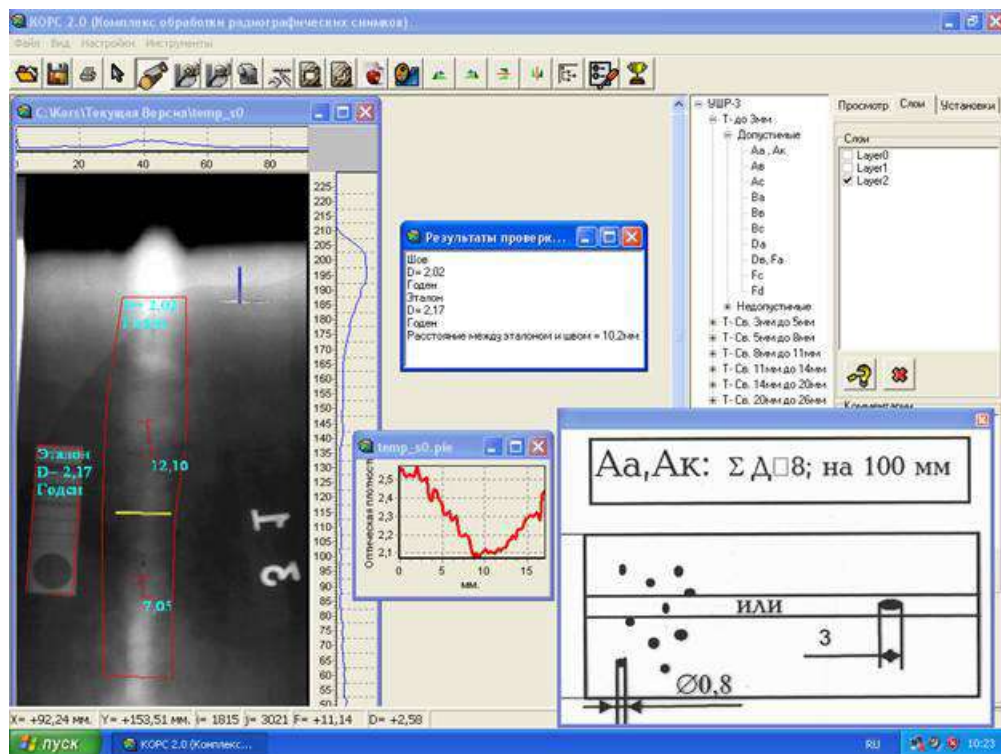


Рисунок 7 – Анализ сварного шва с помощью компьютерной программы «ВидеоРен»

Преимущества цифровой радиографии представлены на рисунке 8.

1	•быстрота получения информации
2	•исключается «мокрая» технология обработки пленки
3	•дозы облучения существенно меньше необходимых для экспонирования обычной пленки (при сравнительно низких энергиях для получения изображения одинакового качества, например в случае пленки AGFA, напряжение на трубке можно уменьшить на 30 %, а время экспозиции - в 10 раз
4	•благодаря более широкому, чем у пленки динамическому диапазону появляется возможность исследовать и контролировать детали более сложной формы с большей толщиной
5	•пластина для записи является многоразовой, допускается экспонирование до 30 000 раз
6	•имеется возможность архивирования информации в компьютере на различных носителях, делать необходимое количество идентичных копий, использовать электронную почту для передачи информации; время хранения лазерного диска без потери информации составляет не менее 30 лет
7	•прямое получение цифровых изображений позволяет отказаться от оборудования для оцифровки рентгеновских пленок
8	•достижимое пространственное разрешение при считывании составляет 10 пар линий/мм, что позволяет получать изображения чрезвычайно высокого качества

Рисунок 8 – Преимущества цифровой радиографии

В завершении стоит подчеркнуть, что Госкорпорация «Роскосмос» является активным участником программы по развитию космической отрасли, которую утвердило своим Постановлением Правительство Российской Федерации от 15 апреля 2014 года N 328, Об утверждении государственной программы Российской Федерации «Развитие промышленности и повышение ее конкурентоспособности» [1]. По нашему мнению, лишь своевременное внедрение инновационных технологий и методик выявления дефектов, в систему

неразрушающего контроля, способно существенно повысить качество выпускаемой продукции и снизить затраты в машиностроительной отрасли.

Литература

1. Постановление Правительства Российской Федерации от 15 апреля 2014 года N 328, Об утверждении государственной программы Российской Федерации «Развитие промышленности и повышение ее конкурентоспособности».
2. Неразрушающий контроль: [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://ru.wikipedia.org/wiki/Неразрушающий контроль](http://ru.wikipedia.org/wiki/Неразрушающий_контроль) (дата обращения: 30.08.2018).
3. ГОСТ 16504-81 Система государственных испытаний продукции. Испытания и контроль качества продукции. Основные термины и определения (с Изменением N 1).
4. Воцкий З.И., Воцкий А.З. Испытание сельскохозяйственной техники: методы оценки функциональных показателей машин для возделывания и уборки сельскохозяйственных культур: учебное пособие // ФГОУ ВПО «Челябинский гос. агроинженерный ун-т», 2006. 237 с.
5. Юнитест-Рентген отечественный производитель оборудования для неразрушающего контроля: [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.unitest-roentgen.ru/> (дата обращения: 30.08.2018).
6. Сертификация, аттестация, консалтинг: [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.centri-kachestvo.ru/> (дата обращения: 30.08.2018).

УДК 539.3

**Моделирование переноса потока ионизирующего излучения
в многослойных преградах**

А.В. Острик, доктор технических наук, профессор,
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
«Институт проблем химической физики РАН», ФГБУН ИПХФ РАН, г. Москва,
И.В. Бугай, кандидат технических наук, доцент,
Государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования Московской области
«Технологический университет», г. Королев, Московская область

Рассматривается вариант метода Монте-Карло для расчета переноса ионизирующего излучения с энергией квантов $E_{ph}=1-200\text{кэВ}$. Предлагается гибридный численно-аналитический метод расчета. При численной реализации каждой траектории фотопоглощение квантов учитывается аналитически, а остальные виды взаимодействий (комptonовское и релеевское рассеяния, флуоресценция) разыгрываются случайным образом. Приводятся результаты расчетов переноса излучения планковского спектра в плоских многослойных преградах.

Моделирование, метод Монте-Карло, энерговыделение, комptonовское и релеевское рассеяния, флуоресценция, планковский спектр излучения.

Modeling the transfer of ionizing radiation flux in multilayered barriers

A.V. Ostriak, Doctor of Engineering, Professor,
Institute of Problems of Chemical Physics of RAS, Moscow,
I.V. Bugay, candidate of technical Sciences, associate Professor,
State Educational Institution of Higher Education
Moscow Region «University of technology», Korolev, Moscow region

The variant of Monte Carlo method for calculation of transfer of ionizing radiation having quanta energy of $E_{ph}=1-200\text{keV}$ is considered. The hybrid numerical and analytical method of calculation is offered. At numerical realization of each trajectory photo-absorption of quanta is considered analytically and other types of interactions (Compton and Relay scatterings, fluorescence) are realized in a random way. Calculations results for transfer of radiation having Plank spectrum are given for flat multilayered barriers.

Modeling, Monte Carlo method, energy release, Compton and Relay scatterings, fluorescence, Plank radiation spectrum.

Введение. Расчет переноса ионизирующего излучения (ИИ) с энергией квантов $E_{ph}=1-200\text{кэВ}$ (рентгеновский диапазон спектра ИИ) имеет важное практическое значение [1-3]. В этом интервале при взаимодействии ИИ с

веществом оказывается существенным представительный набор физических процессов: фотопоглощение и сопровождающая его флуоресценция (в случае больших атомных номеров химических элементов (ХЭ), начиная с $Z \approx 40$); комптоновское и релеевское рассеяния. При этом, для низких энергий квантов ИИ (мягкое ИИ $E_{ph} = 1 \dots 10 \text{кэВ}$), массовый коэффициент фотопоглощения весьма велик уже при средних значениях Z и разыгрывать процессы фотопоглощения при численном моделировании отдельной траектории представляется бесперспективным. Для фотопоглощения требуется некоторый аналитический подход, эффективно реализуемый в методе плотностей столкновений [4]. Необходимость учета представительного набора видов взаимодействий имеет, конечно, и свои плюсы, поскольку в итоге получается численный код, применимый в значительно большем интервале изменений энергий квантов, вплоть до энергий $E_{ph} = 2m_e c^2 \approx 1,02 \text{МэВ}$, начиная с которых становится возможным рождение электрон-позитронных пар.

Не менее важным обстоятельством оказывается потребность в большом количестве данных о сечениях рассматриваемых видов взаимодействия. В частности, необходимы таблицы данных дифференциальных сечений комптоновского и релеевского рассеяний, интегрального сечения фотопоглощения, а также сечения её радиационной части – флуоресценции. Для фотопоглощения данные должны быть достаточно подробными (включать энергии фотонов, на которых имеют место скачки сечений фотопоглощения). Само наличие скачков вносит дополнительные трудности при интерполяции сечений для различных значений энергий квантов. Конечно, желательно иметь набор тестирующих эти данные ЭВМ-программ, среди которых особенно полезными оказываются те, которые проверяют согласованность данных из различных источников (например, интегралы дифференциальных сечений по углам рассеяния должны быть близки к полным сечениям, которые имеются у многих авторов).

Многокомпонентность и гетерогенность преграды вносят множество дополнительных особенностей [2, 3]. Отметим только, что очень полезными оказываются метод врезок и гибридный подход [2, 5], при котором перенос фотонов рассматривается для многокомпонентной гомонизированной преграды, а перераспределение энергии вторичным электронным излучением реализуется аналитически методом элементарной ячейки для гетерогенного включения.

Как и в других приложениях метода Монте-Карло, весьма важным является вопрос о алгоритмах численного моделирования каждой траектории так, чтобы она была наиболее информативна, но с наименьшими затратами времени ЭВМ на её розыгрыш. Основным принципом, обеспечивающим информативность, может служить запрет на окончание траектории при безрадиационном фотопоглощении или выходе из преграды. Для корректности такого запрета вводятся соответствующие веса колен траектории. Скорость реализации траектории во многом определяется быстротой поиска узлов интерполяции табличных данных. Авторами используется метод деления пополам. Этот метод, очевидно, не является наиболее эффективным, но он легко программируется и, как показывают расчеты, оказывается достаточным для рассматриваемого класса задач переноса. Ну и конечно, считывание, проверка и обработка данных с целью их адаптации к решаемой задаче должны быть

сделаны предварительно перед циклом розыгрыша траекторий.

Получаемый в итоге численный код не гарантирован от ошибок. Важными этапами является его верификация и валидация. При верификации полезными и информативными оказываются организация различных счетчиков (например, счетчиков различных видов взаимодействий и на каких элементах они реализуются) и проведение сравнений с простыми моделями переноса (общую модель достаточно просто поставить в условия справедливости рассматриваемой простой модели). Для валидации численной модели и её кода в настоящее время в доступной литературе имеются достаточно много специально разработанных тестов и экспериментальных данных, полученных в хорошо контролируемых условиях проведения опытов.

Настоящая статья посвящена расчету переноса ИИ в гомонизированной многослойной плоской преграде с учетом основных процессов, имеющих место при взаимодействиях квантов излучения с атомами вещества в рассматриваемом диапазоне спектра: фотопоглощения и флуоресценции, релеевского и комптоновского рассеяний.

Последовательность вычислений методом Монте-Карло.

Предварительно перед основным циклом расчета траекторий производится считывание из баз данных требуемых интегральных и дифференциальных сечений взаимодействий для тех ХЭ, которые входят в состав слоев преграды. Затем определяются интегральные сечения для заданных массовых содержаний элементов по слоям. Для каждого слоя в соответствии с его составом строится единая по энергиям квантов сетка, на которой задаются интегральные сечения для фотопоглощения, со встроенными на ней энергиями скачков в этих сечениях. Поскольку в различные слои преграды могут входить одинаковые ХЭ, то во избежание дублирования дифференциальные сечения (угловые распределения рассеяний) считываются для ХЭ по информации об их содержании во всей преграде в целом. В свою очередь слои преграды разбивается на подслои – детекторы, в которых накапливаются вклады от отдельных траекторий.

Розыгрыш каждой траектории проводится так, чтобы она не обрывалась при фотопоглощении или выходе кванта за пределы преграды. Это достигается введением статистических весов, изменяющихся после розыгрыша каждого свободного пробега. Вклады в детекторы от безрадиационного фотопоглощения (без образования флуоресцентного кванта) рассчитываются аналитически. При фотопоглощении с рождением флуоресцентного кванта, поглощенный квант заменяется флуоресцентным и траектория продолжается. Траектория обрывается лишь при уменьшении энергии кванта до $E_{ph} < 1\text{кэВ}$ или снижении статистического веса до $V < 10^{-4}$.

Последовательность розыгрыша траектории показана на рис. 1. По заданному спектральному частичному распределению $F_p(E_{ph})$ на поверхности преграды разыгрывается энергия фотона E_{ph} , которая находится из уравнения (для повышения эффективности программы входящий в это уравнение интеграл берется аналитически или численно перед циклом розыгрыша траекторий):

$$\int_{E_{ph \min}}^{E_{ph}} F_p(E) dE = \xi,$$

где ξ – случайное число, равномерно распределенное на отрезке [0,1].

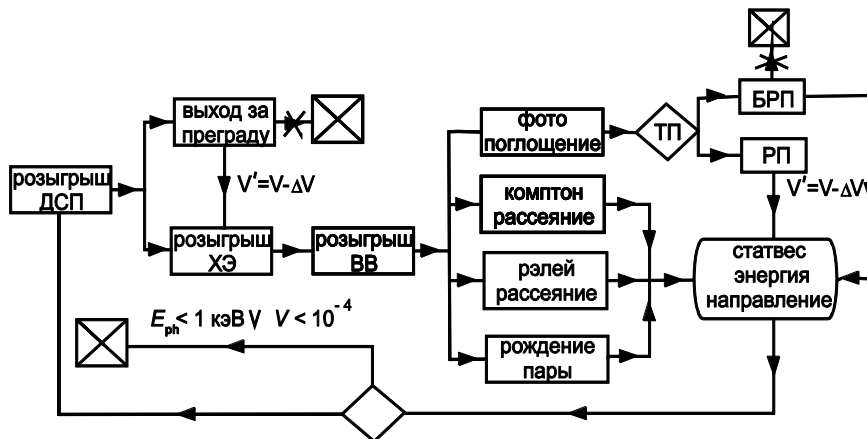


Рисунок 1 – Последовательность розыгрыша траектории (ДСП – длина свободного пробега; ВВ – вид взаимодействия; ТФ – тип фотопоглощения; БРП – безрадиационный переход; РП – радиационный переход)

Затем при известной энергии кванта разыгрывается длина свободного пробега и по ней определяется номер слоя, в который попал квант. По суммарным (за исключением безрадиационного фотопоглощения) интегральным сечениям взаимодействия каждого из ХЭ, входящих в этот слой, разыгрывается ХЭ, на котором реализовалось столкновение кванта. Розыгрыш проводится по стандартной схеме розыгрыша дискретной случайной величины [6]: отрезок [0,1] разбивается по длине пропорционально интегральным сечениям ХЭ в слое, разыгрывается случайное число $\xi \in (0,1)$ и в зависимости от того, в какое из разбиений оно попадет, и определяется ХЭ. Далее по интегральным сечениям взаимодействия (опять за исключением безрадиационного фотопоглощения) для найденного ХЭ разыгрывается вид взаимодействия аналогично тому, как определялся случайным образом ХЭ. При известных данных об энергии фотона, виде взаимодействия и ХЭ, на котором он реализуется, разыгрываются угол рассеяния θ и азимутальный угол ψ . В свою очередь, по углам θ, ψ и углу φ_t (углу между прямолинейным участком траектории и перпендикуляром к плоской преграде) определяется новый текущий угол φ'_t , а также рассчитываются новые значения энергии фотона E'_{ph} и статистического веса V' (см. далее). Затем, если $E' > 1\text{кэВ}$ и $V' > 10^{-4}$ разыгрывается новая длина свободного пробега и весь процесс розыгрыша колена траектории повторяется. В противном случае проводится розыгрыш следующей траектории до тех пор, пока не будет набрана заданная статистика (число моделируемых траекторий квантов).

Прямая компонента излучения. В низкоэнергетической области энергий квантов прямую компоненту излучения (часть квантов, которые не испытывают в преграде ни одного рассеяния и только фотопоглощаются без флуоресценции) целесообразно считать аналитически. Вероятность реализации траектории W_p без рассеяния и флуоресценции, а также доля энергии потока излучения W_E прямой компоненты вычисляются по соотношениям

$$\begin{aligned}
 W_p &= \int_{E_{phmax}}^{E_{phmax}} F_p(E_{ph}) e^{-\tau_{s\Sigma}(E_{ph})/\cos\varphi} dE_{ph}, \\
 W_E &= \int_{E_{phmax}}^{E_{phmax}} F_E(E_{ph}) e^{-\tau_{s\Sigma}(E_{ph})/\cos\varphi} dE_{ph}, \\
 \tau_{s\Sigma}(E_{ph}) &= \sum_{i=1}^N (\sigma_{ci}(E_{ph}) + \sigma_{ri}(E_{ph}) + \sigma_{ffi}(E_{ph})) m_i
 \end{aligned} \tag{1}$$

где $\tau_{s\Sigma} = \tau_{s\Sigma}(E_{ph})$ – оптическая толщина многослойной преграды по отношению ко всем рассматриваемым процессам взаимодействия кроме безрадиационного фотопоглощения; $\sigma_{ff}(E_{ph})$ – часть массового сечения фотопоглощения с рождением флуоресцентного кванта ($\sigma_f(E_{ph}) = \sigma_{ff}(E_{ph}) + \sigma_{fe}(E_{ph})$); ρ_i, h_i, m_i – плотность, толщина и массовая толщина ($m_i = \rho_i h_i$) i -го слоя; N – число слоев преграды; φ – угол падения излучения на преграду.

Таблица 1 – Вероятность реализации и доля энергии прямой компоненты ИИ в %

Teff, кэВ	C		Al		Fe		Pb	
	W_p	W_E	W_p	W_E	W_p	W_E	W_p	W_E
1,6	52,6	59,3	6,7	12,6	–	–	–	–
5	69,8	74,9	38,3	52,2	0,66	1,89	0,0016	0,0073
8	74,6	78,4	52,5	64,6	4,09	9,08	0,056	0,18

В таблице 1 представлены результаты расчета по формулам (1) для планковских спектров с $T_{eff} = 1,6, 5, 8$ кэВ [1,3] и преград толщиной $h = 0,5$ см из углерода, алюминия, железа и свинца. Видно, что выделение прямой компоненты и ее аналитический расчет имеют смысл для не слишком больших Z и с увеличением доли жестких квантов ИИ в спектре.

Для прямой компоненты параметры потока излучения q , перпендикулярного плоскости преграды, и приведенного удельного энерговыделения f (удельного энерговыделения на единицу плотности энергии падающего излучения) рассчитываются аналитически, интегрированием по спектру:

$$q(m) = \cos \varphi \int_{E_{phmax}}^{E_{phmax}} F_E(E_{ph}) e^{-\tau_{fe}(E_{ph}, m) / \cos \varphi} dE_{ph},$$

$$f(m) = -\frac{dq}{dm} = \int_{E_{phmax}}^{E_{phmax}} \sigma_{fe}(E_{ph}, m) F_E(E_{ph}) e^{-\tau_{fe}(E_{ph}, m) / \cos \varphi} dE_{ph}, \quad (2)$$

$$\tau_{fe}(E_{ph}, m) = \sigma_{feN+1}(E_{ph}) \Delta m_{N+1} + \sum_{i=1}^{N(m)} \sigma_{fei}(E_{ph}) m_i.$$

где $\tau_{fe}(E_{ph}, m)$ – оптическое расстояние по отношению к безрадиационному фотопоглощению вдоль нормали к преграде от облучаемой поверхности до плоскости с текущей массовой координатой m ; $N(m)$ – число слоев, предшествующих слою, в котором находится плоскость с координатой m ; Δm_{N+1} – массовое расстояние от нижней (облучаемый слой считается самым верхним с $N=1$) границы N -го слоя до плоскости с координатой m .

Разыгрыш длины свободного пробега. Моделирование длины свободного пробега в преграде (из точки взаимодействия в плоскости с массовой координатой m до следующей точки взаимодействия m') проводится по соотношениям:

$$1 - e^{-\Delta\tau_{s\Sigma}(E_{ph}, m, m') / |\cos \varphi_t|} = \left(1 - e^{-\Delta\tau_{s\Sigma}(E_{ph}, m, M') / |\cos \varphi_t|}\right) \xi \quad (3)$$

$$M' = \begin{cases} M, & \text{где } \cos \varphi_t > 0 \\ 0, & \text{где } \cos \varphi_t < 0 \end{cases}$$

где ξ – случайное число, равномерно распределенное на $[0, 1]$; M – массовая толщина преграды; $\Delta\tau_{s\Sigma}(E_{ph}, m, m')$ – оптическое расстояние между плоскостями с координатами m и m' . Из соотношения (3) определяется новая массовая координата плоскости m' , в которой находится точка взаимодействия кванта (заканчивается старое колено траектории).

Статистический вес траектории уменьшается: умножается на произведение вероятностей, что рассеивающее столкновение (комpton или релей или флюоресценция) произойдет, а безрадиационная часть фотопоглощения до момента столкновения – нет

$$V' = \left(1 - e^{-\Delta\tau_{s\Sigma}(E_{ph}, m, M') / |\cos \varphi_t|}\right) e^{-\Delta\tau_{fe}(E_{ph}, m, m') / |\cos \varphi_t|} V.$$

Вклад в поток на границе детектора с координатой m_t от безрадиационного поглощения на этом текущем колене траектории рассчитывается по соотношениям:

$$q(m_t) = \frac{E_{ph} V}{\langle E_{ph} \rangle} \cos \varphi \begin{cases} e^{-\frac{\Delta\tau_{fe}(E_{ph}, m, m_t)}{|\cos \varphi_t|}}, & \text{где } 0 \leq (m_t - m)\omega \leq |m - m'| \\ e^{-\frac{[\Delta\tau_{fe}(E_{ph}, m, m_t) + \Delta\tau_{s\Sigma}(E_{ph}, m, M')]}{|\cos \varphi_t|}}, & \text{где } |m - m'| \leq (m_t - m)\omega \leq |m - M'|. \end{cases} \quad (4)$$

где $\omega = \text{sign}(\cos \varphi_t)$ – индекс (знак) направления движения ($\omega=+1$ – вглубь преграды, $\omega=-1$ – навстречу падающему излучению).

Вклад энерговыделения в детектор с координатой центра $\bar{m}_t = m_t + \Delta m / 2$ определяется по соотношениям:

$$f(\bar{m}_t) = -\frac{dq}{dm_t} = \frac{E_{ph}V}{\langle E_{ph} \rangle} \sigma_{fe}(\bar{m}_t, E_{ph}) \cos \varphi \left\{ \begin{array}{l} e^{-\frac{\Delta\tau_{fe}(E_{ph}, m, \bar{m}_t)}{|\cos \varphi_t|}}, \text{ где } 0 \leq (\bar{m}_t - m)\omega \leq |m - m'| \\ e^{-\frac{[\Delta\tau_{fe}(E_{ph}, m, \bar{m}_t) + \Delta\tau_{s2}(E_{ph}, m, M')]}{|\cos \varphi_t|}}, \text{ где } |m - m'| \leq (\bar{m}_t - m)\omega \leq |m - M'| \end{array} \right. \quad (5)$$

Так как траектории разыгрываются лишь для части излучения без прямой компоненты, то после первого колена статистический вес меняется только вследствие фотопоглощения без флуоресценции (первое столкновение гарантировано)

$$V' = e^{-\Delta\tau_{fe}(E_{ph}, 0, m') / \cos \varphi} V.$$

Соответственно нет вкладов в детекторы при $|m - m'| < |m - m_t| \leq |m - M'|$ и соотношения (4) и (5) для первого колена траекторий принимают вид:

$$q(m_t) = \frac{E_{ph}V}{\langle E_{ph} \rangle} \cos \varphi \left\{ \begin{array}{l} e^{-\frac{\Delta\tau_{fe}(E_{ph}, m, m_t)}{\cos \varphi}}, \text{ где } m_t \leq m' \\ 0, \text{ где } m' < m_t \leq M. \end{array} \right.$$

$$f(\bar{m}_t) = -\frac{dq}{dm_t} = \frac{E_{ph}V}{\langle E_{ph} \rangle} \sigma_{fe}(\bar{m}_t, E_{ph}) \left\{ \begin{array}{l} e^{-\frac{\Delta\tau_{fe}(E_{ph}, m, \bar{m}_t)}{|\cos \varphi_t|}}, \text{ где } \bar{m}_t \leq m' \\ 0, \text{ где } m' < \bar{m}_t \leq M. \end{array} \right.$$

Как уже отмечалось, после розыгрыша длины свободного пробега и прихода кванта в новую точку взаимодействия m' разыгрываются вид столкновения и номер химического элемента на котором оно реализуется. Определение угла φ'_t и нахождение новой энергии фотона E'_{ph} после взаимодействия в точке m' зависят от вида процесса и далее описывается для каждого из них.

Комптоновское рассеяние. При достаточно высоких энергиях квантов эффектами связи можно пренебречь, тогда дифференциальное сечение комптоновского рассеяния на свободных электронах описывается формулой Клейна – Нишины – Тамма [7-9]:

$$\left(\frac{d\sigma_c}{d\Omega}\right)_e = \frac{r_e^2}{2} \left(\frac{E'_{ph}}{E_{ph}}\right)^2 \left(\frac{E'_{ph}}{E_{ph}} + \frac{E_{ph}}{E'_{ph}} + \cos^2 \theta - 1\right), \quad \frac{E'_{ph}}{E_{ph}}$$

$$= \left[1 + \frac{E_{ph}}{m_e c^2} (1 - \cos \theta)\right]^{-1} \quad (6)$$

где $r_e = e^2/m_e c^2$ – классический радиус электрона; $(d\sigma_c/d\Omega)_e$ – электронное дифференциальное сечение рассеяния фотона под углом θ в телесный угол $d\Omega$. Подставляя в (6) второе соотношение в первое получаем удобную для розыгрыша методом Неймана [6] косинуса угла рассеяния $\cos \theta$ зависимость дифференциального сечения от начальной энергии кванта E_{ph} и $\cos \theta$.

$$\left(\frac{d\sigma_c}{d\Omega}\right)_e = \frac{r_e^2}{2} \frac{1}{[1 + \alpha(1 - \cos \theta)]^2} \left[1 + \cos^2 \theta + \frac{\alpha^2 (1 - \cos \theta)^2}{1 + \alpha(1 - \cos \theta)}\right], \quad \alpha$$

$$= \frac{E_{ph}}{m_e c^2}. \quad (7)$$

После розыгрыша $\cos \theta$ новую энергию кванта E'_{ph} находим по энергии

до рассеяния E_{ph} из второго соотношения (6).

При энергиях квантов сравнимых с энергией связи электронов в атоме необходимо учитывать эффект связности, вводя в распределение (6) поправочную функцию некогерентного рассеяния $H(Z, X)$

$$\left(\frac{d\sigma_c}{d\Omega}\right)_a = \left(\frac{d\sigma_c}{d\Omega}\right)_e H(Z, X), \quad X = \frac{1}{\lambda} \sin \frac{\theta}{2}, \quad (8)$$

где $(d\sigma_c/d\Omega)_a$ – атомное дифференциальное сечение неупругого рассеяния фотона; $[\lambda] = \text{Å}$, $[E_{ph}] = \text{кэВ}$ – длина волны рассеиваемого излучения. При расчетах, не требующих детального описания рассеянной компоненты излучения, можно принять [9,10]:

$$\frac{H}{Z} = 1 - e^{-5v}, \quad v = \frac{2,21}{\lambda} \sin \frac{\theta}{2} Z^{-2/3}.$$

И тогда из (8) получаем

$$\left(\frac{d\sigma_c}{d\Omega}\right)_a = Z \left(\frac{d\sigma_c}{d\Omega}\right)_e (1 - e^{-5v}). \quad (9)$$

При высоких требованиях по точности прогнозирования рассеянной компоненты ИИ использование (9) не правомерно и необходимо обращение к табличным данным по угловым распределениям комптоновского рассеяния в низкоэнергетичной области спектра [11,12]. При этом представляется естественным пользоваться формулой Клейна – Нишины – Тамма (6) в области энергий квантов, где табличные данные отсутствуют или недостоверны.

В силу симметрии к повороту плоскости, проходящей через новое и начальное направления движения фотона, вокруг начального направления (предполагается отсутствие поляризации излучения) азимутальный угол ψ (см. рис. 2) разыгрывается равновероятно на интервале $(0, 2\pi)$. Тогда новый текущий косинус угла между перпендикуляром к преграде и направлением движения кванта находится из соотношения $\cos \varphi'_t = \cos \varphi_t \cos \theta + \sin \varphi_t \sin \theta \cos \psi$. (10)

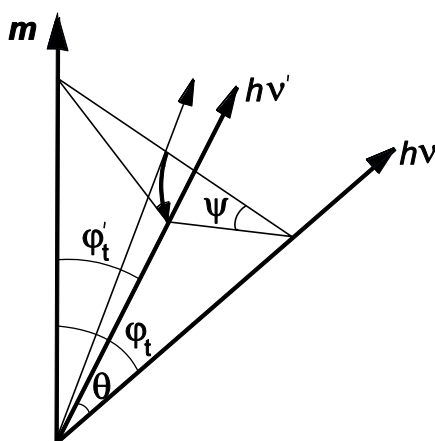


Рисунок 2 – Схема рассеяния кванта Релеевское рассеяние

Роль релеевского рассеяния при переносе излучения в конденсированных преградах незначительна. Аналогично случаю комптоновского рассеяния, учет

связности осуществляется поправочным множителем – атомным форм-фактором $F(Z, X)$

$$\left(\frac{d\sigma_r}{d\Omega}\right)_a = \left(\frac{d\sigma_r}{d\Omega}\right)_e F^2(Z, X), \quad X = \frac{1}{\lambda} \sin \frac{\theta}{2}, \quad (11)$$

$(d\sigma_r/d\Omega)_a$ – атомное дифференциальное сечение когерентного рассеяния фотона; $(d\sigma_r/d\Omega)_e$ – электронное томсоновское дифференциальное сечение рассеяния фотона. Приближенное выражение для форм-фактора описывается формулой [9,10]:

$$F = Z(e^{-g} + 0,12) + \Delta F, \quad g = \frac{5,91}{\lambda} \sin \frac{\theta}{2} Z^{-1/3}, \quad (12)$$

где ΔF – поправка на аномальное рассеяние в области края поглощения рассеивающего атома (вблизи K -края поглощения при $\lambda > 1,1\lambda_K$ $\Delta F \approx -2$).

С ростом энергии кванта релеевское рассеяние происходит в направлении движения фотона в узком угле $\Delta\theta$ [13]

$$\Delta\theta = 2 \arcsin \left[\frac{0,026Z^{1/3}}{\alpha} \right], \quad \alpha = E_{ph}/(m_e c^2) \quad (13)$$

и при отсутствии данных в этой области энергий E_{ph} можно ограничиться розыгрышем углов рассеяния в пределах $\Delta\theta$, предполагая угловое распределение равномерным в телесном угле.

Для более точного описания углового распределения релеевского рассеяния в низкоэнергетичной области энергий квантов необходимо обращаться к имеющимся табличным данным [14]. Энергия фотонов при релеевском рассеянии не меняется и $E'_{ph} = E_{ph}$.

Флуоресценция. Флуоресцентные кванты оказывают влияние на перенос ИИ в той области спектра, где преобладает фотопоглощение на K и L оболочках. Выход флуоресцентного излучения при удалении электрона из атома в результате фотопоглощения растет с зарядовым числом Z и глубиной оболочки (для K -оболочки при изменении Z от 20 до 80 доля реализации радиационного перехода растет от 0,13 до 0,95; для L -оболочки – от 0,01 до 0,38).

Направление флуоресцентного кванта разыгрывается из условий его изотропного выхода (при моделировании методом плотностей столкновений этот квант заменяет при розыгрыше траектории погибший при фотопоглощении фотон). Расчеты показывают, что для задач воздействия ИИ на элементы конструкции флуоресценцию имеет смысл рассматривать лишь для K -оболочек и, начиная с Na при $Z \geq 12$ (при меньших номерах ХЭ K -скачок лежит вне рассматриваемой области $E_{ph} \geq 1$ кэВ).

Энергия флуоресцентных квантов разыгрывается в соответствии с данными об относительных интенсивностях линий K -серии [11,15]. Считается, что флуоресцентные кванты излучаются атомом изотропно.

Результаты расчетов. При расчетах использовались данные по характеристикам взаимодействия квантов ИИ с химическими элементами из работ [11,12,14-16]. Рассматривался объект облучения в виде многослойного композитного пакета с защитными внешним слоем из резины, содержащей тяжелые элементы (дисперсный наполнитель из диоксида олова). Отметим, что этот пакет взят лишь в качестве расчетного примера и не имеет отношения к реальным элементам конструкции. Характеристики слоёв приведены в таблице 2

(взяты характерные для данного класса материалов массовые содержания ХЭ; незначительные добавки изъяты из состава).

Таблица 2 – Плотность, толщина и массовый состав слоев преграды

материал	H	C	N	O	Si	S	P	Cl	Zn	Sn	ρ , г/см ³	h, мм
резина-защита	11	67	0,5	16	0,5	2			3		1,05	0,5мм
SnO ₂				21,23						78,77	7,0	
УП	3	88	2	7	-						1,5	2мм
ОП	5	70	10,5	12				2,5			1,3	5мм
резина-заполнитель	11	67	0,5	16	0,5	2			3		1,05	50мм

Гетерогенный материал защитного покрытия (резина + дисперсный наполнитель SnO₂) гомонизирован (заменен в расчетах на однородный многокомпонентный с соответствующим пересчетом массового содержания элементов и плотности гетерогенного материала в целом). Рассматривалось два варианта защитного пакета с 5% (пакет-1) и 30% (пакет-2) массовыми содержаниями диоксида олова в резине-защите ($\rho_{5\%} = 1,3475\text{г/см}^3$. $\rho_{30\%} = 2,835\text{г/см}^3$).

Экранирующая способность пакета определяются суммарным сечением каждого вида взаимодействия на единицу площади (см²/см²). При значении этой безразмерной величины близкой к единице квант ИИ испытывает, по крайней мере, одно взаимодействие соответствующего типа. В таблицах 3-6 представлены экранирующие способности для обоих рассматриваемых вариантов защитного пакета (резина-заполнитель считается защищаемым слоем, она в экранирующий пакет не включается) по вкладу химических элементов и по слоям для мягких и жестких планковских спектров ($T_{\text{эф}}=1,6\text{кэВ}$, $T_{\text{эф}}=8\text{кэВ}$). При $T_{\text{эф}}=1,6\text{кэВ}$ интегральные сечения рассеяний оказываются малыми по сравнению с сечениями фотопоглощения, поскольку спектр ИИ – мягкий.

Такие таблицы являются весьма детальной и полезной характеристикой экранирующих свойств защитного пакета. Они наглядно представляют вклад каждого химического элемента и каждого слоя в экранирующую способность пакета и в результате какого вида взаимодействия реализуется это экранирование. Видно, что первый вариант пакета гарантировано обеспечивает экранирование от мягкого ИИ (итоговые сечения на единицу площади $\hat{\delta}_Z = 39,72$ – на много превышают единицу). Основной вклад из ХЭ вносит углерод, поскольку его много в используемых материалах, а олова с большим Z в пакете-1 незначительное количество. Наибольшее экранирующее действие у третьего слоя т.к. он наиболее толстый, а защитный первый слой еще не обеспечивает экранирования из-за малого содержания олова. В случае жесткого ИИ пакет-1 не обеспечивает хорошего экранирования, т.к. суммарное сечение взаимодействия на единицу площади оказывается меньшим единицы (сечение на единицу площади $\hat{\delta}_Z = 0,6276$).

Таблица 3 – Экранирующая способность пакета-1 при $T_{eff} = 1,6кЭВ, < E_{ph} > = 4,3кЭВ$

по химическим элементам				
<i>Z</i>	$\hat{\sigma}_f$	$\hat{\sigma}_c$	$\hat{\sigma}_r$	$\hat{\sigma}_\Sigma$
1	0,00187	0,01439	0,00438	0,02064
6	18,07480	0,07606	0,29958	18,45044
7	2,91749	0,00667	0,03882	2,96298
8	6,55735	0,00892	0,07380	6,64007
14	0,09590	0,00002	0,00041	0,09632
16	0,54438	0,00009	0,00184	0,54630
17	7,76013	0,00102	0,02412	7,78527
30	0,49525	0,00008	0,00617	0,50150
50	2,70544	0,00009	0,01316	2,71869
$\hat{\sigma}_\Sigma$	39,15262	0,10732	0,46228	39,72
по слоям				
№ слоя	$\hat{\sigma}_f$	$\hat{\sigma}_c$	$\hat{\sigma}_r$	$\hat{\sigma}_\Sigma$
1	5,52496	0,00756	0,04662	5,57913
2	7,75055	0,03126	0,12184	7,90365
3	25,87878	0,06851	0,29386	26,24115
$\hat{\sigma}_\Sigma$	39,15429	0,10733	0,46231	39,72

Таблица 4 – Экранирующая способность пакета-1 при $T_{eff} = 8кЭВ, < E_{ph} > = 21,6кЭВ$

по химическим элементам				
<i>Z</i>	$\hat{\sigma}_f$	$\hat{\sigma}_c$	$\hat{\sigma}_r$	$\hat{\sigma}_\Sigma$
1	0,00001	0,01749	0,00028	0,01778
6	0,12144	0,12266	0,04328	0,28739
7	0,02096	0,01180	0,00528	0,03804
8	0,05002	0,01712	0,00960	0,07674
14	0,00100	0,00005	0,00007	0,00111
16	0,00617	0,00018	0,00032	0,00667
17	0,09146	0,00216	0,00424	0,09786
30	0,05544	0,00022	0,00110	0,05675
50	0,04208	0,00024	0,00290	0,04522
$\hat{\sigma}_\Sigma$	0,38858	0,17192	0,06706	0,6276
по слоям				
№ слоя	$\hat{\sigma}_f$	$\hat{\sigma}_c$	$\hat{\sigma}_r$	$\hat{\sigma}_\Sigma$
1	0,11662	0,01188	0,00784	0,13635
2	0,05332	0,04997	0,01731	0,12060
3	0,21869	0,11008	0,04192	0,37068
$\hat{\sigma}_\Sigma$	0,38863	0,17192	0,06707	0,6276

Таблица 5 – Экранирующая способность пакета-2 при $T_{eff} = 1,6кЭВ$, $\langle E_{ph} \rangle = 4,3кЭВ$

по химическим элементам				
Z	$\hat{\sigma}_f$	$\hat{\sigma}_c$	$\hat{\sigma}_r$	$\hat{\sigma}_\Sigma$
1	0,00202	0,01553	0,00473	0,02229
6	18,63460	0,07842	0,30886	19,02188
7	2,92438	0,00668	0,03891	2,96998
8	7,38915	0,01005	0,08316	7,48236
14	0,14866	0,00003	0,00063	0,14933
16	0,84391	0,00013	0,00285	0,84690
17	7,76013	0,00102	0,02412	7,78527
30	0,76776	0,00012	0,00957	0,77745
50	34,15180	0,00111	0,16619	34,31910
$\hat{\sigma}_\Sigma$	72,62243	0,11310	0,63901	73,37
по слоям				
N слоя	$\hat{\sigma}_f$	$\hat{\sigma}_c$	$\hat{\sigma}_r$	$\hat{\sigma}_\Sigma$
1	38,99555	0,01333	0,22338	39,23226
2	7,75055	0,03126	0,12184	7,90365
3	25,87878	0,06851	0,29386	26,24115
$\hat{\sigma}_\Sigma$	72,62488	0,11311	0,63908	73,37

Таблица 6 – Экранирующая способность пакета-2 при $T_{eff} = 8кЭВ$, $\langle E_{ph} \rangle = 21,6кЭВ$

по химическим элементам				
Z	$\hat{\sigma}_f$	$\hat{\sigma}_c$	$\hat{\sigma}_r$	$\hat{\sigma}_\Sigma$
1	0,00001	0,01889	0,00030	0,01920
6	0,12521	0,12646	0,04462	0,29629
7	0,02101	0,01183	0,00529	0,03813
8	0,05636	0,01929	0,01082	0,08647
14	0,00155	0,00007	0,00010	0,00172
16	0,00957	0,00028	0,00049	0,01034
17	0,09146	0,00216	0,00424	0,09786
30	0,08594	0,00033	0,00170	0,08798
50	0,53114	0,00304	0,03667	0,57084
$\hat{\sigma}_\Sigma$	0,92224	0,18236	0,10423	1,209
по слоям				
N слоя	$\hat{\sigma}_f$	$\hat{\sigma}_c$	$\hat{\sigma}_r$	$\hat{\sigma}_\Sigma$
1	0,65033	0,02232	0,04501	0,71766
2	0,05332	0,04997	0,01731	0,12060
3	0,21869	0,11008	0,04192	0,37068
$\hat{\sigma}_\Sigma$	0,92234	0,18236	0,10424	1,209

Второй пакет экранирует ИИ в обоих случаях спектра (итоговые сечения на единицу площади $\hat{\sigma}_\Sigma = 73,37$, $\hat{\sigma}_\Sigma = 1,209$ для мягкого и жесткого ИИ, соответственно) Основной вклад в фотопоглощение из ХЭ теперь вместо углерода вносит олово, поскольку массовое содержание диоксида олово увеличено в первом слое по сравнению с первым пакетом в 6 раз (с 5% до 30%). Соответственно и экранирующее действие у первого слоя, содержащего олово, оказывается наибольшим, не смотря на его малую толщину (0,5мм) по сравнению с третьим слоем (5мм).

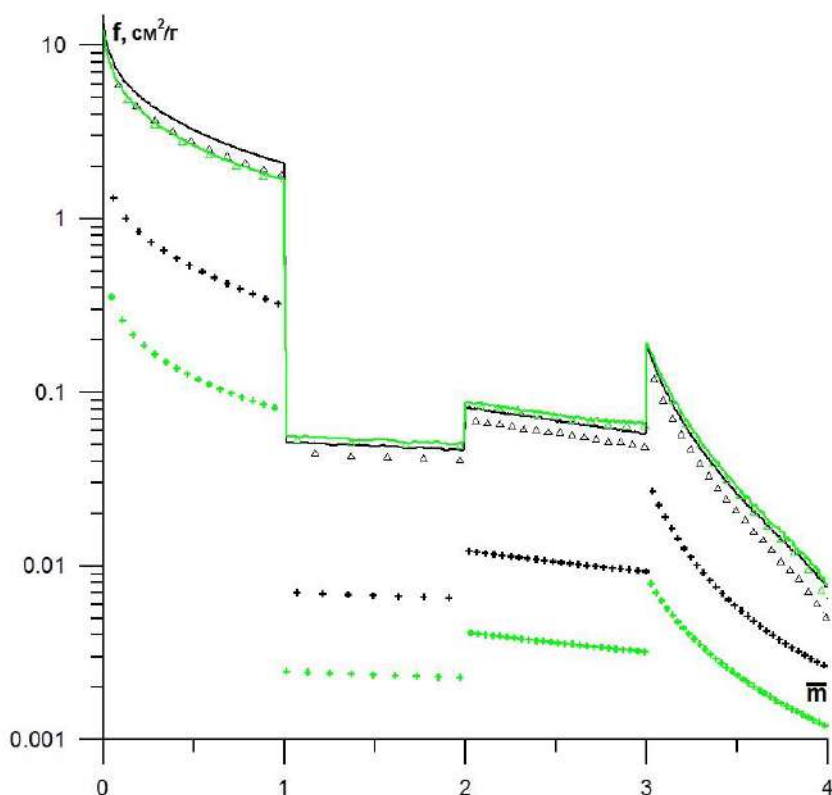


Рисунок 4 – Пространственное распределение приведенного удельного энерговыделения при облучении пакета-2 планковским спектром с $T_{\text{эф}}=8$ кэВ

Согласно предварительному анализу экранирующей способности пакетов, приведем результаты расчетов удельного энерговыделения f (на единицу массы при единичной поверхностной плотности энергии) только для второго пакета (теперь в составы пакетов входит и резина-заполнитель, общее число слоев – 4), поскольку первый пакет с содержанием диоксида олова 5% не обеспечивает экранирования от жесткого ИИ. Эти результаты представлены на рис. 3-4 для ИИ планковского спектра с эффективными температурами $T_{\text{эф}}=1,6$; 8кэВ и при перпендикулярном падении излучения на преграду. Черным цветом показаны распределения, полученные без учета флуоресценции, зеленым – с учетом. Крестиками отмечены распределения энерговыделения в прямой

компоненте, треугольниками – в рассеянной, сплошными линиями – итоговые распределения. На границах слоев наблюдаются разрывы в распределениях энерговыделения, что обусловлено скачками в сечениях взаимодействия ИИ с материалами различных слоев преграды.

Из приведенных результатов следует, что вследствие флуоресценции в случае жесткого спектра $T_{\text{eff}}=8\text{кэВ}$ энерговыделение перераспределяется вглубь преграды и поэтому в ряде случаев флуоресценцию необходимо учитывать (при облучении ИИ с мягким спектром $T_{\text{eff}}=1,6\text{кэВ}$ доля флуоресцентных квантов оказывается малой и итоговые распределения с учетом и без учета флуоресценции практически совпадают, см. рис. 3). Также видно, что вклад рассеянной компоненты оказывается ведущим (массовая толщина пакета достаточно велика $\Delta t=6,342\text{г/см}^2$, чтобы обеспечить хотя бы одно рассеяние; отдельный расчет прямой компоненты имеет смысл при массовых толщинах преграды до $\Delta t=0,5\text{г/см}^2$) и расчет необходимо вести, пользуясь детальными табличными данными для дифференциальных сечений рассеяния.

Выводы

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

- разработан численный код для расчета переноса ИИ методом Монте-Карло (методом плотностей столкновений) с учетом всех основных процессов взаимодействия (фотопоглощения и флуоресценции; комптоновского и релеевского рассеяний) квантов ИИ с многокомпонентными материалами многослойной композитной преграды;
- методика адекватно описывает процессы комптоновского и релеевского рассеяний, вследствие использования детальными таблиц для соответствующих форм-факторов;
- методика обладает высокой расчетной точностью, благодаря реализованному в ней гибриднему подходу, при котором вклады прямой компоненты и безрадиационного поглощения рассчитываются аналитически;
- методика имеет высокую эффективность (малое расчетное время, затрачиваемое на розыгрыш отдельной траектории), что обусловлено рядом вычислительных подходов, используемых в программе (вынос всех предварительных вычислений за рамки розыгрыша траектории; недопущение обрыва траектории, вследствие фотопоглощения или выхода кванта за пределы преграды; использование эффективных численных процедур интерполяции сечений взаимодействия; проведение интерполирования сечений на общей для всех ХЭ сетке энергий квантов ИИ с внесением в эту сетку энергий скачков фотопоглощения и т.д.);
- предложенный подход к оценке экранирующих свойств преграды по её суммарному сечению каждого из типов взаимодействий на единицу площади облучаемой поверхности (безразмерный параметр) по ХЭ и по слоям позволяет проводить проектирование и предварительную оптимизацию преграды без расчетов переноса ИИ;
- проведенные расчеты профилей энерговыделения в преграде показали влияние на его параметры флуоресценции, а также основной вклад рассеянной компоненты в заполнителе.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (№ 16-08-01065-а, 18-08-00964-а).

Литература

1. Физика ядерного взрыва: в 2-х томах. 2 // М.: Наука. Физматлит. 1997. 256 с.
2. Острик А.В. Термомеханическое действие рентгеновского излучения на многослойные гетерогенные преграды в воздухе // М.: НТЦ «Информтехника». 2003. 160 с.
3. Бакулин В.Н., Острик А.В. Комплексное действие излучений и частиц на тонкостенные конструкции с гетерогенными покрытиями // М.: Физматлит. 2015. 288с.
4. Berger M.J. Reflection and transmission of gamma radiation by barriers: Monte Carlo calculation by a collision-density method // J. Res. Natl Bur. Stand. 1955. 55 343–50.
5. Грибанов В.М., Острик А.В., Ромадинова Е.А. Метод оценки энерговыделения в компонентах облучаемого рентгеновским излучением сферопластика с учетом перераспределения энергии электронами // Межотраслевой научно-технический журнал «Конструкции из композиционных материалов». 2009. Вып. 1. С. 40-47.
6. Соболев И.М. Метод Монте-Карло // М.: Наука. 1968. 64с.
7. Фано У., Спенсер Л., Бергер М. Перенос гамма излучения // М.: Госатомиздат. 1963. 95с.
8. Блохин М.А. Физика рентгеновских лучей // М.: Гиттл. 1953.
9. Павлинский Г.В. Основы физики рентгеновского излучения // М.: ФИЗМАТЛИТ. 2007. 240с.
10. Бахтиаров А.В., Пшеничный Г.А. Формулы для приближенного вычисления дифференциальных сечений рассеяния рентгеновского излучения малой энергии // аппаратура и методы рентгеновского анализа // Л.: Машиностроение. 1973. Вып. 12. С. 68–72.
11. Блохин М.А., Швейцер И.Г. Рентгеноспектральный справочник // М.: «Наука». 1982. 376с.
12. Hubbell J.H., Veigele Wm.J., Briggs E.A., Brown R.T., Cromer D.T., Howerton R.J. Atomic Form Factors, Incoherent Scattering Functions, and Photon Scattering Cross Sections // Phys. Chern. Ref. Data. Vol. 4. No. 3. pp. 471-538 (1975).
13. Альфа-, бета- и гамма-спектроскопия. Под ред. К. Зибмана. Перев. с англ. Вып. I. // М.: Атомиздат. 1968. 568с.
14. Hubbell J.H., Overbo I. Relativistic Atomic Form Factors and Photon Coherent Scattering Cross Sections // Phys. Chern. Ref. Data, Vol. 8, No. 1. pp. 69-105 (1979).
15. Hubbell J.H., Trehan P.N., N. Singh et al. A Review, Bibliography, and Tabulation of K, L, and Higher Atomic Shell X-Ray Fluorescence Yields // Phys. Chern. Ref. Data, Vol. 23, No. 2, pp. 339-364 (1994).
16. Немец О.Ф., Гофман Ю.В. Справочник по ядерной физике. Киев «Наукова думка», 1975. 415с.

УДК 621.785

**Исследование влияния тонких нитридных пленок алюминия
на камневидный излом литой стали**

М.Л. Скрябин, кандидат технических наук, доцент,
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
образования Вятская государственная сельскохозяйственная академия
(ФГБОУ ВО Вятская ГСХА), г. Киров,
С.С. Чухлова, инженер-технолог,
акционерное общество «Вятское машиностроительное предприятие «АВИТЕК»,
г. Киров

В статье рассмотрены особенности образования камневидного излома, который образуется при повышенной температуре и обогащен частично растворимыми в твердом растворе внедрения углерода в γ -железо фазами. Они представляют собой мелкие частицы, пленки или оплавленные эвтектики. Для исследования закономерностей появления данного дефекта были выбраны 8 различных плавок и для дальнейшего исследования были изготовлены микрошлифы. Изучение структуры способствовало выявлению основных составляющих, которые оказывают разрушающее действие на металл, а также узнать, какие структуры преобладают в большей или меньшей степени для развития микролокальной деформации, провоцирующей разрушение.

Дефекты металлических материалов, камневидный излом, сталь 35ХГСЛ.

**A study of the influence of thin nitride films of aluminium on the fracture
of solid cast steel**

M.L. Scriabin, candidate of technical Sciences , associate Professor,
Federal state budgetary educational institution of higher professional education Vyatka
state agricultural Academy
(University at Vyatka state agricultural Academy), Kirov,
S.S. Chukhlova, engineer,
joint stock company «Vyatka machine-building enterprise «AVITEK», Kirov

The article considers the features of the formation of primary and secondary stone – like fracture formed at high temperatures and enriched by phases soluble in austenite in the form of small particles or films-melted eutectic. For studies of the patterns of occurrence of the defect was 8 different heats selected for further studies were made of the micro-sections. The study of the structure contributed to the identification of the main components that have a destructive effect on the metal, as well as to find out which structures prevail to a greater or lesser extent for the development of microlocal deformation that provokes destruction.

Defects of metal materials, stone-like fracture, steel 35HGSL.

На сегодняшний день существует множество промышленных производств, которые занимаются изготовлением деталей из металлических материалов. Для того, чтобы выпускать качественные изделия главной операцией является выявление тех или иных дефектов, которые в последствии могут вывести детали из строя.

Дефектом металлических материалов является какое-либо отклонение от предусмотренных технических условий их качества. К дефектам можно отнести несоответствие химического состава, структуры, состояния поверхности и т.д.

На самом деле в любом металле и сплаве имеются дефекты, но некоторые из них незначительные, что никак не может повлиять на то или иное изделие. Для этого создано множество стандартов для определения серьезности дефектов.

Согласно ГОСТ 15467-79 дефектами называются отдельные несоответствия продукции, установленные требованиями. Литейные дефекты делятся на пять групп: несоответствие по геометрии, дефекты поверхности, несплошности в теле отливки, несоответствие по структуре, включения [1,2].

Помимо литейных дефектов, в отливках могут быть выявлены дефекты в изломах, такие как межкристаллитные прослойки (сколы, слоистые изломы), обезуглероженный и науглероженный слой, черный излом, нафталинистый и камневидный излом и другие. Для более полного понимания причин появления камневидного излома необходимо:

- исследовать структуры отдельно отлитых образцов из стали 35ХГСЛ.
- выявить причины, которые способствуют образованию камневидного излома для предотвращения его появления.

Для достижения поставленной цели необходимо выполнить следующие задачи:

- изучить сравнительным способом сущность камневидного излома;
- выяснить влияние тонких нитридных пленок алюминия на камневидный излом литой стали;
- произвести металлографический и химический анализы, а также механические свойства исследуемых отдельно отлитых образцов.

Камневидный излом – это относительно однородная поверхность разрушения. Обычно камневидный излом проходит по границам зерен и обогащен частично растворимыми в твердом растворе внедрения углерода в γ -железо фазами. Они представляют собой мелкие частицы, пленки или оплавленные эвтектики. Камневидный излом образуется после высокотемпературного нагрева, свыше 1250 °С.

На поверхности камневидного излома чаще всего можно обнаружить матовый светло-серый цвет, с металлическим блеском. Четкие камневидные зерна проявляются после термической обработки: закалки и отпуска, нормализации и т.д.

Камневидный излом в литой стали делится на два вида: первичный и вторичный.

Первичный камневидный излом образуется после перегрева и охлаждения, то есть до термической обработки. Это происходит из-за особого грануляционного строения аустенита при продолжительном охлаждении. При этом в приграничной зоне выделяются ограниченно растворимые в аустените

нитриды, карбиды и отдельные легирующие элементы.

Вторичный излом образуется после перегрева металла перед горячей деформацией, такой как ковка, прокатка, штамповка, а также проявляется после перегрева при термической обработке.

Механизм образования вторичного камневидного излома следующий. При достижении температуры 1300...1350 °С зерна γ -железа растут до 2...4 мм и получают форму выпуклого многогранника. Далее в них растворяются карбиды, сульфиды и нитриды. Азот и сера образуют на околофазной границе и образуют тонкие пленки сульфидов марганца и железа, которые сохраняются и после охлаждения. Совокупность этих факторов увеличивает хрупкость металла при ударе. Кроме того, излом чаще всего проходит именно по границам этих зерен [3].

К такому камневидному излому склонны электродуговые выплавки, в отличие от мартеновских, а также электродуговые выплавки с последующим электрошлаковым переплавом.

Принято различать устойчивый и неустойчивый камневидный излом. Устойчивый камневидный излом бывает первого и второго рода.

Камневидный излом первого рода можно исправить только до нижних температур фазовых превращений. При термической обработке это происходит редко. Камневидный излом второго рода исправляется легче, применяя последующую гомогенизацию или высокотемпературную нормализацию.

Можно проследить такую закономерность: при повышении устойчивости камневидного излома, скорость охлаждения в процессе кристаллизации уменьшается, возрастает температура и продолжительность перегрева, повышается содержание тугоплавких соединений, которые обогащают зернограничные объемы.

Неустойчивый камневидный излом в процессе отпуска охрупчивает границы зерен в процессе перегрева. Высокочистая сталь не позволяет развивать отпускную хрупкость.

Развитие первичного камневидного излома литой стали можно предупредить следующими способами:

- снизить содержание никеля и повысить содержание марганца;
- связать серу с тугоплавкими соединениями, при помощи раскисления стали редкоземельными элементами;
- модифицировать сталь и обработать сталь синтетическим шлаком;
- произвести ускоренное охлаждение стали при затвердевании до температуры 1000...1200 °С.

Образование вторичного камневидного излома можно предотвратить следующими методами:

- ограничить температуру нагрева стали;
- провести высокий отпуск выше температур, при которых происходит явление отпускной хрупкости.

Сталь можно улучшить двумя путями. Первый путь состоит из высокотемпературной гомогенизации, при температурах 1100...1200 °С [4].

Вторым путем является горячая деформация. В перегретой стали при увеличении степени деформации наблюдается постепенное уменьшение камневидного излома [5].

Сталь 35ХГСЛ является конструкционной легированной сталью для фасонных отливок. Данная сталь преимущественно используется в узлах самолетов, двигателях и их агрегатов.

Отливки изготавливаются методами точного литья, по выплавляемым моделям и в керамические формы по постоянным моделям. Выплавка стали производится в индукционных печах с основной футеровкой в открытых условиях и в вакууме.

Сталь имеет отличительную особенность – хорошую жидкотекучесть. Температура заливки форм составляет 1500...1570 °С, в зависимости от конфигурации и толщины стенок детали. Температура затвердевания варьируется в пределах 1486...1495 °С.

Метод спектрального анализа химического состава основан на изучении спектров взаимодействия материала с излучением.

Данный анализ позволяет получить данные о химическом составе марке материала. Этим методом можно получить процентное содержание того или иного химического элемента, кроме углерода.

Для спектрального анализа использован оптический эмиссионный спектрометр Belec Vario Lab, работа которого основана на методе эмиссионного спектрального анализа, который имеет зависимость интенсивности спектральных линий от содержания элемента в пробе. Для возбуждения эмиссионного спектра используемых элементов в образце используется искровой электрический разряд между стержневым электродом и непосредственно поверхностью образца. Электрод обдувается аргоном.

Как было выше сказано, камневидный излом проявляется после термической обработки, заключающейся в отжиге, который является подготовительной операцией перед дальнейшими закалкой и отпуском.

Предварительная термическая обработка

Термическая обработка производилась после того, как все литниковые системы удалены и поверхность очищена от керамики.

По инструкциям ОСТ 1 90093-82 предложен режим предварительной термической обработки для стали 35ХГСЛ. Ее осуществляют двумя способами, нормализацией и отжигом.

Нормализация происходит при температурах 900±10 °С с последующим отпуском при 680±10 °С, охлаждение на воздухе.

Отжиг производится при температуре 780 °С, с охлаждением до 670°С в печи, а затем на воздухе.

Эти способы не используются, так как в отливках чаще проявляется камневидный излом.

Вместо вышеперечисленных способов образцы подвергались предварительной термической обработке, согласно карте типового технологического процесса №140 [6]:

- нагревали отливки до 640...650 °С;
- выдерживали 1 час;
- нагревали отливки до 910±10 °С;
- выдерживали 12...13 часов (в зависимости от деталей в партии);
- охлаждали с печью до 670±20 °С;
- охлаждали на воздухе.

Данная предварительная термическая обработка происходила дольше, но вероятность появления камневидного излома снижалась.

Окончательная термическая обработка

Следующим этапом идет окончательная термическая обработка, состоящая из закалки и отпуска, которая позволит определить механические свойства стали.

Окончательная термическая обработка стали 35ХГСЛ выполнялась по инструкциям ОСТ 1 90093-82 и состояла из двух этапов. Первым этапом являлась закалка при температуре 890 ± 10 °С с охлаждением в масле. Второй этап – отпуск при температуре 570...630 °С.

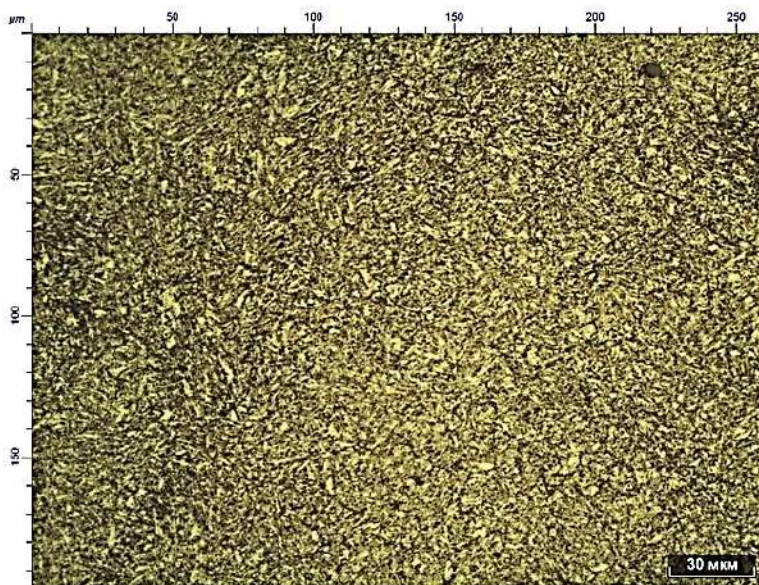
Механические свойства показывают, на какие сопротивления способны те или иные металлы осуществлять из внешней среды. К основным механическим свойствам металлов и сплавов относят: твердость, вязкость, прочность, ползучесть, пластичность, износостойчивость и ударная вязкость. Испытания проводят различными способами: растяжением, скручиванием, сгибанием, сжатием и ударным сгибанием [7].

Подготовка шлифов для микроструктуры состояла из двух этапов: шлифование и полирование. Шлифование происходило на специальном станке, с чередованием наждачной бумаги, от крупнозернистой к мелкозернистой. В данном случае использовались наждачные бумаги с зернистостью: 180, 320, 400, 600, 800, 1000. Полирование осуществлялось при помощи сукна, смоченного пастой ГОИ смешанной с водой.

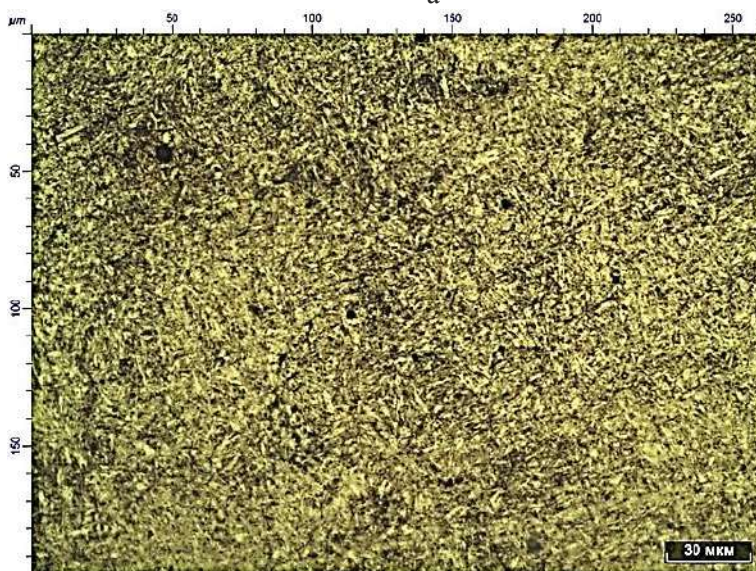
По готовности шлифа для определения структуры в качестве травителя использовался раствор 4% азотной кислоты в этиловом спирте. Травление осуществлялось при помощи ватного тампона.

Для изучения микроструктуры использовался световой микроскоп ZEISS AXIO Vert.A1 MAT, с помощью которого рассматривалась микроструктура при увеличении до 2000.

Появление камневидного излома может быть вызвано из-за отклонения от стандартов химического состава. Для выявления закономерностей появления камневидного излома были выбраны 8 плавков, в одной из которых был обнаружен камневидный излом (плавка 4).

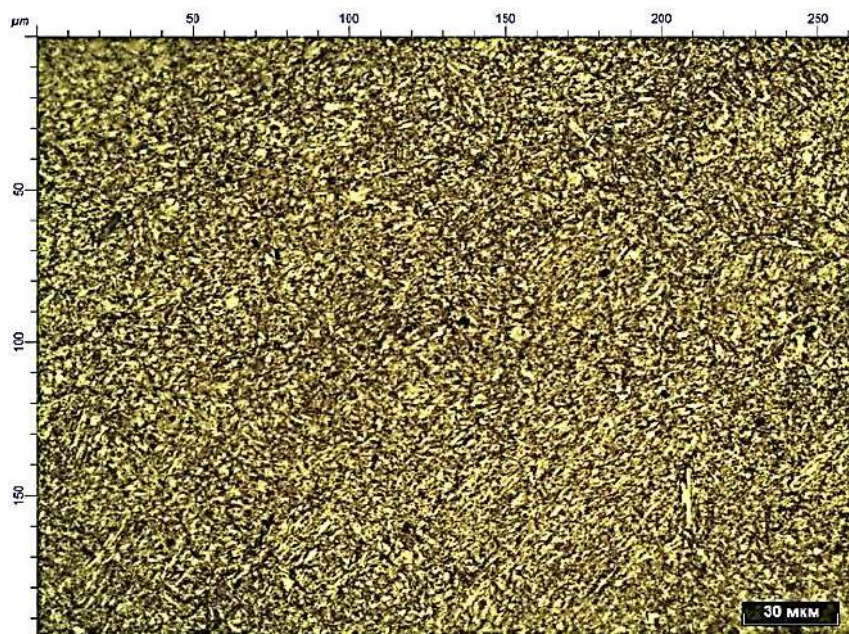


а

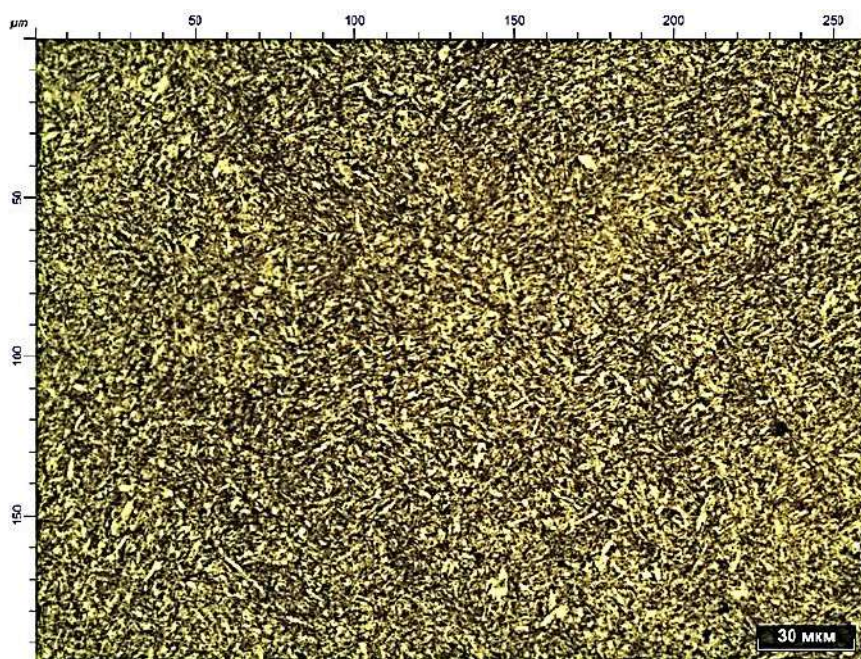


б

Рисунок 1 – Структура плавков из стали 35ХГСЛ: а – плавка 1; б – плавка 4



а



б

Рисунок 2 – Структура плавков из стали 35ХГСЛ: а – плавка 3; б – плавка 7

Предварительная термическая обработка проводилась по способу согласно карте типового технологического процесса №140 [6], окончательная термическая обработка, согласно ОСТ 1 90093-82.

Следующим этапом являлось металлографическое исследование образцов. При изучении структуры позволяет: выявить структурные составляющие, которые оказывают разрушающее действие на металл; какие структуры преобладают в большей или меньшей степени для развития микролокальной деформации, которая провоцирует разрушение.

Для металлографического исследования были выбраны плавки 1, 3, 4, 7. На данных плавках произведены шлифы и протравлены до выявления микроструктуры. На рисунках 1 и 2 приведены микроструктуры четырех образцов.⁷

Микроскопический анализ образцов показал, что структура металла всех образцов практически идентична и образована зернами сорбита.

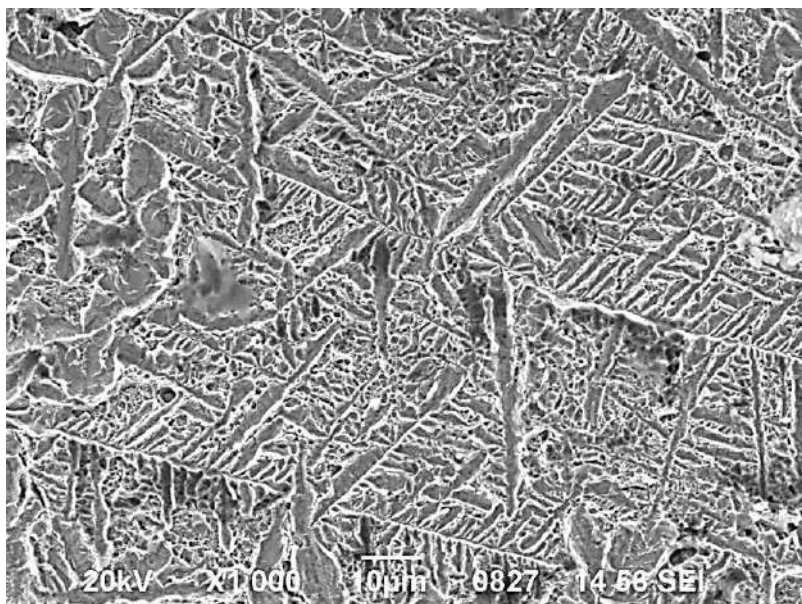


Рисунок 3 – Фотоснимок камневидного излома при помощи растровой электронной микроскопии

При изучении изломов образцов плавки 4 предполагалось, что камневидный излом образовался по специфическим пленкам, образованные нитридами алюминия (при анализе химического состава данной стали выявлено содержание алюминия около 0,08%), которая может образовываться в легированных сталях при перегреве.

Для подтверждения данной версии образец было проведено исследование излома при помощи растровой электронной микроскопии с катодом из борида лантана. Фотоснимок камневидного излома при помощи растровой электронной микроскопии представлен на рисунке 3.

На основании анализа результатов экспериментальных данных предполагаемая пленка нитридов алюминия не была обнаружена, поэтому данная версия образования камневидного излома не подтвердилась.

Литература

1. Чернышов Е.А., Евстигнеев А.И., Евлампиев А.А.. Литейные дефекты. Причины образования. Способы предупреждения и исправления: Учебное пособие // М.: Машиностроение. 2008. 282с.
2. Дефекты отливок [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.modificator.ru>.
3. Новоклещева С.М., Виноград М.И. Дефекты стали // М: Металлургия. 1984. 199 с.
4. Герасимова Л.П., Ершов А.А. Изломы конструкционных сталей // М: Металлургия. 1987. 272 с.
5. Гольдштейн Я.Е., Лазарева М.П. Влияние редких металлов и серы на образование камневидного излома [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.amerest.ru>.
6. КТПП литья №140. Предварительная термическая обработка отливок из сталей 35ХГСЛ, 27ХГСНМЛ, 25Л, 35Л // АО «ВМП «АВИТЕК». 1996. 32 с.
7. Механические свойства металлов [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://elhow.ru>.

УДК 665.939.57

**Новый облегчённый компаунд для герметизации
электрорадиоизделий ракетно-космической техники**

П.А. Щеглов, аспирант кафедры «Управления качеством и стандартизации»,
А.В. Шишилов, аспирант кафедры «Управления качеством и стандартизации»,
Государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования Московской области
«Технологический университет», г. Королев, Московская область

В настоящее время для заливки монтажных объемов соединителей и сборочных единиц ЭРИ при производстве аппаратуры СУ РН применяется облегченный заливочный эластичный компаунд ЭЗК-М. Данный компаунд является облегченным, масло- и водостойким, вибро- и ударопрочным. Однако, из-за прекращения производства в России основных компонентов, входящих в состав компаунда ЭЗК-М: касторового масла технического, бутилметакрилата, аэросила марки А-175, в настоящее время для его приготовления используются импортные компоненты, в частности, производства компаний «Magnaflor BASF», Германия и «Ameo Castor & Derivatives LTD», Индия. В связи с этим возникла необходимость разработки эластичного заливочного облегченного компаунда на базе отечественного сырья. Авторами предложено в рецептуре нового компаунда ЭЛК-М использовать низковязкие олигоэфирэпоксиды, отвердители и наполнители российского производства. Данная разработка позволит создать системы защиты и герметизации бескорпусных полупроводниковых приборов и интегральных схем, снизить массу и габариты микро- и электронных изделий, обеспечить их высокую надежность и длительную работоспособность. Так как разработанный компаунд будет применяться при производстве бортовой аппаратуры изделий РКТ, то к нему предъявляются повышенные требования к качеству.

Качество, плотность, компаунд, наночастицы.

**The new facilitated compound for sealing of electroradio products of the
missile and space equipment**

P.A. Shcheglov, graduate student «Quality Managements and Standardization»
departments,
A.V. Shishilov, graduate student «Quality Managements and Standardization»
departments,
State Educational Institution of Higher Education
Moscow Region «University of technology», Korolev, Moscow region

Now the facilitated potting elastic compound of EZK-M apply to filling of assembly volumes of connectors and assembly units of ERP by production of the equipment of control systems of launch vehicle. This compound is facilitated, oil- and

waterproof, vibro- and impact-resistant. However, because of cessation of production in Russia of the principal components which are a part of a compound of EZK-M: a castor oil technical, butylmethacrylate, an aerosil of the A-175 brand, now for its preparation imported components, in particular, of production of the companies «Magnaflos BASF», Germany and Ameer Castor & Derivatives LTD, India are used. In this regard there was a need of development of the elastic potting facilitated compound on the basis of domestic raw materials. Authors it is offered to use thin oligoetherepoksi-substances, hardeners and excipients of the Russian production in a compounding of a new compound of ELK-M. This development will allow creating the systems of protection and potting of caseless semiconductor devices and chips, to reduce the weight and dimensions of microelectronic and electronic products, to provide their high reliability and the long-lived serviceability. As the developed compound will be applied by production of the onboard equipment of products RCT, increased requirements to quality are imposed to it.

Quality, density, compound, nanoparticles.

Для применения в области ракетно-космической техники вместо компаунда ЭЗК-М, содержащего импортные компоненты, не производящиеся на территории РФ, авторами был разработан эластичный заливочный облегченный компаунд на базе отечественного сырья. Разработанный компаунд ЭЛК-М является двухкомпонентным в отличие от семикомпонентного компаунда ЭЗК-М, что обеспечивает более технологичное приготовление и упрощает применение в производственных условиях.

Эластичный заливочный облегченный компаунд ЭЛК-М готовится из компонентов 1 (связующее) и 2 (отвердитель) в соотношении 3:1. Компоненты 1 и 2 в отвшенных количествах тщательно перемешиваются до получения однородной пастообразной массы.

В связи с широкой областью применения компаунда ЭЛК-М разработаны две его модификации – компаунд марки ЭЛК-М-4 и компаунд марки ЭЛК-М-5.

В качестве полимерного связующего компаунда марки ЭЛК-М-4, компонента 1, авторами выбрана смола эпоксифенольная теплостойкая, модифицированная различными низковязкими низкомолекулярными и монофункциональными ароматическими олигоэфирэпоксидами. В компаунде марки ЭЛК-М-5 в качестве полимерной основы использовался эпоксиуретановый каучук, модифицированный также различными низковязкими низкомолекулярными и монофункциональными ароматическими олигоэфирэпоксидами [1].

Эпоксидными смолами называют соединения, которые содержат больше одной эпоксидной или глицидиловой группы (рис. 1), расположенных на концах, вдоль основной цепи молекулы или в кольце алицикла. Из-за своей высокой реакционной способности эпоксидные группы могут взаимодействовать с многими соединениями, образуя полимеры пространственного строения.

В составе компаунда ЭЛК-М используются дегидрохлорированные низковязкие олигоэфирэпоксида взамен стандартных, поскольку примеси хлора и хлорсодержащих соединений являются причиной коррозии при наличии влаги. Для этого в технологический процесс изготовления компаунда была введена

дополнительная стадия дегидрогалогенирования сырья, использующегося для его приготовления [2]. Способ, которым проводится дегидрогалогенирование, значительно дешевле, чем известные способы, применяющиеся в России и зарубежом, согласно результатам патентного поиска глубиной 20 лет [3].



Рисунок 1 – Эпоксидная и глицидиловая группы эпоксидных соединений

Отверждение разрабатываемого компаунда проходит за счет применения отвердителя аминного типа – компонент 2.

Для получения компаунда с низкой плотностью в компоненты 1 и 2 введен наполнитель – микросферы стеклянные полые, имеющие размер от 10 до 100 нанометров.

В ходе работы были проведены экспериментальные исследования компаундов марки ЭЛК-М-4 и марки ЭЛК-М-5 по определению эксплуатационных характеристик при различных температурах (от минус 60 °С до плюс 90 °С):

- технологических (жизнеспособность, время отверждения)(табл. 1);
- физических (плотность, усадка) (табл. 2);
- теплофизических (коэффициент линейного температурного расширения, температура стеклования) (рис. 2-3), (табл. 3);
- механических (прочность клеевых соединений при сдвиге, растяжении и относительное удлинение при растяжении) (табл. 4-6);
- электрических (удельное объемное электрическое сопротивление, диэлектрическая проницаемость, тангенс угла диэлектрических потерь) (табл. 7).

Таблица 1 – Технологические свойства

Марка компаунда	Жизнеспособность, ч	Время отверждения, ч
ЭЛК-М-4	1,5	15,0
ЭЛК-М-5	1,5	11,5
ЭЗК-М	1,0	24,0

Из приведенных данных в таблице 1 видно, что компаунды марок ЭЛК-М-4 и ЭЛК-М-5 имеют большее время жизнеспособности по сравнению с ЭЗК-М, что дает возможность использовать компаунд более длительное время и избежать потерь компаунда, а также разработанные марки компаундов быстрее отверждаются и тем самым облегчают применение в производственных условиях.

Таблица 2 – Показатели плотности и усадки компаунда

Марка компаунда	Плотность, г/см ³	Усадка, %	
		(20±5) °С	(90±5) °С
ЭЛК-М-4	<u>0,62 - 0,65</u> 0,64	менее 0,01	<u>0,11 - 0,23</u> 0,16
ЭЛК-М-5	<u>0,55 - 0,59</u> 0,57	менее 0,01	<u>0,01 - 0,1</u> 0,05
ЭЗК-М	<u>0,76 - 0,79</u> 0,77	<u>0,38 - 0,41</u> 0,40	-

Примечание – Показатели представлены в виде дроби: в числителе минимальное и максимальное из пяти значений, полученных на образцах; в знаменателе – среднее значение.

Как видно из таблицы 2 показатель плотности компаундов марки ЭЛК-М-4 и ЭЛК-М-5 ниже показателя плотности компаунда ЭЗК-М. При нормальных условиях усадка разработанных компаундов практически отсутствует, при 90 °С незначительно увеличивается.

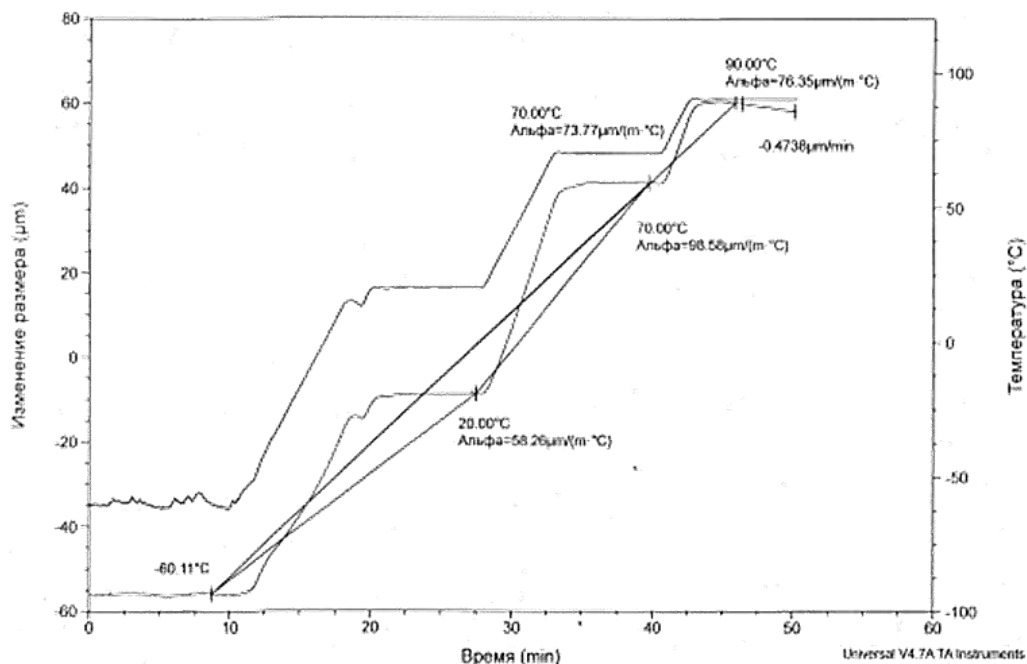


Рисунок 2 – Кривая ТМА компаунда марки ЭЛК-М-4

По кривой ТМА, изображенной на рисунке 2, видно, что компаунд марки ЭЛК-М-4 начинает проявлять усадку при 90 °С.

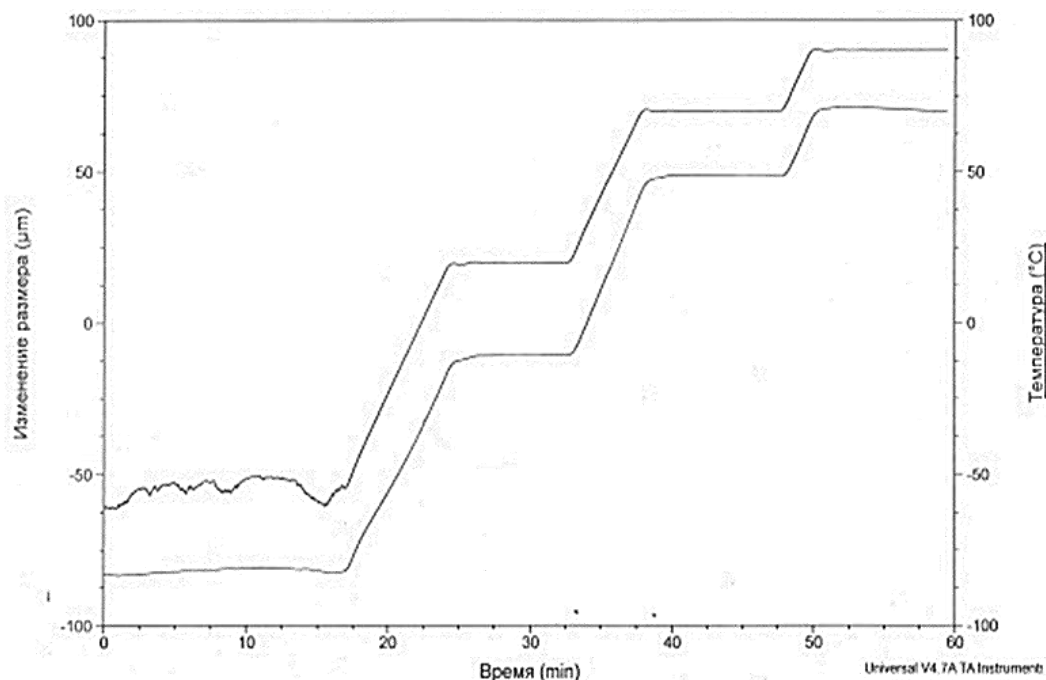


Рисунок 3 – Кривая ТМА компаунда марки ЭЛК-М-5

По кривой ТМА на рисунке 3, видно, что в интервале температур от минус 60 °С до плюс 90 °С компаунд ЭЛК-М практически не имеет усадки. Коэффициент теплового линейного расширения (КЛТР) и температура стеклования определены на образцах – цилиндрах высотой 15 мм и диаметром 3 мм по ГОСТ 32618.2 (табл. 3).

Таблица 3 – Показатели КЛТР и температура стеклования

Марка компаунда	$\alpha \cdot 10^6, K^{-1}$ в диапазоне температур, °С					Температура стеклования, °С
	-60 ÷ 20	-60 ÷ 70	-60 ÷ 90	20 ÷ 70	20 ÷ 90	
ЭЛК-М-4	58	74	76	99	97	38,5
ЭЛК-М-5	97	110	111	129	126	28,1

Из таблицы видно, что лучшим коэффициентом линейного теплового расширения во всём диапазоне температур обладает компаунд марки ЭЛК-М-4.

Определения механических характеристик компаунда проводили на образцах:

- из алюминиевого сплава марки Д-16, размерами (70x20x2) мм – прочность на сдвиг по ГОСТ 14759;

- лопаток тип 2 по ГОСТ 11262 для определения прочности при разрыве и относительного удлинения при растяжении по ГОСТ 11262.

Испытания проведены при температурах: (23 ± 2) °С, минус (60±5) °С и (90 ± 5) °С (табл. 4 - 6).

Таблица 4 – Прочность при сдвиге при различных температурах

Марка компаунда	Прочность при сдвиге, ($\tau_{сдв.}$), МПа при температуре испытания		
	(20±5) °С	(90±5) °С	минус (60±5) °С
ЭЛК-М-4	$\frac{3,37 - 3,81}{3,63}$	$\frac{1,27 - 1,54}{1,40}$	$\frac{4,06 - 4,51}{4,3}$
ЭЛК-М-5	$\frac{2,55 - 3,00}{2,49}$	$\frac{1,85 - 1,89}{1,87}$	$\frac{19,1 - 22,1}{24,1}$

Примечание – Показатели представлены в виде дроби: в числителе минимальное и максимальное из пяти значений, полученных на образцах; в знаменателе – среднее значение

Таблица 5 – Прочность при разрыве при различных температурах

Марка компаунда	Прочность при разрыве, (σ_p), МПа при температуре испытания		
	(20±5) °С	(90±5) °С	минус (60±5) °С
ЭЛК-М-4	$\frac{2,06 - 2,39}{2,16}$	$\frac{1,7 - 2,86}{2,46}$	$\frac{17,7 - 36,3}{25,2}$
ЭЛК-М-5	$\frac{0,94 - 1,01}{0,98}$	$\frac{1,06 - 1,96}{1,51}$	$\frac{12,9 - 23,5}{16,3}$

Примечание – Показатели представлены в виде дроби: в числителе минимальное и максимальное из пяти значений, полученных на образцах; в знаменателе – среднее значение

Из таблиц 4 и 5 можно сделать вывод, что компаунд ЭЛК-М марок ЭЛК-М-4 и ЭЛК-М-5 при различных температурах сохраняет свои прочностные характеристики, обеспечивающие работоспособность изделий в температурном интервале от минус 60 °С до плюс 90 °С.

Таблица 6 – Относительное удлинение при растяжении при различных температурах

Марка компаунда	Относительное удлинение при растяжении, ($\epsilon_{отн.}$), %		
	(20±5) °С	(90±5) °С	минус (60±5) °С
ЭЛК-М-4	$\frac{10,5 - 14,2}{12,0}$	$\frac{3,28 - 5,38}{4,2}$	$\frac{1,06 - 2,43}{1,76}$
ЭЛК-М-5	$\frac{38,0 - 44,1}{40,8}$	$\frac{5,37 - 8,35}{6,92}$	$\frac{3,42 - 6,49}{4,7}$
ЭЗК-М	$\frac{10,4 - 11,3}{10,9}$	-	-

Примечание – Показатели представлены в виде дроби: в числителе минимальное и максимальное из пяти значений, полученных на образцах; в знаменателе – среднее значение

Относительное удлинение при нормальных условиях компаунда ЭЛК-М обеих марок превышает относительное удлинение компаунда ЭЗК-М, причем показатель относительного удлинения марки ЭЛК-М-4 составляет в среднем 13%, а ЭЛК-М-5 – 42%, что позволяет обеспечить широкую область применения компаунда.

Определение диэлектрических характеристик компаундов (удельное объемное электрическое сопротивление, тангенс угла диэлектрических потерь, диэлектрическая проницаемость) проводили на образцах – дисках диаметром (50±0,5) мм и толщиной (2±0,2) мм (табл. 7).

Таблица 7 – Диэлектрические характеристики компаундов

Марка компаунда	Удельное объемное электрическое сопротивление, ρ_v , Ом см	Тангенс угла диэлектрических потерь, $\text{tg } \delta$	Диэлектрическая проницаемость, ϵ
ЭЛК-М-4	$\frac{(0,7 - 14,4) \cdot 10^{13}}{8,7 \cdot 10^{13}}$	$\frac{0,028 - 0,038}{0,036}$	$\frac{2,71 - 3,04}{2,9}$
ЭЛК-М-5	$\frac{(0,6 - 8,3) \cdot 10^{14}}{4,17 \cdot 10^{14}}$	$\frac{0,009 - 0,017}{0,014}$	$\frac{1,87 - 2,38}{2,07}$
ЭЗК-М	$\frac{(2,1 - 2,7) \cdot 10^{13}}{2,4 \cdot 10^{13}}$	$\frac{0,026 - 0,037}{0,03}$	$\frac{2,4 - 3,0}{2,8}$

Примечание – Показатели представлены в виде дроби: в числителе минимальное и максимальное из пяти значений, полученных на образцах; в знаменателе – среднее значение

Из таблицы 7 видно, что диэлектрические характеристики компаундов марок ЭЛК-М-4 и ЭЛК-М-5 не уступают показателям компаунда ЭЗК-М.

С целью оценки сохраняемости свойств компаунда в составе изделий в течение 25 лет проведены ускоренные климатические испытания (УКИ) эластичного заливочного облегченного компаунда (табл. 8,9).

Таблица 8 – Диэлектрические характеристики компаунда после УКИ

Имитация сроков хранения	Марка компа-унда	Удельное объемное электрическое сопротивление, ρ_v , Ом · см	Тангенс угла диэлектрических потерь	Диэлектрическая проницаемость
Контрольные	ЭЛК-М-4	$\frac{(0,7 - 14,4) \cdot 10^{13}}{8,7 \cdot 10^{13}}$	$\frac{0,033 - 0,038}{0,036}$	$\frac{2,71 - 3,04}{2,9}$
	ЭЛК-М-5	$\frac{(0,6 - 8,3) \cdot 10^{13}}{4,17 \cdot 10^{13}}$	$\frac{0,009 - 0,017}{0,014}$	$\frac{1,87 - 2,38}{2,07}$
25 лет	ЭЛК-М-4	$\frac{(1,76 - 7,79) \cdot 10^{13}}{3,77 \cdot 10^{13}}$	$\frac{0,029 - 0,037}{0,033}$	$\frac{2,78 - 2,97}{2,83}$

	ЭЛК-М-5	$\frac{(0,3 - 1,4) \cdot 10^{14}}{0,7 \cdot 10^{14}}$	$\frac{0,023 - 0,031}{0,027}$	$\frac{2,39 - 2,69}{2,50}$
Примечание – Показатели представлены в виде дроби: в числителе минимальное и максимальное из пяти значений, полученных на образцах; в знаменателе – среднее значение.				

Таблица 9 – Прочность при сдвиге, разрыве и относительное удлинение при растяжении компаунда после УКИ

Имитация сроков хранения	Марка компаунда	Прочность при сдвиге, ($\tau_{сдв.}$), МПа	Прочность при разрыве, (σ_p), МПа	Относительное удлинение при растяжении, ($\epsilon_{отн.}$), %
Контрольные	ЭЛК-М-4	$\frac{3,37-3,81}{3,63}$	$\frac{2,06 - 2,39}{2,16}$	$\frac{10,5 - 14,2}{12,0}$
	ЭЛК-М-5	$\frac{1,55 - 2,00}{1,74}$	$\frac{0,94 - 1,01}{0,98}$	$\frac{28,0 - 34,1}{30,8}$
15 лет	ЭЛК-М-4	$\frac{18,2 - 19,4}{18,8}$	$\frac{9,67 - 11,79}{10,23}$	$\frac{4,1 - 6,5}{5,3}$
	ЭЛК-М-5	$\frac{5,8 - 6,4}{6,1}$	$\frac{1,51 - 2,39}{2,05}$	$\frac{39,2 - 41,4}{40,2}$
Примечание – Показатели представлены в виде дроби: в числителе минимальное и максимальное из пяти значений, полученных на образцах; в знаменателе – среднее значение.				

По результатам испытаний УКИ авторами было установлено, что свойства компаунда имеют тенденцию к дальнейшему повышению.

Кроме УКИ авторы провели также испытания по определению коррозионной агрессивности (активности) по ГОСТ 9.902 эластичного заливочного облегченного компаунда марок ЭЛК-М-4 и ЭЛК-М-5 по отношению к алюминиевому сплаву марки Д-16, меди марки М1, свинцово-оловянному (Pb-Sn) припою ПОС-61.

Анализ полученных результатов показал, что компаунды марок ЭЛК-М-4 и ЭЛК-М-5, согласно ГОСТ 9.902-81, не проявляют коррозионной агрессивности к алюминиевому сплаву Д-16, меди марки М-1 и припою марки ПОС-61. Отслоений компаундов от подложек не наблюдалось. После удаления компаундов поверхность исследованных образцов соответствует поверхности контрольных (не контактировавших с компаундами) образцов или находится в лучшем состоянии.

Были изготовлены и испытаны макеты сборочных единиц ЭРИ (кабелей с соединителями) с эластичным заливочным облегченным компаундом (рис. 3-4). По результатам испытаний установлено, что макеты сборочных единиц ЭРИ (кабели с соединителями), монтажные объемы которых залиты разработанным и изготовленным облегченным компаундом ЭЛК-М (образцы ЭЛК-М-4 и ЭЛК-М-

5), после механических и климатических испытаний сохранили внешний вид и работоспособность.



Рисунок 3 – Фотография макетного образца ЭРИ, изготовленного с использованием облегченного компаунда ЭЛК-М



Рисунок 4 – Фотография макетного образца ЭРИ, изготовленного с использованием образца облегченного компаунда ЭЛК-М

Подводя итоги, следует отметить, что в настоящий момент авторам удалось добиться следующего:

1. Компаунд ЭЛК-М разработан полностью на основе отечественного сырья взамен компаунда ЭЗК-М, содержащего импортные компоненты.

2. Компаунд ЭЛК-М по сравнению с компаундом ЭЗК-М является более технологичным и имеет улучшенные физико-механические и диэлектрические характеристики.

3. Применение в составе компаунда ЭЛК-М дегидрогалогенированных компонентов обеспечивает отсутствие коррозионной активности.

4. Использование стеклянных микросфер размером от 10 до 100 нанометров обеспечивает более низкую плотность компаунда ЭЛК-М обеих марок, чем у применяющегося в настоящее время компаунда ЭЗК-М, что в свою очередь обеспечивает снижение массы деталей, залитых компаундом ЭЛК-М, а, следовательно, позволяет за счёт этого увеличить полезную нагрузку ракеты.

Литература

1. Антипова Е.А., Короткова Н.П., Лебедев В.С. Современные полиуретановые, эпоксидные ПУ–акрилатные и эпоксиакрилатные связующие для промышленных ЛКМ производства ООО «НПП «Макромер» // Лакокрасочные материалы и их применение № 9. 2012. С. 14-21.
2. Фирсов В.А., Волошкин А.Ф., Негрובה Л.П. и др. Проблемы создания эпоксидных пресс-материалов для герметизации интегральных микросхем // Пластические массы. 1994. № 2. С. 3-7.
3. Щеглов П.А., Шестаков А.С., Вялов А.И. Содержание хлора в эпоксидных смолах и оценка его влияния на качество продукции на их основе // Информационно-технологический вестник № 3(13). 2017. С. 137-145.