

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)

Свидетельство о регистрации
ПИ № ФС77-64098
от 18 декабря 2015 г.

Учредитель – Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

Московской области «Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза, летчика-космонавта А.А. Леонова»

(141074, Московская область, г. Королев, ул. Гагарина, д. 42)
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 научные специальности в рамках групп научных специальностей, по которым издание входит в Перечень*:
2. Технические науки; 2.2. Электроника, фотоника, приборостроение и связь; 2.3. Информационные технологии и телекоммуникации [2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации; 2.3.5. Математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей], *(не входит в Перечень ВАК);
2.5. Машиностроение [2.5.13. Проектирование конструкции и производство летательных аппаратов], (входит в Перечень ВАК);
2.6. Химические технологии, науки о материалах, металлургия; [2.6.17. Материаловедение] *(входит в Перечень ВАК)

Подписной индекс в каталоге
«Почта России» ПП1997

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

Над выпуском работали
Паршина Ю.С.
Пирогова Е.В.
Багдасарян А.А.
Харитоновна А.А.
Макаревич 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

Редакция не несет ответственности за достоверность информации в материалах, в том числе рекламных, предоставленных авторами для публикации
Материалы приводятся в авторской редакции.

СОДЕРЖАНИЕ

ПРОЕКТИРОВАНИЕ, КОНСТРУКЦИЯ И ПРОИЗВОДСТВО ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Артюшенко В.М., Воловач В.И.

ТОЧНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННОГО ПАРАМЕТРА СИГНАЛА СЛЕДЯЩИМ ИЗМЕРИТЕЛЕМ В АВИАЦИОННОЙ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКЕ НА ФОНЕ АДДИТИВНЫХ И МУЛЬТИПЛИКАТИВНЫХ ПОМЕХ. ИЗМЕРЕНИЕ ВРЕМЕНИ ПРИХОДА. ЧАСТЬ III.....3

Бершадский В.А.

ПРОБЛЕМЫ МНОГОКРАТНОГО ПРИМЕНЕНИЯ ДВИГАТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК ЖИДКОСТНЫХ РАКЕТ.....16

Виноградов Д.Ю.

КРАТНЫЕ СОЛНЕЧНО-СИНХРОННЫЕ ОРБИТЫ ПОЛНОГО ПОКРЫТИЯ ЗЕМЛИ.....28

Вокин Г.Г., Егоров О.В.

КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ ЧИСЛЕННО-ЭКСПЕРТНОГО МЕТОДА СИНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ СЛОЖНЫХ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ ПРИ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОМ ИХ АВАНПРОЕКТИРОВАНИИ.....42

Рудаков В.Б.

СТАТИСТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ СТРУКТУРОЙ НА ЭТАПЕ НАЗЕМНОЙ ОТРАБОТКИ.....49

Степанов Г.Н.

ЧИСЛЕННО-ЭКСПЕРТНЫЙ СПОСОБ ВЫБОРА ПАРАМЕТРОВ СОЛНЕЧНО-СИНХРОННЫХ ОРБИТ ДЛЯ ПОЛНОМАСШТАБНОГО МОНИТОРИНГА СЕВЕРНЫХ РАЙОНОВ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ...62

Эртман Л.В., Рудаков В.Б.

ОЦЕНКА ГОТОВНОСТИ ОБОРУДОВАНИЯ СТАРТОВОГО КОСМИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА НА РАННИХ ЭТАПАХ ЕГО СОЗДАНИЯ.....74

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

Арешев Д.С.

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ ПРИ АЭРОФОТОСЪЕМКЕ БЕСПИЛОТНЫМИ ЛЕТАТЕЛЬНЫМИ АППАРАТАМИ.....83

Мосалов О.П., Иванов И.А., Першин М.А.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ КЛАСТЕРИЗАЦИИ И МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ РЕКОМЕНДАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ АКТУАЛЬНОСТИ НАУЧНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ.....89

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

1. **Барканов Е.Н.**, Dr.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. **Аббасов Э.М.**, к.т.н.
2. **Аббасова Т.С.**, к.т.н., доцент
3. **Бухаров С.В.**, д.т.н., профессор
4. **Бершадский В.А.**, д.т.н., профессор кафедры
5. **Воловач В.И.**, д.т.н., профессор
6. **Кучеров Б.А.**, к.т.н.
7. **Логачев И.А.**, к.т.н.
8. **Логачева А.И.**, д.т.н., профессор
9. **Макаров М.И.**, д.т.н., профессор
10. **Матвиенко Ю.Г.**, д.т.н., профессор
11. **Мороз А.П.**, д.т.н., профессор
12. **Мосалов О.П.**, к.ф.-м.н.
13. **Разумовский И.М.**, д.ф.-м.н., профессор
14. **Рудаков В.Б.**, д.т.н., профессор
15. **Самаров Е.К.**, д.т.н., доцент
16. **Скрябин М.Л.**, к.т.н.
17. **Соляной В.Н.**, к.т.н.
18. **Стрэналок Ю.В.**, д.т.н., профессор
19. **Халиулин В.И.**, д.т.н., профессор
20. **Чесноков А.В.**, д.т.н.
21. **Щурин К.В.**, д.т.н., профессор

Подписано в печать 15.12.2021

Формат В5

Печать офсетная. Усл.печ.л. 10,2

Тираж 500 экз.

Заказ № 91-04

Отпечатано в типографии

ООО «Научный консультант»

г. Москва

Хорошевское шоссе, 35, корп.2

Скворцов В.С., Лазаренко О.И.

МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ СТАТИЧЕСКОЙ РЕГРЕССИОННОЙ МНОГОФАКТОРНОЙ МОДЕЛИ ПО ДАННЫМ ЭКСПЕРИМЕНТА С ФАКТОРНЫМ ПЛАНИРОВАНИЕМ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ГИРОСКОПА.....103

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ, КОМПЛЕКСОВ И КОМПЬЮТЕРНЫХ СЕТЕЙ

Крысин И.А., Гаврилов К.А.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ НЕЙРОСЕТЕВОГО ПОДХОДА В РЕШЕНИИ ЗАДАЧИ ОБНАРУЖЕНИЯ ЛИЦ.....111

Мосалов О.П.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДОСТОВЕРНОСТИ ТЕКСТОВ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ ЕСТЕСТВЕННОГО ЯЗЫКА.....118

Светушков Н.Н., Перепелица К.А.

СРЕДСТВА ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ВЫБОРА ПОДХОДА ПРИ РЕШЕНИИ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ЗАДАЧИ КОММИВОЯЖЁРА.....127

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Абразумов В.В., Фролов С.В., Токарева О.В.

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ ОГНЕЗАЩИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ В УСЛОВИЯХ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ.....137

Титова В.А., Рева В.П.

МЕХАНИЧЕСКАЯ АКТИВАЦИЯ ЦИРКОНИЯ СОВМЕСТНО С ДЕСТРУКТИРУЕМЫМ ПОЛИМЕРОМ В РАЗЛИЧНЫХ АТМОСФЕРАХ.....148

Фролов С.В.

АНАЛИЗ ОЦЕНКИ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ И ПОГРЕШНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МАТЕРИАЛОВ.....155

УДК 621.396.96:621.26

Точность измерения информационного параметра сигнала следящим измерителем в авиационной и ракетно-космической технике на фоне аддитивных и мультипликативных помех.

Измерение времени прихода. Часть III

В.М. Артюшенко, доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой информационные технологии
и управляющие системы,

Государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования Московской области

«Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза,
летчика-космонавта А.А. Леонова», 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

Рассмотрено и проанализировано влияние мультипликативных помех, действующих одновременно с аддитивными помехами, на точность измерения времени прихода информационного сигнала следящим измерителем. Проанализированы зависимости отношения дисперсии измерения времени прихода при наличии мультипликативных и аддитивных помех к дисперсии измерения времени прихода при наличии только аддитивных помех.

Следящий измеритель, мультипликативные и аддитивные помехи, точность измерения времени прихода информационного сигнала, дисперсия измерения.

The accuracy of measuring the information parameter of the signal by a tracking meter in aviation and rocket and space technology against the background of additive and multiplicative interference.

Measurement of arrival time. Part III

V.M. Artyushenko, doctor of Technical Sciences, Professor,
head of the Department of information technologies and control systems,
State Budgetary Educational Institution of Higher Education of the Moscow Region
«Technological University named after twice Hero of the Soviet Union,
pilot-cosmonaut A.A. Leonov», 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 influence of multiplicative interference acting simultaneously with additive

interference on the accuracy of measuring the time of arrival of the information signal by the tracking meter is considered and analyzed. The dependences of the ratio of the variance of the arrival time measurement in the presence of multiplicative and additive interference to the variance of the arrival time measurement in the presence of only additive interference are analyzed.

Tracking meter, multiplicative and additive interference, accuracy of measuring the time of arrival of the information signal, measurement variance.

Когерентный входной сигнал. Для когерентной последовательности импульсов с комплексной огибающей

$$\dot{U}(t) = U_{\text{ор}}(t) \sum_{k=-\infty}^{\infty} \dot{U}_1(t - kT_{\text{п}}), \quad (1)$$

где $U_{\text{ор}}(t)$, $\dot{U}_1(t)$ – комплексные огибающие пачки импульсов и отдельного импульса, причем $U_{\text{ор}}(t)_{\text{max}} = 1$, $|\dot{U}_1(t)|_{\text{max}} = 1$, функция автокорреляции по частоте имеет вид [3]

$$\dot{\rho}(0, \omega) = \frac{Q_c}{T_3 T_{\text{п}}} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \dot{W}_1\left(0, \frac{2\pi k}{T_{\text{п}}}\right) \dot{W}_{\text{ор}}\left(0, \omega - \frac{2\pi k}{T_{\text{п}}}\right),$$

где

$$\dot{W}_1(0, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} |\dot{U}_1(t)|^2 \exp(j\omega t) dt;$$

$$\dot{W}_{\text{ор}}(0, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} U_{\text{ор}}^2(t) \exp(j\omega t) dt;$$

$T_3 = \int_{-\infty}^{\infty} U_{\text{ор}}^2(t) dt$ – эквивалентная длительность квадрата огибающей сигнала (1); $Q_c = T_{\text{п}}/T_1$ – скважность когерентной последовательности импульсов; $T_1 = \int_{-\infty}^{\infty} |\dot{U}_1(t)|^2 dt = W_1(0,0)$ – эквивалентная длительность каждого импульса последовательности; $T_{\text{п}}$ – период повторения когерентной последовательности импульсов.

Периодически повторяющиеся когерентные сигналы (1) имеют двумерную функцию автокорреляции вида [3]

$$\dot{\rho}(\tau, \omega) = \frac{Q_c}{T_3 T_{\text{п}}} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \dot{W}_1\left(\tau - nT_{\text{п}}, \frac{2\pi k}{T_{\text{п}}}\right) \dot{W}_{\text{ор}}\left(\tau, \omega - \frac{2\pi k}{T_{\text{п}}}\right),$$

где

$$\dot{W}_1(\tau, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \dot{U}_1(t) U_1^*(t - \tau) \exp\{j\omega t\} dt;$$

$$\dot{W}_{\text{ор}}(\tau, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} U_{\text{ор}}(t) U(t - \tau) \exp\{j\omega t\} dt.$$

В предельном случае при увеличении длительности огибающей когерентного сигнала

$$\dot{\rho}(\tau, \omega) \rightarrow \frac{Q_c}{T_3 T_{\text{п}}} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \dot{W}_1(\tau - nT_{\text{п}}, \omega) \sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta\left(\omega - \frac{2\pi k}{T_{\text{п}}}\right).$$

Для рассматриваемого сигнала функция $\dot{\lambda}(\Delta_{\tau}, \omega)$ [см. (13) [1]], при тех же предположениях, равна

$$\dot{\lambda}(\Delta_{\tau}, \omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \dot{g}_{\phi}(\Omega) \rho^*(\Delta_{\tau}, \Omega - \omega) d\Omega \simeq$$

$$\simeq \frac{Q_c}{T_3 T_{\text{п}}} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \dot{g}_{\phi}\left(\frac{2\pi k}{T_{\text{п}}} - \omega\right) \dot{W}_1^*\left(\Delta_{\tau} - nT_{\text{п}}, \frac{2\pi k}{T_{\text{п}}}\right).$$

Учитывая, что в реальных измерителях выполняется соотношение

$\Delta_\tau \ll T_n$, окончательно для $\dot{\lambda}(\Delta_\tau, \omega)$ получим

$$\dot{\lambda}(\Delta_\tau, \omega) = \frac{Q_c}{T_n} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \dot{g}_\Phi \left(\omega - \frac{2\pi k}{T_n} \right) W_1^* \left(\Delta_\tau, \frac{2\pi k}{T_n} \right). \quad (2)$$

Подставляя (2) в [(19) [1]], получим для случая, когда систематическая ошибка измерения отсутствует,

$$\begin{aligned} \frac{k_d}{k_{d,0}} &= \alpha_0^2 + \frac{1}{2\pi} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \frac{\frac{d}{d\varepsilon} |\dot{\rho}_1(\varepsilon - \Delta_\tau, \frac{2\pi k}{T_n})|_{\varepsilon=0}^2}{\frac{d}{d\varepsilon} |\dot{\rho}_1(\varepsilon - \Delta_\tau)|_{\varepsilon=0}^2} \times \\ &\times \int_{-\infty}^{\infty} G_V(\Omega) G_\Phi \left(\Omega - \frac{2\pi k}{T_n} \right) d\Omega, \end{aligned} \quad (3)$$

где $\dot{\rho}_1(\tau, \omega)$ – функция автокорреляции одного импульса когерентной последовательности.

В (3) учтено, что в когерентно-импульсных системах выполняется соотношение

$$\dot{g}_\Phi \left(\omega - \frac{2\pi k}{T_n} \right) g_\Phi^* \left(\omega - \frac{2\pi m}{T_n} \right) = \begin{cases} G_\Phi \left(\omega - \frac{2\pi k}{T_n} \right) & k = m, \\ 0 & k \neq m, \end{cases}$$

причем для $G_\Phi(\omega)$ справедлива нормировка $G_\Phi(0) = 1$.

Выражение (3) существенно упрощается, если $G_V \left(\frac{2\pi k}{T_n} \right) \Big|_{k \neq m} = 0$. То есть, когда интервал корреляции функции помеховой модуляции много больше периода повторения T_n . Заметим, что условие $G_V \left(\frac{2\pi k}{T_n} \right) \Big|_{k \neq m} = 0$ является характерным для реальных когерентно-импульсных систем, в которых осуществляется однозначное измерение частоты или одновременное однозначное измерение частоты и времени прихода. При дальнейшем рассмотрении ограничимся именно этим случаем.

При этом

$$\frac{k_d}{k_{d,0}} = \alpha_0^2 + \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G_V(\Omega) G_\Phi(\Omega) d\Omega. \quad (4)$$

С учетом выше принятого условия $G_\Phi \left(\frac{2\pi k}{T_n} \right) \Big|_{k \neq m} = 0$, коэффициенты, учитывающие действие автоматической регулировки усиления (АРУ) в выражениях для дисперсии ошибок измерения, в рассматриваемом примере определяются соотношениями

$$\begin{aligned} \frac{k_{\text{АРУ}}}{k_{0,\text{АРУ}}} &= \left[|\dot{\rho}_1(\Delta_\tau)|^2 + \frac{2N_0 Q_c}{U^2} \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G_\Phi(\omega) d\omega \right]^{-1} \times \\ &\times \left[\alpha_0^2 |\dot{\rho}_1(\Delta_\tau)|^2 + \frac{1 - \alpha_0^2}{\Delta \Omega_M} |\dot{\rho}_1(\Delta_\tau)|^2 \int_{-\infty}^{\infty} G_{V_0}(\omega) G_\Phi(\omega) d\omega + \right. \\ &\left. + \frac{2N_0 Q_c}{U^2} \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G_\Phi(\omega) d\omega \right], \end{aligned} \quad (5)$$

$$\frac{k_{0,\text{АРУ}}}{k_{\text{н.АРУ}}} = |\dot{\rho}_1(\Delta_\tau)|^{-2} \left[|\dot{\rho}_1(\Delta_\tau)|^2 + \frac{2N_0 Q_c}{U^2} \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G_\Phi(\omega) d\omega \right],$$

$$\begin{aligned} \frac{k_{\text{АРУ}}}{k_{\text{н.АРУ}}} &= |\dot{\rho}_1(\Delta_\tau)|^{-2} \left[\alpha_0^2 |\dot{\rho}_1(\Delta_\tau)|^2 + \frac{1 - \alpha_0^2}{\Delta \Omega_M} |\dot{\rho}_1(\Delta_\tau)|^2 \times \right. \\ &\times \left. \int_{-\infty}^{\infty} G_{V_0}(\omega) G_\Phi(\omega) d\omega + \frac{2N_0 Q_c}{U^2} \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G_\Phi(\omega) d\omega \right]. \end{aligned}$$

При измерении времени прихода сигналов, для которых справедливо (4),

интегралы, входящие в выражение для G_{χ} , равны

$$\begin{aligned} I'_{11}(0, \Delta_{\tau}) &= \left(\frac{T_1}{T_n T_3}\right)^3 |\dot{\rho}_1(\Delta_{\tau})|^2 \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G_M(\Omega) G_{\Phi}^2(\Omega) d\Omega = I'_{11}(0, -\Delta_{\tau}), \\ I'_{12}(0, \Delta_{\tau}) &= \left(\frac{T_1}{T_n T_3}\right)^3 \rho_1^*(\Delta_{\tau}) \dot{\rho}_1(-\Delta_{\tau}) \dot{\rho}_1(2\Delta_{\tau}) \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G_M(\Omega) G_{\Phi}^2(\Omega) d\Omega, \\ I'_{51}(0, 0) &= \left(\frac{T_1}{T_n T_3}\right)^2 \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G_{\Phi}^2(\Omega) d\Omega, \\ I'_{51}(0, \Delta_{\tau}) &= \left(\frac{T_1}{T_n T_3}\right)^2 \dot{\rho}_1(2\Delta_{\tau}) \dot{\rho}_1(-2\Delta_{\tau}) \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G_{\Phi}^2(\Omega) d\Omega, \\ I'_{61}(0, \Delta_{\tau}) &= \left(\frac{T_1}{T_n T_3}\right)^4 |\dot{\rho}_1(\Delta_{\tau})|^4 \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G_V^2(\Omega) G_{\Phi}^2(\Omega) d\Omega = I'_{62}(0, \Delta_{\tau}) \\ I'_{61}(0, -\Delta_{\tau}) &= I'_{61}(0, \Delta_{\tau}) = I'_{62}(0, -\Delta_{\tau}), \\ I'_{63}(0, \Delta_{\tau}) &= I'_{63}(0, -\Delta_{\tau}) = \frac{1}{2} I'_{64}(0, \Delta_{\tau}) = \frac{1}{2} I'_{64}(0, -\Delta_{\tau}). \end{aligned}$$

Заметим, что для сигналов с четными функциями, описывающими закон изменения фазы сигнала, функция автокорреляции $\dot{\rho}_1(\tau, \omega)$ при $\omega = 0$ есть функция действительная.

Введем следующую нормировку энергетического спектра функции помеховой модуляции:

$$\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G_M(\Omega) d\Omega = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} [\alpha_0^2 \delta(\Omega) + G_V(\Omega)] d\Omega = \alpha_0^2 + \frac{\Delta\Omega_M}{2\pi} G_V(0) = 1,$$

что эквивалентно предположению о том, что мультипликативные помехи не изменяют мощности принимаемого сигнала.

Тогда при принятой нормировке спектра функция помеховой модуляции $G_M(\Omega)$ получим для таких сигналов следующее выражение, определяющее отношение спектральной плотности флюктуаций сигнала на выходе дискриминатора при наличии аддитивных и мультипликативных помех к спектральной плотности флюктуаций при наличии лишь аддитивных помех:

$$\begin{aligned} \frac{G_{\chi}}{G_{\chi 0}} &= \alpha_0^2 \rho_1^2(\Delta_{\tau}) [1 - \rho_1(2\Delta_{\tau}) + \frac{1-\alpha_0^2}{\Delta\Omega_M} \rho_1^2(\Delta_{\tau}) [1 - \rho_1(2\Delta_{\tau})] \times \\ &\times \int_{-\infty}^{\infty} G_{V0}(\Omega) G_{\Phi}^2(\Omega) d\Omega + \frac{2N_0 Q_c}{U^2} [1 - \rho_1^2(2\Delta_{\tau})] \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G_{\Phi}^2(\Omega) d\Omega \times \\ &\times \left[\rho_1^2(\Delta_{\tau}) [1 - \rho_1(2\Delta_{\tau})] + \frac{2N_0 Q_c}{U^2} [1 - \rho_1^2(2\Delta_{\tau})] \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G_{\Phi}^2(\Omega) d\Omega \right]^{-1}. \end{aligned} \quad (6)$$

Выражение (6) приобретает особенно простой вид, если последним слагаемым в числителе (6) можно пренебречь по сравнению со вторым слагаемым, что допустимо в случае, когда уровень аддитивных помех мал, а ширина спектра функции помеховой модуляции не очень велика.

В указанном случае имеем

$$\frac{G_{\chi}}{G_{\chi 0}} = \alpha_0^2 + \frac{1-\alpha_0^2}{\Delta\Omega_M} \int_{-\infty}^{\infty} G_{V0}(\Omega) G_{\Phi}^2(\Omega) d\Omega, \quad (7)$$

$G_{\chi 0}$ – спектральная плотность выходного сигнала дискриминатора.

При очень низком уровне аддитивных помех выражение (5) также существенно упрощается. Причем, как нетрудно видеть из сравнения (5), (4),

$$\frac{k_{APY}}{k_{0,APY}} = \frac{k_{APY}}{k_{н,APY}} = \frac{k_d}{k_{до}}, \frac{k_{0,APY}}{k_{н,APY}} = 1, \quad (8)$$

где $k_{0,APY}$ – коэффициент, характеризующий нормирующее действие APY

при наличии только аддитивных помех; $k_{до}$ – крутизна дискриминационной характеристики при наличии только аддитивных помех и без учета нормирующего действия АРУ.

Учитывая выражение для крутизны дискриминационной характеристики $k_{д.АРУ}$ с учетом нормирующего действия АРУ

$$k_{д.АРУ} = \frac{k_d}{k_{АРУ}[u_{вх}(t)]},$$

видим, что при очень низком уровне аддитивных шумов, когда справедливо соотношение (8), $k_{д.АРУ} = k_{до.АРУ} = 1$, то есть мультипликативные (модулирующие) помехи не влияют на крутизну дискриминационной характеристики. Этот на первый взгляд странный результат объясняется тем, что при принятом условии $G_V(2k\pi/T_n)|_{k \neq 0} = 0$ интервал корреляции функции помеховой модуляции много больше длительности одного импульса когерентной последовательности. Поэтому структура каждого отдельного импульса последовательности практически не искажается. Наличие мультипликативных (модулирующих) помех приводит лишь к уменьшению средней мощности сигнала на выходе линейных цепей дискриминатора, которое при очень низком уровне аддитивных помех практически полностью компенсируется системой автоматической регулировки усиления.

Можно показать, что при низком уровне аддитивных помех характер влияния мультипликативных помех на точность измерения времени прихода для принятых в данном примере условий относительно $\dot{r}_1(\tau, \omega)$, $G_V(\omega)$, $G_\Phi(\omega)$ не зависит от вида сглаживающих цепей следящего измерителя.

Подставляя (7), (8), (4) в выражение для случая одной RC-цепи, одного интегратора

$$\sigma_t^2 = \sigma_{t0}^2 \frac{G_\chi}{G_{\chi 0}} \frac{k_d}{k_{до}} \frac{k_{до.АРУ}}{k_{АРУ}} = \sigma_{t0}^2 \eta_{tM1},$$

где σ_{t0}^2 – дисперсия ошибок измерения при наличии только аддитивных помех, для случая очень низкого уровня аддитивных помех, получим

$$\eta_{tM} = \frac{\sigma_t^2}{\sigma_{t0}^2} = \frac{\alpha_0^2 + \frac{1-\alpha_0^2}{\Delta\Omega_M} \int_{-\infty}^{\infty} G_{V0}(\Omega) G_\Phi^2(\Omega) d\Omega}{\left[\alpha_0^2 + \frac{1-\alpha_0^2}{\Delta\Omega_M} \int_{-\infty}^{\infty} G_{V0}(\Omega) G_\Phi^2(\Omega) d\Omega \right]^2}.$$

Предельное увеличение дисперсии ошибок измерения за счет действия мультипликативных помех, при $\Delta\Omega_M \rightarrow \infty$, составляет $1/\alpha_0^2$.

Для случая, когда $G_{V0}(\Omega)$, $G_\Phi(\Omega)$ имеют колоколообразную форму

$$G_\Phi(\Omega) = \exp\left\{-\frac{\pi\Omega^2}{\Delta\Omega_\Phi^2}\right\}, G_{V0}(\Omega) = \exp\left\{-\frac{\pi\Omega^2}{\Delta\Omega_M^2}\right\},$$

где $\Delta\Omega_\Phi$ – эквивалентная полоса пропускания фильтра, получим следующие выражения функций, входящих в формулы для дисперсии ошибок измерения:

$$\frac{k_d}{k_{до}} = \alpha_0^2 + \frac{1-\alpha_0^2}{\sqrt{1+\mu^2}},$$

$$\frac{G_{\chi}}{G_{\chi 0}} = \frac{\alpha_0^2 \rho_1^2(\Delta\tau) + \frac{1-\alpha_0^2}{\sqrt{1+\mu^2}} \rho_1^2(\Delta\tau) - \frac{1}{8q_1^2} [1+\rho_1(2\Delta\tau)]}{\rho_1^2(\Delta\tau) + \frac{1}{8q_1^2} [1+\rho_1(2\Delta\tau)]},$$

$$\frac{k_{\text{АРУ}}}{k_{\text{о.АРУ}}} = \frac{\alpha_0^2 \rho_1^2(\Delta\tau) + \frac{1-\alpha_0^2}{\sqrt{1+\mu^2}} \rho_1^2(\Delta\tau) + \frac{1}{q_1^2 \sqrt{2}}}{\rho_1^2(\Delta\tau) + \frac{1}{q_1^2 \sqrt{2}}},$$

$$\frac{k_{\text{АРУ}}}{k_{\text{н.АРУ}}} = \alpha_0^2 + \frac{1-\alpha_0^2}{\sqrt{1+\mu^2}} + \frac{1}{q_1^2 \sqrt{2} \rho_1^2(\Delta\tau)},$$

$$\frac{k_{\text{о.АРУ}}}{k_{\text{н.АРУ}}} = 1 + \frac{1}{q_1^2 \sqrt{2} \rho_1^2(\Delta\tau)}.$$

где $q_1^2 = \frac{2E}{N_0} \frac{1}{2\sqrt{2}} = \frac{q^2}{2\sqrt{2}}$; $\mu = \frac{1}{2\pi} \Delta\Omega_M T_K$.

На рисунке 1 для рассматриваемого примера приведены зависимости отношения дисперсии измерения времени прихода при наличии мультипликативных и аддитивных помех к дисперсии измерения времени прихода при наличии только аддитивных помех от параметра $\mu = \Delta\Omega_M / \Delta\Omega_{\phi}$ при различных значениях параметров α_0^2 , q_1^2 и при $\frac{\Delta\tau}{T} = 0,5$, $\rho_1(\Delta\tau) = \exp\{-\pi\Delta\tau^2 / 2T_1^2\}$, где T_1 – эффективная длительность одного импульса когерентной последовательности.

Кривые 1 соответствуют сглаживающему фильтру в виде одной RC-цепи, кривые 2 – в виде двух интеграторов с коррекцией, кривые 3 – двух RC-цепей с коррекцией. Сравнение зависимостей $\eta_{\omega M}$ и $\eta_{\tau M}$ (см. рис. 1 [2] и рис. 1) показывает, что характер влияния мультипликативных помех на дисперсию ошибок измерения частоты времени прихода когерентного сигнала при одинаковых ограничениях, накладываемых на сигналы и помехи, для не очень больших значений параметра μ оказывается существенно различным. В частности, зависимости $\eta_{\tau M}$ монотонные, а $\eta_{\omega M}$ имеют экстремумы. Это обусловлено тем, что при наличии мультипликативных помех отношение интервала корреляции сигнала по измеряемому параметру на выходе линейных цепей дискриминатора к величине расстройки каналов дискриминатора Δ_l для сравниваемых параметров оказывается существенно различным.

Действительно, в рассматриваемых примерах ширина спектра функции помеховой модуляции удовлетворяет неравенству $0 \leq \Delta\Omega_M < 2\pi/T_{\Pi}$, а параметр $\mu = \Delta\Omega_M / \Delta\Omega_{\phi}$ может изменяться от нуля до достаточно большой величины. То есть полоса пропускания линейных цепей дискриминатора много меньше $2\pi/T_{\Pi}$.

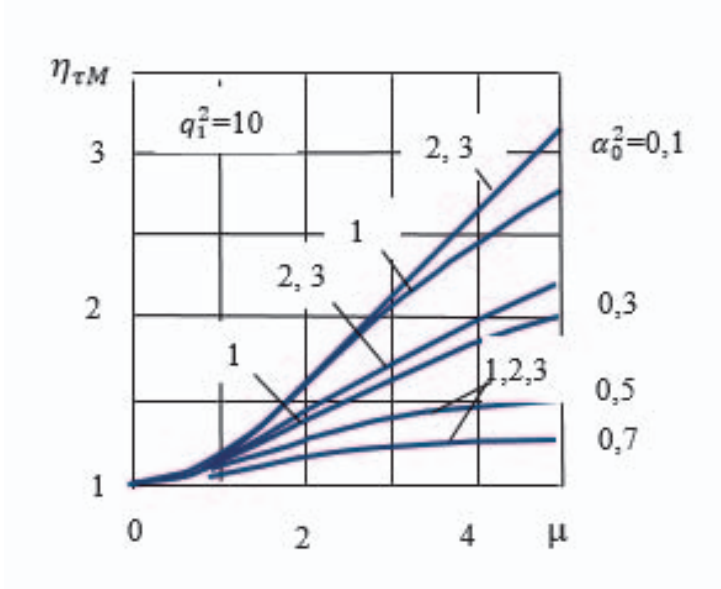
Отношение интервала корреляции сигнала по частоте на выходе линейных цепей дискриминатора $\Delta\Omega_{rS}$ к расстройке каналов дискриминатора $2\Delta_{\omega}$ может быть оценено величиной

$$\gamma_{\Omega} = \frac{\Delta\Omega_{rS}}{2\Delta_{\omega}} \simeq \frac{\sqrt{1+\mu^2}}{2\nu\mu}.$$

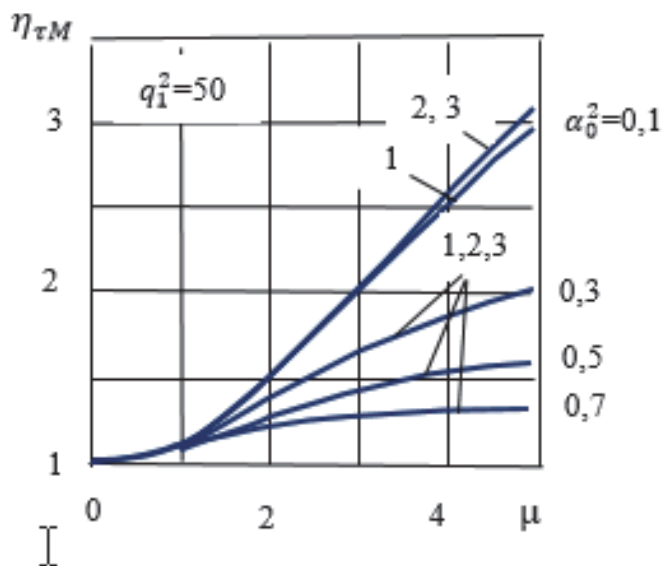
Для случая измерения времени прихода когерентной последовательности импульсов соответствующее отношение γ_{τ} оценивается величиной

$$\gamma_{\tau} = \frac{\Delta\tau_{rS}}{2\Delta_{\tau}} \simeq \frac{\pi}{\Delta\Omega_{\phi}} \frac{\sqrt{1+\mu^2}}{2\mu\Delta_{\tau}}.$$

Величина ν , входящая в выражение для γ_Ω , близка к единице, тогда при увеличении параметра μ взаимная корреляция между сигналами на выходе линейных цепей дискриминатора при измерении частоты быстро уменьшается ($\gamma_\Omega \rightarrow 1/2\nu$), что и приводит к быстрому росту ошибок измерения за счет флуктуаций сигнала, обусловленных мультипликативными помехами.



а)



б)

Рисунок 1 – Зависимости $\eta_{\tau M} = f(\mu)$, при различных значениях параметров α_0^2 , q_1^2 , где: а – $q_1^2 = 10$; б – $q_1^2 = 50$

При измерении времени прихода величина Δ_τ близка к длительности одиночного импульса когерентной последовательности (в расчетном примере принято, что $\Delta_\tau = 0,5T_1$), тогда

$$\gamma_\tau \approx \frac{2\pi \sqrt{1+\mu^2}}{\Delta\Omega_\phi \mu T_1}.$$

Учитывая, что $\Delta\Omega_\phi \ll 2\pi/T_n$, даже при $\mu \gg 1$ имеем $\gamma_\tau \gg Q_c \gg 1$, то есть при измерении времени прихода флюктуаций сигнала на выходе линейных цепей каждого из каналов дискриминатора, обусловленные мультипликативными помехами, оказываются жестко коррелированными. При этом с увеличением ширины спектра функции помеховой модуляции (параметра μ) ошибки измерения растут лишь за счет уменьшения мощности полезного сигнала, искаженного мультипликативными помехами, на выходе линейных цепей дискриминатора по сравнению с мощностью аддитивных помех.

В предельном случае, при $\mu \gg 1$, мощность полезного сигнала уменьшается в $1/\alpha_0^2$ раз, во столько же раз возрастают и ошибки измерения.

Отметим, что указанная причина, уменьшение мощности полезного сигнала на выходе линейных цепей дискриминатора с ростом μ , приводит к тому, что в пределе при $\Delta\Omega_M \rightarrow \infty$ (при $\mu \rightarrow \infty$) дисперсия ошибок измерения частоты за счет действия мультипликативных помех увеличивается также в $1/\alpha_0^2$ раз.

Входной сигнал в виде некогерентной импульсной последовательности. Будем считать, что следящий измеритель времени прихода обеспечивает отсутствие систематической ошибки, а сигнал, время прихода которого измеряется, имеет двумерную функцию автокорреляции вида

$$\rho(\tau, \omega) = p(\tau)r(\omega)\exp\{j\arg\rho_1(\tau, \omega)\},$$

то есть будем рассматривать импульсные последовательности с постоянной частотой заполнения или с хаотической (псевдохаотической) угловой модуляцией каждого импульса последовательности.

Кроме того, будем считать, что $\arg\rho_1(\tau, \omega) = \tau\omega/2$. Последнее условие справедливо для рассматриваемых сигналов в пределах главного пика функции автокорреляции.

Применительно к сигналам, для которых выполняются сформулированные выше условия, функции $\sigma_1^2(\tau, \Omega)$, $B_s(\tau_1, \tau_2, \omega_1, \omega_2)$, входящие в формулы для определения крутизны дискриминационной характеристики и спектральной плотности мощности флюктуаций на выходе дискриминатора, имеют вид

$$\begin{aligned} \sigma_1^2(\tau, \Omega) &= \frac{p^2(\tau)}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G_V(\Omega)r^2(\omega + \Omega)d\Omega, \\ B_s(\tau_1, \tau_2, \omega_1, \omega_2) &= \frac{p(\tau_1)p(\tau_2)}{2\pi} \exp\{j(\tau_2\omega_2 - \tau_1\omega_1)\} \times \\ &\times \int_{-\infty}^{\infty} G_V(\Omega)r(\Omega - \omega_1)\exp\{j(\tau_1 + \tau_2)\Omega\}d\Omega. \end{aligned} \quad (9)$$

С учетом (9) отношение крутизны дискриминационной характеристики при наличии мультипликативных помех к крутизне дискриминационной характеристики в их отсутствие определяется соотношением

$$\frac{k_d}{k_{до}} = \alpha_0^2 + \frac{1 - \alpha_0^2}{2\pi\Delta\Omega_M} \frac{\iint_{-\infty}^{\infty} G_{V0}(\omega)G_\phi(\Omega)r^2(\omega + \Omega)d\omega d\Omega}{\int_{-\infty}^{\infty} G_\phi(\Omega)r^2(\Omega)d\Omega}.$$

Для коэффициентов, учитывающих действие АРУ, в рассматриваемом примере, с учетом (9), получим

$$\begin{aligned} \frac{k_{\text{АРУ}}}{k_{0,\text{АРУ}}} &= \left[\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G_{\phi}(\Omega) r^2(\Omega) d\Omega + \frac{2\Delta\Omega_{\phi}}{p^2(\Delta_{\tau})q^2} \right]^{-1} \times \\ &\times \left[\frac{\alpha_0^2}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G_{\phi}(\Omega) r^2(\Omega) d\Omega + \frac{1-\alpha_0^2}{2\pi\Delta\Omega_M} \iint_{-\infty}^{\infty} G_{V0}(\omega) G_{\phi}(\Omega) r^2(\omega + \Omega) d\omega d\Omega + \right. \\ &\left. + \frac{2\Delta\Omega_{\phi}}{p^2(\Delta_{\tau})q^2} \right], \\ \frac{k_{\text{АРУ}}}{k_{\text{н.АРУ}}} &= \left[\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G_{\phi}(\Omega) r^2(\Omega) d\Omega \right]^{-1} \left[\frac{\alpha_0^2}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G_{\phi}(\Omega) r^2(\Omega) d\Omega + \right. \\ &\left. + \frac{1-\alpha_0^2}{2\pi\Delta\Omega_M} \iint_{-\infty}^{\infty} G_{V0}(\omega) G_{\phi}(\Omega) r^2(\omega + \Omega) d\omega d\Omega + \frac{2\Delta\Omega_{\phi}}{p^2(\Delta_{\tau})q^2} \right], \\ \frac{k_{0,\text{АРУ}}}{k_{\text{н.АРУ}}} &= \left[\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G_{\phi}(\Omega) r^2(\Omega) d\Omega \right]^{-1} \left[\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G_{\phi}(\Omega) r^2(\Omega) d\Omega + \frac{2\Delta\Omega_{\phi}}{p^2(\Delta_{\tau})q^2} \right]. \end{aligned} \quad (10)$$

При весьма низком уровне аддитивный помех, когда параметр $\frac{2\Delta\Omega_{\phi}}{p^2(\Delta_{\tau})q^2}$, обратно пропорциональный отношению энергии сигнала к спектральной плотности мощности аддитивного шума, много меньше других слагаемых, входящих в (10), последнее выражение существенно упрощается. Причем в этом случае [см. (8)]

$$\frac{k_{\text{АРУ}}}{k_{0,\text{АРУ}}} = \frac{k_{\text{АРУ}}}{k_{\text{н.АРУ}}} = \frac{k_{\text{д}}}{k_{\text{д0}}}, \frac{k_{0,\text{АРУ}}}{k_{\text{н.АРУ}}} = 1,$$

то есть, имеют место такие же соотношения, как и при измерении времени прихода когерентной последовательности импульсов.

Из (8) следует, что при весьма низком уровне аддитивных помех степень влияния мультипликативных помех на точность измерения времени прихода некогерентной последовательности импульсов не зависит от типа сглаживающего фильтра следящего измерителя.

Подставляя (9) в выражения для интегралов $\langle I_1 \rangle$, $\langle I_5 \rangle$, $\langle I_6 \rangle$, нетрудно убедиться, что при изменении знака величины Δ_{τ} в аргументе интегралов $\langle I_1 \rangle$, $\langle I_6 \rangle$ указанные интегралы становятся комплексно-сопряженными по отношению к исходным.

С учетом сказанного имеем

$$\frac{\langle G_{\chi} \rangle}{\langle G_{\chi 0} \rangle} = \frac{\alpha_0^2 Y_1 + \frac{1-\alpha_0^2}{\Delta\Omega_M} Y_2 + \frac{q^2}{2} Y_3 + \frac{1}{q^2} Y_4}{Y_1 + \frac{1}{q^2} Y_4}, \quad (11)$$

где $Y_1 = \text{Re}\{\langle I'_{11}(0, \Delta_{\tau}) \rangle - \langle I'_{12}(0, \Delta_{\tau}) \rangle\}$ при условии, что функция $B_{SM}(\tau_1, \tau_2, \omega_1, \omega_2)$ вычисляется путем подстановки в (9) вместо $G_V(\Omega)$ дельта-функции - $\delta(\Omega)$;

$$Y_2 = \text{Re}\{\langle I'_{11}(0, \Delta_{\tau}) \rangle - \langle I'_{12}(0, \Delta_{\tau}) \rangle\}$$

при условии, что в (9) вместо $G_V(\Omega)$ подставляем $G_{V0}(\Omega)$;

$$Y_3 = \frac{1}{2} \text{Re}\{\langle I'_{61}(0, \Delta_{\tau}) \rangle - \langle I'_{62}(0, \Delta_{\tau}) \rangle\} +$$

$$+ 2\alpha_0^2 \langle I'_{63}(0, \Delta_\tau) \rangle - 2\alpha_0^2 \langle I'_{64}(0, \Delta_\tau) \rangle \};$$

$$Y_4 = \langle I'_{51}(0, \Delta_\tau) \rangle - \langle I'_{52}(0, \Delta_\tau) \rangle; q^2 = \frac{2E}{N_0}.$$

Анализ показывает, что

$$\frac{\langle I'_{12}(0, \Delta_\tau) \rangle}{\langle I'_{11}(0, \Delta_\tau) \rangle} \leq p(2\Delta_\tau), \quad \frac{\langle I'_{52}(0, \Delta_\tau) \rangle}{\langle I'_{51}(0, \Delta_\tau) \rangle} \leq p(2\Delta_\tau).$$

Величина $p(2\Delta_\tau)$ в соответствии с принятыми обозначениями есть не что иное, как значение функции автокорреляции принимаемого сигнала при $\tau = 2\Delta_\tau$. В реальных системах величина $2\Delta_\tau$ близка к ширине функции автокорреляции сигнала по оси τ , поэтому $p(2\Delta_\tau) \gg 1$. С учетом сказанного в выражениях для Y_1, Y_2, Y_4 вторыми слагаемыми можно пренебречь.

Интересно отметить, что выражение (11) включает в числителе в качестве слагаемого член, пропорциональный отношению $q^2 = \frac{2E}{N_0}$. Аналогичное слагаемое содержится в выражении полученном для случая измерения частоты когерентного сигнала [2]. Вместе с тем в случае измерения времени прихода когерентной последовательности импульсов соответствующее выражение для отношения $\frac{G_X}{G_{X0}}$ (6) не содержит слагаемого, пропорционального величине q^2 . Указанные различия связаны с упоминавшемся выше различием в отношении интервала корреляции сигнала, искаженного мультипликативной помехой, на выходе линейных цепей дискриминатора по времени (частоте) к расстройке каналов дискриминатора по соответствующему параметру $\gamma_{\Omega, \tau}$.

В случае измерения времени прихода некогерентной последовательности импульсов величина γ_τ имеет тот же порядок, что и величина γ_Ω в случае измерения частоты когерентного сигнала.

Исходя из вышеизложенного, следует ожидать, что и зависимости коэффициента $\eta_{\tau M}$ от ширины спектра флюктуаций $\Delta\Omega_M$ функции помеховой модуляции при измерении времени прихода некогерентной последовательности импульсов будут аналогичны соответствующим зависимостям для случая измерения частоты когерентного сигнала.

В качестве примера использования полученных соотношений рассмотрим случай, когда спектр флюктуаций функции помеховой модуляции, а также функции $r(\Omega)$, $G_\Phi(\Omega)$ имеют колоколообразную форму:

$$G_{V,0}(\Omega) = \exp\left\{-\frac{\pi\Omega^2}{\Delta\Omega_M^2}\right\}; r(\Omega) = \exp\left\{-\frac{\Omega^2 T^2}{8\pi}\right\}; G_\Phi(\Omega) = \exp\left\{-\frac{\pi\Omega^2}{\Delta\Omega_\Phi^2}\right\}, \quad (12)$$

где T – эквивалентная длительность одного импульса некогерентной последовательности.

Полные выражения для величин $\frac{k_d}{k_{до}}, \frac{k_{APY}}{k_{о.АРУ}}, \frac{k_{APY}}{k_{н.АРУ}}, \frac{k_{о.АРУ}}{k_{н.АРУ}}, \frac{\langle G_X \rangle}{\langle G_{X0} \rangle}$ применительно к рассматриваемому примеру, когда функции $G_{V,0}(\Omega), r(\Omega), G_\Phi(\Omega)$ определяются формулами (12) оказываются весьма громоздкими. Поэтому здесь приведем необходимые соотношения лишь для случая, когда эквивалентная полоса пропускания фильтров, включенных в оба канала дискриминатора, равна ширине спектра огибающей импульса ($\Delta\Omega_\Phi = 2\pi/T$), то есть фильтры являются согласо-

ванными с одиночным импульсом принимаемой когерентной последовательности.

В указанном случае имеем

$$\frac{k_d}{k_{до}} = \alpha_0^2 + \frac{1-\alpha_0^2}{\sqrt{1+\frac{1}{2}\mu^2}}, \quad (\mu = \frac{\Delta\Omega_M}{\Delta\Omega_\Phi}),$$

$$\frac{k_{APY}}{k_{о.АРУ}} = \left[1 + \frac{2\sqrt{2}}{q^2 p^2 (\Delta_\tau)} \right]^{-1} \left[\alpha_0^2 + \frac{1-\alpha_0^2}{\sqrt{1+\frac{1}{2}\mu^2}} + \frac{2\sqrt{2}}{q^2 p^2 (\Delta_\tau)} \right],$$

$$\frac{k_{APY}}{k_{н.АРУ}} = \alpha_0^2 + \frac{1-\alpha_0^2}{\sqrt{1+\frac{1}{2}\mu^2}} + \frac{2\sqrt{2}}{q^2 p^2 (\Delta_\tau)}, \quad (13)$$

$$\frac{k_{о.АРУ}}{k_{н.АРУ}} = 1 + \frac{2\sqrt{2}}{q^2 p^2 (\Delta_\tau)}.$$

Из (13) видно, что условием, при котором выполняются приближенные соотношения (8), являются следующие:

$$\frac{2\sqrt{2}}{q^2 p^2 (\Delta_\tau)} \ll \alpha_0^2 + \frac{1-\alpha_0^2}{\sqrt{1+\frac{1}{2}\mu^2}}.$$

Функция $\frac{\langle G_X \rangle}{\langle G_{X0} \rangle}$ для рассматриваемого примера имеет вид

$$\begin{aligned} \frac{\langle G_X \rangle}{\langle G_{X0} \rangle} &\simeq \frac{\frac{\alpha_0^2}{\sqrt{24}} \exp\left\{-\frac{2}{3}\pi v_\tau^2\right\} +}{\frac{1}{\sqrt{24}} \exp\left\{-\frac{2}{3}\pi v_\tau^2\right\} + [q^2 p^2 (\Delta_\tau) 2\sqrt{2}]^{-1}} \rightarrow \\ &+ \frac{(1-\alpha_0^2)\sqrt{1+\mu^2}}{\sqrt{(5+4\mu^2)^2 - \frac{1}{4}(2+3\mu^2)^2}} \exp\left\{-8\pi v_\tau^2 \frac{1+\mu^2}{12+11\mu^2}\right\} \\ &\rightarrow \frac{q^2 p^2 (\Delta_\tau)}{4} \left\{ \frac{(1-\alpha_0^2)^2}{\sqrt{36+48\mu^2+17\mu^4}} \left[1 - \exp\left\{-\frac{4\pi v_\tau^2 \mu^2}{1+\mu^2}\right\} \right] + \right. \\ &+ \frac{\frac{1}{\sqrt{24}} \exp\left\{-\frac{2}{3}\pi v_\tau^2\right\} + [q^2 p^2 (\Delta_\tau) 2\sqrt{2}]^{-1}}{\frac{2\alpha_0^2(1-\alpha_0^2)\sqrt{1+\mu^2}}{\sqrt{(5+4\mu^2)^2 - \frac{1}{4}\mu^4}} \left[1 - \exp\left\{-4\pi v_\tau^2 \frac{7\mu^2+6\mu^4}{7+9\mu^2+2\mu^4}\right\} \right] \left. \right\} \\ &\rightarrow \frac{[q^2 p^2 (\Delta_\tau) 2\sqrt{2}]^{-1}}{\frac{1}{\sqrt{24}} \exp\left\{-\frac{2}{3}\pi v_\tau^2\right\} + [q^2 p^2 (\Delta_\tau) 2\sqrt{2}]^{-1}}, \quad (14) \end{aligned}$$

где $v_\tau = \Delta_\tau / T$.

На рис. 2 приведены зависимости отношения дисперсии ошибок измерения времени прихода некогерентной последовательности импульсов с постоянной частотой заполнения при наличии мультипликативных и аддитивных помех к дисперсии ошибок измерения при наличии только аддитивных помех η_{TM} от параметра $\mu = \Delta\Omega_M / \Delta\Omega_\Phi$ для нескольких значений величин q^2 и α_0^2 .

Эти зависимости построены на основе (13), (14) с последующей подстановкой результатов вычислений в выражения для определения дисперсии оши-

бок измерения параметра l при наличии аддитивных и мультипликативных помех
- при сглаживающем фильтре в виде интегратора или RC -цепи

$$\sigma_l^2 = \sigma_{l0}^2 \frac{G_{\chi}}{G_{\chi 0}} \frac{k_{д.0}^2}{k_{д}^2} \frac{k_{д.АРУ}}{k_{д.0.АРУ}} = \sigma_{l0}^2 \eta_{lM1}; \quad (15)$$

- при сглаживающем фильтре в виде двойного интегратора с коррекцией

$$\sigma_l^2 = \sigma_{l0}^2 \frac{G_{\chi}}{G_{\chi 0}} \frac{k_{д.0}^2}{k_{д}^2} \frac{1 + \left(\frac{k_{н.АРУ}}{k_{АРУ}}\right) \left(\frac{k_{д}}{k_{д.0}}\right)}{1 + \left(\frac{k_{н.АРУ}}{k_{0.АРУ}}\right)} = \sigma_{l0}^2 \eta_{lM2}; \quad (16)$$

- при сглаживающем фильтре в виде двух RC -цепей с коррекцией

$$\sigma_l^2 = \sigma_{l0}^2 \frac{G_{\chi}}{G_{\chi 0}} \frac{k_{д.0}^2}{k_{д}^2} \frac{1 + \left(\frac{k_{н.АРУ}}{k_{АРУ}}\right) \left(\frac{k_{д}}{2k_{д.0}}\right)}{1 + \left(\frac{k_{н.АРУ}}{2k_{0.АРУ}}\right)} = \sigma_{l0}^2 \eta_{lM3}. \quad (17)$$

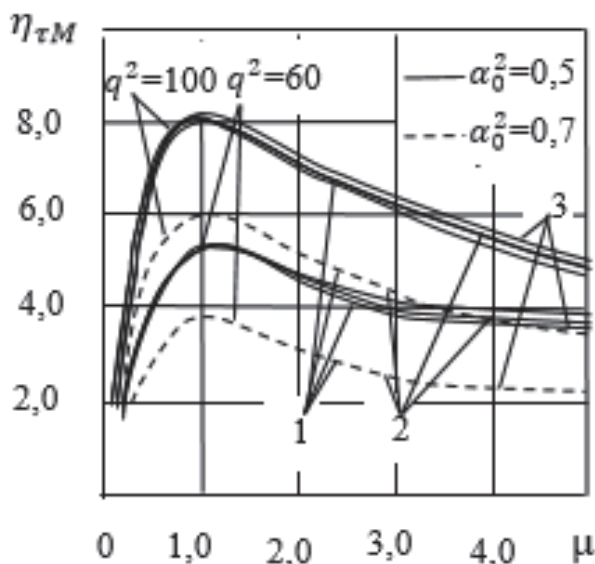


Рисунок 2 – Зависимости $\eta_{\tau M}$ от параметра μ для некоторых значений величин q^2 и α_0^2 .

Таким образом, ухудшение точностных характеристик следящего измерителя за счет действия мультипликативных помех по сравнению с случаем, когда они отсутствуют, может быть оценено коэффициентами η_{lMi} при σ_{l0}^2 в (15)-(17).

Для вычисления этих коэффициентов достаточно определить характеристики дискриминатора: крутизну дискриминационной характеристики ($k_{д}, k_{д.0}$) и спектральную плотность флуктуаций на выходе дискриминатора при нулевой ошибке ($G_{\chi}, G_{\chi 0}$), а также коэффициенты, определяющие нормирующее действие АРУ ($k_{АРУ}, k_{0.АРУ}, k_{н.АРУ}$) при наличии и в отсутствии помех.

Нумерация кривых на рисунке 2 соответствует нумерации, принятой на рисунке 1.

Выводы. Таким образом, произведен анализ точности измерения времени прихода сигнала следящим измерителем в авиационной и ракетно-космической технике на фоне аддитивных и мультипликативных помех. Проанализированы зависимости отношения дисперсии измерения времени прихода при наличии мультипликативных и аддитивных помех к дисперсии измерения времени прихода при наличии только аддитивных помех.

Показано, что при очень низком уровне аддитивных шумов мультипликативные (модулирующие) помехи не влияют на крутизну дискриминационной характеристики. Наличие мультипликативных (модулирующих) помех приводит лишь к уменьшению средней мощности сигнала на выходе линейных цепей дискриминатора, которое при очень низком уровне аддитивных помех практически полностью компенсируется системой автоматической регулировки усиления. Показано, что при низком уровне аддитивных помех характер влияния мультипликативных помех на точность измерения времени прихода не зависит от вида сглаживающих цепей следящего измерителя.

Литература

1. Артюшенко В.М., Воловач В.И. Точность измерения информационного параметра сигнала следящим измерителем в авиационной и ракетно-космической технике на фоне аддитивных и мультипликативных помех. Крутизна дискриминационной характеристики. Часть I // Информационно-технологический вестник. 2021. № 2(28). С. 26-37.
2. Артюшенко В.М., Воловач В.И. Точность измерения информационного параметра сигнала в авиационных и ракетно-космических радиосистемах при наличии аддитивных и мультипликативных помех с низким уровнем. Часть II (Примеры измерения частоты и времени прихода полезного сигнала) // Информационно-технологический вестник. 2020. № 4(26). С.14-26.
3. Бакулев П.А. Радиолокация движущихся целей. М: Советское радио, 1964. 336 с.

УДК 629.764.3

Проблемы многократного применения двигательных установок жидкостных ракет

В.А. Бершадский, доктор технических наук,
профессор кафедры «Техника и технологии»,
Государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования Московской области
«Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза,
летчика-космонавта А.А. Леонова», г. Королев, Московская область

Сформулированы недостатки двигательных установок жидкостных ракет однократного применения для транспортировки на околоземные орбиты и возвращения на Землю необходимых грузов.

В результате анализа ряда публикаций в научно-технической литературе установлены проблемы создания и многократного применения жидкостных ракетных двигателей и научно-технические задачи, которые требуют первоочередных решений.

Определены основные направления решения задач на концептуальном и оперативном уровнях в части обеспечения надёжной и безопасной полётной эксплуатации двигательных установок многократного применения, их живучести и межполётного обслуживания.

Двигательная установка, многократное применение, безотказность функционирования, гарантированный ресурс, ремонтпригодность, безопасность и живучесть двигателя.

Problems of multiple use of liquid rocket propulsion systems

V.A. Bershadskiy, Doctor of Technical Sciences, Professor at Department,
State Budgetary Educational Institution of Higher Education of the Moscow Region
«Technological University named after twice Hero of the Soviet Union,
pilot-cosmonaut A.A. Leonov», Korolev, Moscow region

The disadvantages of single-use liquid-propellant rocket propulsion systems for transporting the necessary cargo to near-Earth orbits and returning it to Earth are formulated.

As a result of the analysis of a number of publications in the scientific and technical literature, the problems of creating and repeatedly using liquid rocket engines and scientific and technical tasks that require priority solutions are established.

The main directions of solving problems at the conceptual and operational levels in terms of ensuring reliable and safe flight operation of multiple-use propulsion systems, their survivability and inter-flight maintenance are determined.

Propulsion system, multiple use, trouble-free operation, guaranteed service life, maintainability, safety and survivability of the engine.

Введение

В настоящее время двигательные установки (ДУ) жидкостных ракет в основном используют при однократном применении. Существующие варианты применения ДУ связаны с их разовыми включениями в составе первой и второй ступеней ракет-носителей (РН) или с многократными включениями в составе верхних ступеней или разгонных блоков (РБ) и космических аппаратов (КА).

В части транспортировки различных грузов двигательные установки однократного применения обладают следующими недостатками:

- для увеличения массы полезной нагрузки, выводимой на околоземные орбиты (от 200 до 1500 км), приходится использовать большое количество пусков ракетно-космических систем (РКС) или создавать ракеты-носители большой грузоподъемности (от 25 до 60 тонн), что требует больших финансовых и материальных затрат [14];

- однократное применение РКС не способствует улучшению экологической обстановки в связи с необходимостью отчуждения пространства на Земле для падающих отработавших частей РКС и с увеличением засорения околоземного космического пространства отработавшими частями РКС типа КА и ДУ разгонных блоков [5].

Многократное применение ДУ РКС является актуальной проблемой в настоящее время, связанной с решением различных важных проблем [6, 12]. В течение последних 30-лет в научно-технических публикациях ряда специалистов, например в работах [3-16], рассматриваются различные варианты решения проблем многократного применения ДУ для выполнения транспортно-космических программ.

В настоящей статье в результате анализа материалов, приведенных в указанных выше публикациях, определены основные направления решения первоочередных задач и некоторые аспекты системного подхода для создания ДУ многократного применения.

Определение первоочередных задач

Создание и эксплуатация транспортно-космических систем многократного применения является одним из перспективных научно-технических направлений в России. В настоящее время рассматривается ряд базовых конфигураций РКС с вертикальным и горизонтальным стартом и возвращением на Землю [1]. Для определения первоочередных задач целесообразно ограничить их объём.

Для формирования первоочередной концепции рассмотрим виды РКС с вертикальным стартом, элементы которой целесообразно возвращать на Землю после выполнения программы полёта: орбитальный транспортный корабль (ОТК); одну из ступеней ракеты-носителя (РН), обеспечивающую вывод ОТК на околоземную орбиту.

Задачи с возвращением ОТК на Землю в настоящее время успешно решаются в России, США и Китае. Дальнейшее решение задач по совершенствованию и возврату ОТК, позволит существенно уменьшить количество отработавших и невозвращаемых космических объектов, увеличивающихся ежегодно, и

будет способствовать безопасности выполнения будущих программ РКС. Интенсивность увеличения невозвращаемых объектов иллюстрирует рисунок 1.

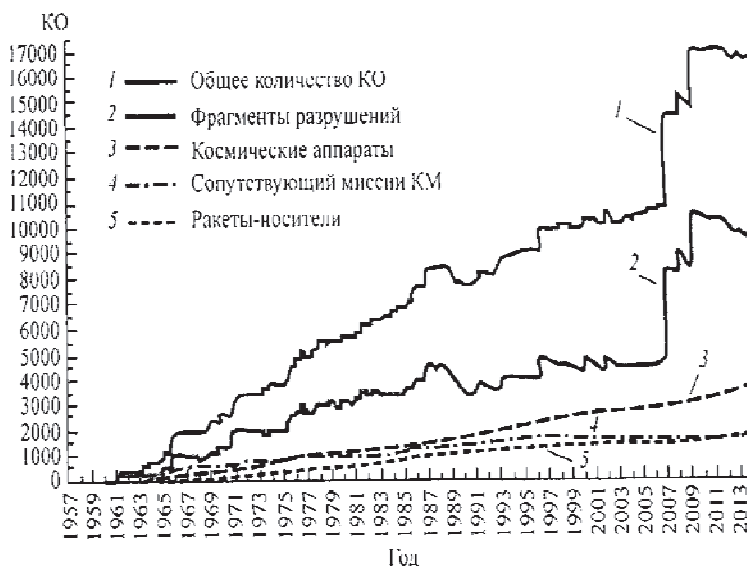


Рисунок 1 – Пример интенсивности засорения околоземного пространства невозвращаемыми космическими объектами (КО)

Другой важной проблемой является малая масса ОТК, выводимая на околоземную орбиту ($\leq 3-4\%$ от стартовой массы РН), а также стоимость вывода 1 кг полезной нагрузки (от 5 до 25 тысяч долларов).

Наибольшее влияние на стоимость вывода полезной нагрузки в космическое пространство оказывают создание, отработка и эксплуатация ступеней РН. В результате многолетнего опыта организаций ракетно-космической промышленности установлено, что на уменьшение стоимости частей РН наибольшее влияние оказывает возврат 1-ой ступени. Конструкция и особенности работы ДУ 1-ой ступени в значительной мере определяют энергомассовое совершенство, надёжность и безопасность, а также материальные затраты, связанные с созданием и отработкой РКС. Поэтому решение вопроса о многократном использовании ДУ 1-ой ступени РН является наиболее актуальной задачей в настоящее время.

Наиболее важным элементом ДУ является жидкостный ракетный двигатель (ЖРД), который создаёт силу тяги и способен изменять её направление, а также регулировать скорость и устойчивость движения в полёте. На рисунке 2 приведены результаты теоретических расчётов по уменьшению стоимости РН при использовании возвращаемых ЖРД первой ступени. Линия 1 на рисунке 2 соответствует ЖРД с давлением в камере $p_{кк} = 25$ МПа, а линия 2 – с давлением $p_{кк} = 15$ МПа.

Опыт и научно-технический задел отечественных организаций в части создания ЖРД большой мощности многократного применения связан с созданием и отработкой кислородно-керосинового двигателя РД-170 для ДУ 1-ой ступе-

ни РКС «Энергия-Буран». Этот двигатель был сертифицирован для 10-кратного полётного использования [6]. В связи с прекращением финансирования по РКС «Энергия-Буран» работы в этом направлении не получили дальнейшего развития.

Относительные затраты на производство
и межполетное обслуживание, %



Рисунок 2 – Влияние кратности использования и размерности двигателя на затраты

В тоже время для успешного функционирования ДУ многократного применения ЖРД должен обладать высоким уровнем показателей качества. Наиболее важными показателями качества в условиях полётной эксплуатации РКС являются надёжность и безопасность эксплуатации ДУ РН. Следует обратить внимание на то, что при создании РКС однократного применения достаточность экспериментальной отработки ДУ определяют лишь на основе вероятности безотказной работы ДУ. Однако необходимое качество ДУ для многократного проведения полётов может быть обеспечено [2] только в результате достижения на требуемом уровне показателей качества, указанных на рисунке 3.

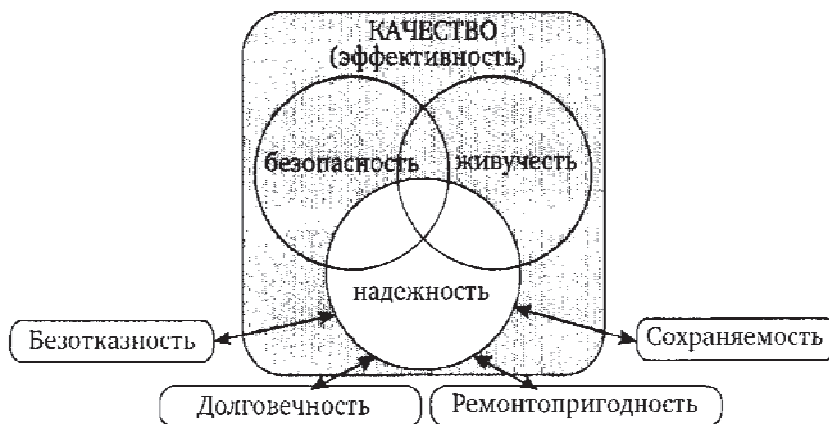


Рисунок 3 – Основные показатели, уровень достижения которых позволяет характеризовать качество ЖРД многократного применения

Обеспечение безотказности, долговечности и ремонтпригодности

Под обеспечением безотказности, долговечности и ремонтпригодности ДУ при её многократном применении следует понимать:

- вероятность того, что время работы до первого отказа больше требуемого времени для функционирования ДУ (вероятность безотказной работы);
- способность сохранять работоспособное состояние до некоторого определённого технического состояния, при котором дальнейшее применение ДУ нецелесообразно (гарантированный ресурс работы);
- возможность поддержания работоспособного состояния ДУ в период времени между полётами (ремонтпригодность).

Безотказность. Вероятность безотказной работы ДУ однократного применения в настоящее время имеет значения $\geq 0,95-0,99$. При этом для функционирования современных ЖРД на 1-х ступенях РКС однократного применения используют камеры сгорания с высоким давлением до $p_{кc} = 26$ МПа при значениях температуры до $T_{кc} = 3500$ К.

Подачу компонентов топлива в камеру осуществляют с применением «замкнутой» или «открытой» схем. Замкнутые схемы реализуют с дожиганием в камере двигателя после турбины газогенераторного окислительного или восстановительного газа (схемы имеют обозначения ДОГГ и ДВГГ соответственно). Открытые схемы реализуют с выбросом генераторного газа после турбины в окружающее пространство (схемы БДГГ).

Современные кислородно-керосиновые ЖРД (типа РД-191 и др.) в России используют преимущественно схемы с ДОГГ, что способствует эффективному использованию ЖРД, но увеличивает вероятность отказов из-за возможного воспламенения материала конструкции в высокотемпературной окислительной среде. Кроме того, при многократном применении возникает необходимость трудоёмких операций по очистке внутренних полостей двигателя от остатков горючего и твёрдых накоплений, полученных при его сжигании.

Большие величины давления в камерах современных ЖРД (от 17 до 26 МПа) требуют большой мощности от ТНА (от 70 до 160 кВт / кг) и температуры газа на входе в турбонасосный агрегат (от 750 до 1100 К). С учётом значительных динамических нагрузок при запуске и режимах работы двигателя это приводят к большой механической и тепловой напряжённости камеры, газогенератора и ТНА, к увеличению дефектов и отказов в работе двигателя. Наиболее критичным агрегатом в составе двигателя является ТНА. Отказы двигателей по вине ТНА современных ЖРД составляют 43-50% от общего числа отказов.

Наибольший опыт создания маршевых двигателей многократного применения и его практического использования имеют в США, где с 1981 по 2011 годы эксплуатировался кислородно-водородный ЖРД PS-24 (SSME) в составе ДУ при работе 2-й ступени РН «Спейс-Шаттл». В отличие от всех других мощных двигателей, разработанных в США, двигатель SSME был выполнен по замкнутой схеме ДВГГ и имел высокое значение давления в камере сгорания $p_{кc} = 21$ МПа.

Проектная кратность применения SSME должна была составлять 55 использований каждого двигателя в полёте (с общим ресурсом работы 7,5 часов).

Фактически усреднённое значение кратности использования двигателя за весь период его эксплуатации (135 полётов) находилась на уровне 6-8 полётов.

Ограниченные ресурсные характеристики SSME по мнению американских и российских специалистов, были объяснены чрезмерной напряжённостью элементов конструкции. Фактически приходилось производить доработки и замену ряда основных агрегатов и узлов двигателей между пусками. При этом основными критичными элементами являлись: ТНА окислителя и горючего, элементы устройства огневой стенки камеры сгорания, магистрали подачи по линии горючего.

Поэтому с целью повышения показателя безотказности ЖРД многократного применения российские специалисты рекомендуют следующие мероприятия, направленные на уменьшение режимов работы основных агрегатов: давление в камере ≤ 17 МПа; мощность ТНА ≤ 70 кВт/кг, температура на входе в турбину ТНА ≤ 600 К, применение схем подачи компонентов топлива с ДВГГ или БДГГ с использованием кислородно-метанового топлива.

С учётом предложенных мероприятий для многократных ЖРД 1-й ступени согласно прогнозам российских специалистов вероятность безотказной работы на запуске ДУ может иметь значения $\geq 0,995$, а на спуске $\geq 0,99$.

Долговечность. Гарантированный ресурс функционирования ДУ с учётом времени многократного использования в полётах и времени необходимого для завершения отработки и сертификационных испытаний может быть определён лишь по результатам трудоёмких и дорогостоящих работ, осуществляемых при экспериментальной отработке на стенде [2].

В настоящее время в России разработка нормативной базы для определения гарантированного ресурса ЖРД многократного применения в части методического обеспечения находится в начальной стадии. Дело в том, что для решения этой задачи необходимо учитывать большое количество разнообразных влияющих факторов:

- размерность (сила тяги) ЖРД и характеристики применяемых конструкционных материалов;
- физико-химические свойства компонентов топлива;
- прогнозируемые ситуации с разрушением элементов конструкции, виды и режимы используемых эквивалентных нагрузок при испытаниях в период отработки двигателя;
- особенности конструктивного исполнения и технология изготовления двигателя, количество экземпляров двигателей, используемых при отработке и сертификационных испытаниях;
- степень автономной отработки агрегатов и узлов, входящих в состав двигателя;
- совершенство диагностики технического состояния при испытаниях и особенности технологии проведения испытаний при отработке.

Для создания методологии определения гарантированного ресурса двигателей в России рассматривается опыт отработки авиационных эксплуатируемых ГТД и опыт отработки ЖРД SSME.

Особенностью отработки SSME являлось то, что для ускоренного получения наиболее полной информации о работоспособности практиковался метод наращивания продолжительности огневых стендовых испытаний (ОСИ) с постепенным доведением продолжительности до требуемого гарантированного ресурса. При отказах двигателя не снимались со стенда, а заменялись агрегаты, вышедшие из строя. Это позволило сократить более чем в 2 раза количество дорогостоящих двигателей для отработки конструкции.

Степень отработки SSME была подтверждена не количественной оценкой вероятности безотказной работы, а демонстрацией работоспособности в ходе проведения ресурсных сертификационных испытаний с имитацией НШС. Это обеспечивалось при испытаниях двух двигателей в течение времени, удвоенным по сравнению с заданным.

Кроме того, полётная эксплуатация ДУ «Спейс-Шаттл» показала необходимость поэтапного подхода к решению существующих проблем оценки гарантированного ресурса при создании новых ЖРД многократного применения. Первый этап целесообразно ограничить 5 или 10 кратным полётным применением ДУ 1-й ступени РН.

Ремонтпригодность. Многократность использования ДУ определяет возможность и необходимость непрерывной оценки и обеспечения работоспособного состояния двигателей после каждого полёта. Опыт создания и эксплуатации ЖРД SSME в США показал, что необходимыми условиями поддержания работоспособного состояния двигателя являются: развитая диагностика определения технического состояния двигателя; отработанная система межполётного обслуживания и проведения ремонтных работ.

В конструктивном отношении ЖРД SSME имел ряд качественных отличий от ранее разработанных двигателей однократного применения. Эти отличия были направлены на обеспечение квалифицированного определения технического состояния и ремонта двигателя:

- блочность построения, включая отдельные ТНА подачи горючего и окислителя и агрегаты автоматики многоразового действия, что позволило уменьшить количество потребной материальной за счёт проведения замен между полётами отдельных узлов и агрегатов двигателей, потерявших работоспособность или выработавших ресурс;
- применение съёмных лопаток ТНА, устанавливаемых на диск турбины по схеме, принятой для авиационных ГТД, которая обеспечивает их замену без замены диска турбины;
- выбор конструкции и параметров работы насосов основных ТНА в классическом для насосов общепромышленного назначения варианте, обеспечивающих отсутствие кавитационных явлений и уменьшение вибрационных нагрузок;
- расширенный состав контролируемых параметров и мест осмотра технического состояния элементов конструкции с помощью эндоскопа;

– введение в состав двигателя бортовой цифровой вычислительной машины (ЦВМ), выполняющей функции управления, диагностирования и аварийной защиты.

Методология межполётного обслуживания двигателей SSME содержала проведение работ: по контролю технического состояния на основе автоматической обработки данных, зафиксированных ЦВМ, и визуального осмотра наиболее критичных элементов конструкции; по реализации операций обязательного (после каждого полёта) и периодического (после 3-4 полётов) планового обслуживания двигателей, а также операций внепланового обслуживания двигателей.

Внеплановое обслуживание заключалось в замене дефектных сменных узлов и агрегатов после введения необходимых модификаций. Сменными узлами и агрегатами считались такие, которые устанавливались без последующего контрольного огневого испытания двигателя. Причём в каждом конкретном случае нецелесообразность этой работы определялась на основе расчётной оценки стоимости проведения работ.

Общая продолжительность работ по межполётному обслуживанию уменьшалась по мере накопления опыта. Средняя стоимость одного межполётного обслуживания на конечном этапе эксплуатации РН «Спейс-Шаттл» составляла $\approx 4\%$ от стоимости изготовления ЖРД.

Обеспечение безопасности, живучести и сохраняемости

Под обеспечением безопасности, живучести и сохраняемости ДУ при многократном применении следует понимать:

- невозможность ущерба, приводящего к нарушению функционирования ДУ;
- сохранение работоспособности состояния ДУ в случаях возникновения нештатных ситуаций (НШС) или угроз их перерастания в аварийную ситуацию (АС);
- успешное возвращение на Землю с сохранением целостности конструкции и основных параметров двигателя.

Безопасность. Несмотря на реализацию высоких требований, предъявляемых к надёжности ЖРД, они всё же требуют защиты от разрушения в случаях возникновения НШС. При эксплуатации ДУ в составе 1-й ступени РН разрушение маршевых двигателей недопустимы. Применение быстродействующей системы автоматической аварийной защиты (САЗ) способствует безопасному функционированию двигателя, благодаря переводу его на пониженный режим работы или прекращению функционирования.

В настоящее время САЗ в стендовом варианте применяется при наземной отработке ЖРД в России и США. Известный из научно-технических публикаций опыт эксплуатации САЗ в стендовых системах управления показывает, что она не всегда позволяет предотвратить разрушение объекта испытаний ввиду быстроразвивающихся аварийных процессов (в течение времени $\leq 0,1-0,5$ секунд).

Условно принято характеризовать эффективность САЗ в виде зависимости коэффициента охвата ею аварийных ситуаций ($K_{\text{охв}}$) от её быстродействия [2,8,9]. $K_{\text{охв}}$ представляет собой отношение числа отказов, при которых САЗ мо-

жет своевременно отключить двигатель в аварийной ситуации, к общему числу потенциальных отказов. Быстродействие – это промежуток времени от момента отклонения контролируемых параметров за допустимые пределы до момента исполнения элементом ЖРД команды САЗ.

Об эффективности САЗ можно судить при рассмотрении экспериментальных данных, приведенных на рисунке 4. Эти данные были определены для российских двигателей малой размерности (РД-12, РД58Н) и большой размерности (РД-0120, РД-170), а также американских двигателей средней и большой размерности (J-2, SSME, F-1).

Результаты этих испытаний иллюстрируют тот факт, что схема и размерность двигателя, быстродействие измерительных средств и агрегатов пневмогидравлической схемы двигателя оказывают существенное влияние на эффективность аварийной защиты двигателя.

Применение САЗ в качестве эффективной системы сохранения конструкции в составе ДУ многократного применения является необходимой задачей обеспечения безопасности. Для этого важно осуществить решение ряда научно-технических вопросов по пассивной защите и по быстродействию технических средств активной защиты от разрушения элементов ЖРД с помощью САЗ.

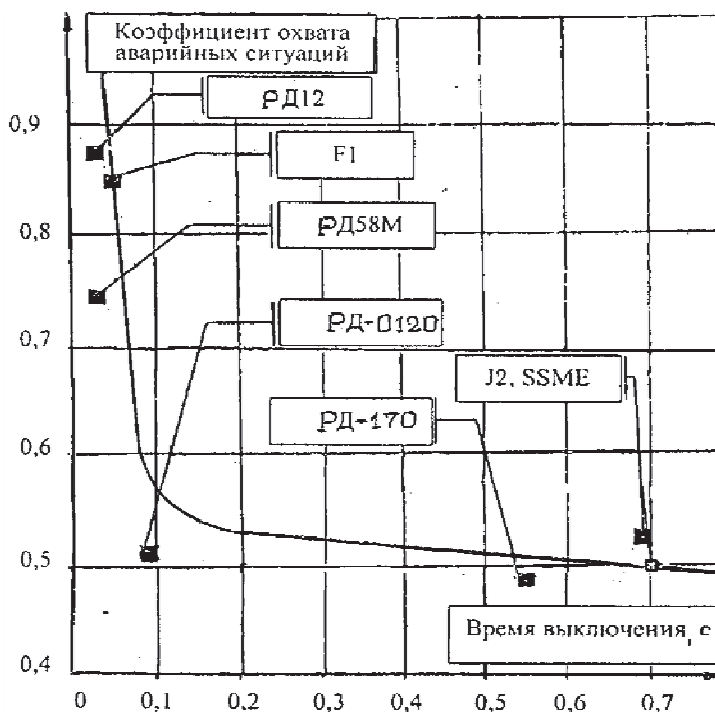


Рисунок 4 – Иллюстрация эффективности САЗ при стендовых испытаниях

Следует обратить внимание на то, что на лётных вариантах ДУ система САЗ присутствовала в составе РКС «Сатурн-Аполлон», «Спейс-Шаттл»,

«Энергия-Буран». Однако сведения об эффективности её работы при эксплуатации ДУ этих РКС из публикаций в научно-технической литературе неизвестны.

Живучесть. Логика работы САЗ в составе 1-й ступени ДУ позволяет реализовать «горячее» резервирование ЖРД. Под горячим резервированием понимается выключение в аварийной ситуации отказавшего одного из работающих в связке двигателей и форсирование работающих в связке других двигателей при сохранении их суммарной тяги для выполнения программы полёта.

Чем меньше в связке двигателей, тем выше общая надёжность ДУ ступени. Но с уменьшением числа двигателей растёт потребный уровень форсирования двигателей по тяге. Например, при 4-х двигателях в связке и выключении одного двигателя уровень форсирования работающих ЖРД составляет 33% (в отличие от имеющегося опыта $\leq 15\%$). На практике число ЖРД в связке определяется наличием отработанных двигателей конкретной размерности.

В рассмотренных публикациях приведены результаты расчётов, подтверждающие возможность реализации такого варианта с увеличением надёжности функционирования ДУ по сравнению с надёжностью одиночного ЖРД.

Следует обратить внимание и на другие важные преимущества ДУ, включающей маршевый двигатель в виде связи из четырёх ЖРД:

- возможность парирования возмущений при НШС, приводящих к необходимости значительного изменения тяги двигателя за счёт форсирования или дросселирования;
- обеспечение гарантированного ухода от стартового сооружения и предотвращение его разрушения при отказе одного из двигателей 1-ой ступени.

Разрушение стартового сооружения это более тяжёлая потеря, чем потеря возвращаемого блока РН. Например, потеря одного ракетного блока усложнит, но не остановит подготовки и проведения других аналогичных пусков. Этого нельзя сказать о стартовом комплексе, который дороже и сложнее возвращаемого ракетного блока.

Сохраняемость. Для обеспечения возврата ДУ 1-й ступени РН в настоящее время наиболее активно прорабатываются 2 варианта:

- с применением вертикального спуска ступени в результате дросселирования или отключения части двигателей в связке маршевых ЖРД (например, разработки в США для РН «Фалкон»);
- с применением аэродинамического спуска ступени в результате использования подъёмной силы крыльев и работающего воздушно-реактивного двигателя (например, разработки в России типа ракетного блока «Байкал» или «Буран»).

По оценкам специалистов наиболее рациональный способ спуска ДУ на Землю после выполнения программы полёта может быть выбран на основе экспериментальных работ с натурными ДУ или уменьшенными в размерах моделями их натуральных конструкций.

Заключение

Основной целью создания двигательных установок многократного применения является уменьшение стоимости создания и эксплуатации транспортной

ракетно-космической системы, а также улучшение экологической обстановки в ближнем космосе и на Земле.

Для успешного достижения указанной цели, прежде всего, необходимо решить задачи повышения надёжности, безопасности и живучести ЖРД, входящих в состав двигательных установок. На основе анализа опыта создания и эксплуатации ЖРД многократного применения типа SSME в США первоочередными задачами для решения указанных проблем являются;

- уменьшение напряжённости в работе конструкции ДУ и обеспечение «горячего» резервирования маршевых ЖРД;
- научно-техническое обоснование методологии экспериментальной отработки ЖРД для получения требуемого ресурса его работы и регламентирования количества успешных возвратов на Землю;
- определение принципа горячего резервирования ЖРД в полёте и создание быстродействующей системы аварийной защиты двигателя от разрушения с максимальным охватом потенциальных аварийных ситуаций;
- обеспечение сохранности конструкции и параметров ДУ при возврате на Землю и создание эффективной системы межполётной диагностики технического состояния и ремонта ЖРД.

Литература

1. Анфимов Н.А., Лукьященко В.И., Костромин С.Ф. Российская политика по многократным средствам выведения // Ракеты-носители Космодромы / под общей редакцией Ю.Н.Коптева. М: Изд-во Рестарт, 2001. С. 112-120.
2. Бершадский В.А., Коломенцев А.И. Основы технологии стендовых испытаний двигательных установок жидкостных ракет. Комплексная отработка. М: Изд-во МАИ, 2016. 162 с.
3. Вахниченко В.В., Петров В.И. Обоснование опережающего создания кислородно-метанового ЖРД для перспективных ракет-носителей лёгкого, среднего и тяжёлого классов // Космонавтика и ракетостроение. 1997. № 11. С. 112-118.
4. Вахниченко В.В., Кузин А.И., Лехов П.А. и др. Многократная космическая система. Ближайшие перспективы разработки и экспериментальной отработки // Авиакосмическая техника и технология. № 2. 2010. С. 9-18.
5. Воздействие ракетно-космической техники на окружающую среду / под редакцией В.В. Адушкина, С.И. Козлова, М.В. Сильникова. С. Петербург: Изд-во Наука, 2016. 795с. + 40 с ил.
6. Губанов Б.И. Триумф и трагедия «Энергии». Размышления главного конструктора. Н. Новгород: Изд-во Институт экономического развития, 1999. 300 с.
7. Ефимочкин А.Ф., Рачук В.С., Шостак А.В. Жидкостный ракетный двигатель для многократной ракетно-космической системы // Авиакосмическая техника и технология. 2010. № 4. С. 26-36.
8. Ефимочкин А.Ф., Войтов Г.Г. Оценка показателей безаварийной работы резервируемой ракетной установки космической ракеты // Насосы Турбины Системы. 2013. № 1(6). С. 71-76.

9. Жежеря А.Г. Перспективы развития аварийной защиты и диагностики энергонапряжённых жидкостных ракетных двигателей // Известия РАН «Энергетика». 2003. № 3. С. 25-32.
10. Кузин А.И., Лозин С.Н., Лехов П.А. и др. Проектные исследования ГКНПЦ им. М.В. Хруничева по обоснованию многоразовой космической системы // Авиакосмическая техника и технология. 2009. № 1. С.3-12.
11. Кузин А.И., Рачук В.С., Коротеев А.С. и др. Обоснование выбора компонентов ракетного топлива для двигательных установок первой ступени многоразовой ракетно-космической системы // Авиакосмическая техника и технология. 2010. № 1. С, 19-55.
12. Коротеев А.С., Нестеров В.А., Самойлов Л.П. Надёжность и безопасность перспективных ракет-носителей // Полёт. 2000. № 7. С. 3-10.
13. Клепиков И.А., Фатуев И.Ю., Иванов В.А. Метановые двигатели НПО «Энергомаш» для программы МРКС-1 // Авиакосмическая техника и технология. 2013. № 3. С. 30-41.
14. Нестеров В.Е., Кузин А.И., Рачук В.С. и др. ЖРД в составе первой ступени перспективной многоразовой ракетно-космической системы // Авиакосмическая техника и технология. 2010. № 3. С.26-32.
15. Петров А.И., Баньковская И.В., Белоусов И.И. К проектированию насосной системы подачи топлива в ЖРД многоразового использования // Труды НПО «Энергомаш». 2005. Вып. 23. С. 205-217.
16. Самарин Г. Сравнительный анализ методов отработки отечественных и американских ЖРД // Двигатель. 2001. № 1. С. 14-19.
17. Maizel D.K. Cost analysis for the liquid engine to booster rocket carrier // Journal of Propulsion and Power. 1988. Num.2. P. 118-126.
18. Klatt F.P. Подготовка двигателей SSME к пуску «Спейс-Шаттл»: перевод с английского // Launch operation of the SSME. AIAA. 83-1373.

УДК [521.322+531.391.5]:[629.78::528]

Кратные солнечно-синхронные орбиты полного покрытия Земли

Д.Ю. Виноградов, младший научный сотрудник,
филиал «Прецизионного навигационно-баллистического обеспечения»,
АО «Научно-производственная корпорация
«Системы прецизионного приборостроения», г. Королев, Московская область

В данной статье произведена систематизация и развитие материалов, изложенных в [1], по проектированию кратных солнечно-синхронных орбит полного покрытия Земли. Разработан алгоритм формирования каталога орбитальных структур космической системы в первом приближении на кратных околокруговых солнечно-синхронных орбитах. Приведён фрагмент каталога орбит для конкретных исходных данных в качестве примера.

Кратные орбиты, солнечно-синхронные орбиты, периодический обзор Земли, проектирование орбитальной структуры.

Multiple sun-synchronous orbits for full coverage of the Earth

D.Yu. Vinogradov, junior researcher,
Branch of Precizionnogo navigacionno-ballisticheskogo obespechenia branch,
АО Nauchno proizvodstvennaya korporazia Sistemy precizionnoo priborostroenia,
Korolev, Moscow region

In this article the systematization and development of the materials described in [1] on the design of multiple sun-synchronous orbits of the full coverage of the Earth is carried out. An algorithm for forming a catalog of satellite constellation in the first approximation on multiple near-circular sun-synchronous orbits is developed. A fragment of the orbit catalog for specific source data is given as an example.

Multiple orbits, sun-synchronous orbits, periodical Earth coverage, satellite constellation designing.

Введение

На сегодняшний день [1; 2] решение большинства задач дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) обеспечивается аппаратурой, функционирующей в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах спектра электромагнитных излучений. При этом наблюдение поверхности Земли возможно только в дневное время при возможно большей высоте Солнца над местным горизонтом в точке съёмки. Если требуемые условия освещённости не выполняются, то использование космического аппарата (КА) по целевому назначению оказывается невозможным. Поэтому космические системы (КС) с аппаратурой наблюдения данного типа, как правило, размещаются на околокруговых солнечно-синхронных орбитах (ССО).

Одним из основных этапов при баллистическом проектировании КС ДЗЗ является выбор орбитальной структуры (ОС) системы в первом приближении, основанный на анализе основных кинематических соотношений и характеристик (ограничений, связанных с условиями функционирования бортовой аппаратуры КА) и состоящий в подборе относительной расстановки КА в системе, выбираемой из условия решения целевой задачи, стоящей перед системой.

Также одним из требований, предъявляемых к баллистическому построению КС ДЗЗ, является обеспечение глобального обзора Земли (непрерывного глобального, глобального с заданной периодичностью) путём покрытия земного шара полосами захвата (полосами обзора) бортовой аппаратуры КА, время которого должно быть по возможности минимальным. Поэтому с точки зрения данного требования представляется целесообразным использовать кратные околокруговые ССО как наиболее предпочтительные для создания КС ДЗЗ. К тому же кратные орбиты позволяют разработать и затем осуществлять в центре управления полётами типовой план операций управления бортовым и наземным комплексами управления, который будет повторяться на любом периоде кратности.

Отметим, что в данной работе приведена часть материалов из [1], поскольку автор поставил перед собой задачу изложить всю необходимую информацию в полном объёме, чтобы читателю для понимания изложенного материала и повторения результатов не потребовался поиск дополнительных источников.

Основные соотношения

В соответствии с [3] межвитковое смещение гринвичской долготы восходящего узла орбиты $\Delta L_{\text{мв}}$ равно углу поворота Земли за один оборот спутника, т.е.

$$\Delta L_{\text{мв}} = T_{\text{др}} \omega_3, \quad (1)$$

где $T_{\text{др}}$ – драконический период обращения КА;

$\omega_3 = 7,29211 \cdot 10^{-5}$ рад/с – угловая скорость вращения Земли.

Это смещение отсчитывается в направлении с востока на запад, т.е. в сторону убывания восточной долготы. Из-за непрерывного смещения плоскости орбиты под влиянием нецентральности поля сил земного притяжения фактическое значение $\Delta L_{\text{мв}}$ несколько отличается от расчётного значения по приведённой выше формуле. Так в модели геопотенциала с учётом второй зональной гармоники (сжатия Земли) межвитковое смещение трассы полёта определяется выражением:

$$\Delta L_{\text{мв}} = T_{\text{др}} \omega_3 - \Delta \Omega, \quad (2)$$

где значение драконического периода обращения $T_{\text{др}}$ вычисляется по формуле [3]:

$$T_{\text{др}} = 2\pi \left\{ \sqrt{\frac{a^3}{\mu}} - \frac{\varepsilon}{\sqrt{\mu^3 p}} \left[3 - \frac{5}{2} \sin^2 i - e_1 (1 - 5 \sin^2 i) \right] \right\}; \quad (3)$$

$\Delta \Omega$ – смещение восходящего узла орбиты за виток полёта, определяемое по формуле [27]:

$$\Delta\Omega = -\frac{2\pi \cdot \varepsilon \cdot \cos i}{\mu r^2}. \quad (4)$$

Обозначим через $n_{\text{сут}}$ наименьшее целое число, определяемое по формуле:

$$n_{\text{сут}} = E \left[\frac{2\pi}{\Delta L_{\text{МВ}}} \right]. \quad (5)$$

где $E[\dots]$ – оператор взятия целой части числа.

Из выражения (5) следует, что КА делает $n_{\text{сут}}$ витков приблизительно за сутки. Поэтому число $n_{\text{сут}}$ обычно называют суточным числом витков орбиты или числом витков в полётных сутках [1].

Очевидно, что в начале витка $n_{\text{сут}} + 1$ КА наиболее близко подойдёт к своему исходному положению на начальном (первом) витке. Расстояние по дуге между 1-ым и $(n_{\text{сут}} + 1)$ -ым витками трассы полёта называется суточным смещением орбиты $\Delta L_{\text{сут}}$ и определяется по формуле:

$$\Delta L_{\text{сут}} = 2\pi - n_{\text{сут}} \cdot \Delta L_{\text{МВ}}. \quad (6)$$

Если отношение $2\pi/\Delta L_{\text{МВ}}$ является целым числом, то $\Delta L_{\text{сут}} = 0$ и КА через сутки возвратится в исходное положение. Орбиты такого типа обычно называют орбитами суточной кратности [3].

Если это отношение представляет собой рациональную дробь:

$$\frac{2\pi}{\Delta L_{\text{МВ}}} = \frac{n}{D}, \quad (7)$$

где n и D – целые числа, то КА возвратится в исходное положение (трасса КА замкнётся) через D суток, совершив при этом n полных витков. Интервал замыкания трассы в сутках (число D) называют периодом кратности орбиты, а сами такие орбиты – кратными.

В общем случае, когда отношение $2\pi/\Delta L_{\text{МВ}}$ является иррациональным числом, КА вообще не возвратится в исходное положение. Однако стоит отметить, что иррациональное число с любой степенью точности может быть приближено рациональным числом n/D . В частности, как отмечено [1], можно найти десятичную дробь, как угодно мало отличающуюся от данного иррационального числа. Поскольку численные расчёты могут проводиться только с конечным числом десятичных знаков, то это даёт определённые основания говорить, что «все орбиты – кратные», только кратность их может быть весьма велика.

Согласно общему определению, орбита имеет D -суточную кратность, если за D эффективных суток КА сделает n полных витков, где под эффективными сутками подразумевается время, за которое Земля в своём суточном вращении совершает один полный оборот относительно плоскости прецессирующей орбиты [1].

Для ССО эффективные сутки есть средние солнечные сутки

$T_{c.c} = 86400$ с. Исходя из определения кратной орбиты, для кратной ССО имеет место соотношение:

$$T_{др} = T_{c.c} \frac{D}{n}. \quad (8)$$

Отношение n/D может быть представлено в виде правильной дроби:

$$\frac{n}{D} = \left\{ n_{сут} \frac{m}{D} \right\}, \quad (9)$$

где

$$n_{сут} = E[n/D]; \quad (10)$$

$m = 0, 1, 2, \dots, D - 1$ – целое число витков, называемое индексом кратной орбиты, которое совершит КА в период кратности D за счёт превышения суточного числа витков n/D над числом витков в полётных сутках $n_{сут}$.

Числа m и D – взаимно простые натуральные числа. Выражение (9) позволяет вычислять число витков n за период кратности орбиты как:

$$n = n_{сут}D + m. \quad (11)$$

Далее для указания кратности орбиты будет использоваться обозначение $K\{D; n\}$. Приближённо значение большой полуоси орбиты на экваторе определяется формулой [1]:

$$a = \left[\frac{\sqrt{\mu} \cdot T_{c.c}}{2\pi \frac{n}{D}} \right]^{\frac{2}{3}}, \quad (12)$$

откуда, с использованием зависимости $h_{cp} = a - R_e$, средняя высота орбиты вычисляется как:

$$h_{cp} = \left[\frac{\sqrt{\mu} \cdot T_{c.c}}{2\pi \left(n_{сут} + \frac{m}{D} \right)} \right]^{\frac{2}{3}} - R_e. \quad (13)$$

Из (13) выражается зависимость для отношения n/D :

$$\frac{n}{D} = \left[\frac{\sqrt{\mu} \cdot T_{c.c}}{2\pi (R_e + h_{cp})} \right]^{\frac{3}{2}}. \quad (14)$$

Учитывая (9), получаем выражение для $n_{сут}$:

$$n_{сут} = E \left[\left[\frac{\sqrt{\mu} \cdot T_{c.c}}{2\pi (R_e + h_{cp})} \right]^{\frac{3}{2}} \right]. \quad (15)$$

Выражение (15) позволяет утверждать, что каждое число $n_{\text{сут}}$ соответствует определённому слою высот. Например, орбиты с $n_{\text{сут}} = 14$ располагаются в высотном слое [570; 897] км.

Элементарные преобразования выражений (6), (7) и (11) дают соотношение:

$$\Delta L_{\text{сут}} D = \Delta L_{\text{мв}} m = \Delta L_D. \quad (16)$$

Из соотношения (16) следует, что m межвитковых расстояний равны D суточным сдвигам. Данное следствие не используется для $m = 0$, т.е. для орбит суточной кратности, на которых КА совершает целое число витков за одни полётные сутки.

Величину ΔL_D называют сдвигом трассы за период кратности D [1]. Необходимость использования этого понятия обусловлена тем, что изомаршрутность расположения трасс на поверхности Земли проявляется не на межвитковом расстоянии, а на участке экватора длиной ΔL_D , поэтому свойства кратных орбит, например, полноту и частоту покрытия экватора полосами обзора бортовой аппаратуры, можно изучать не на всей длине экватора, а только на его части, равной сдвигу трассы.

Выполнение условия непрерывности покрытия на экваторе достаточно для выполнения условия непрерывности покрытия на широте $B \neq 0$ (точнее на $0 < B \leq i$).

Для анализа условий покрытия земной поверхности вводится понятие эквивалентной ширины полосы обзора на экваторе, являющейся проекцией поперечной ширины полосы обзора бортовой аппаратуры КА в узле орбиты на линию экватора [1]:

$$b_э = \frac{b_\alpha}{\sin i}, \quad (17)$$

где b_α – поперечная ширина полосы обзора, соответствующая углу обзора α .

В (17) и далее полагается, что $b_э < \Delta L_{\text{мв}}$. В противном случае разрывов покрытия не может быть – задача о покрытии вырождается.

Понятно, что если кратность орбиты задана, то только ширина полосы обзора определяет, будет ли обеспечено полное покрытие или нет.

Поперечная ширина полосы обзора b_α измеряется длиной дуги большого круга сферической Земли с радиусом R_e и вычисляется с помощью соответствующего значения геоцентрического угла ψ_α по формуле [1]:

$$b_\alpha = R_e \psi_\alpha, \quad (18)$$

где угол ψ_α , измеряемый в радианах, вычисляется по значениям средней высоты полёта $h_{\text{ср}}$ и угла обзора α по формуле:

$$\psi_\alpha = 2 \left\{ \arcsin \left[\left(1 + \frac{h_{\text{ср}}}{R_e} \right) \sin \frac{\alpha}{2} \right] - \frac{\alpha}{2} \right\}. \quad (19)$$

Поперечную ширину полосы захвата в надире ввиду малости величины

угла захвата β можно определить простой формулой:

$$b_\beta = 2h \operatorname{tg} \frac{\beta}{2}. \quad (20)$$

Когда линия визирования оптической оси видеоаппаратуры отклонена от надира на величину угла крена КА γ , значение b_β вычисляется по формуле:

$$b_\beta = R_e \left\{ \arcsin \left[\left(1 + \frac{h_{\text{CP}}}{R_e} \right) \sin \left(\gamma + \frac{\beta}{2} \right) \right] - \arcsin \left[\left(1 + \frac{h_{\text{CP}}}{R_e} \right) \sin \left(\gamma - \frac{\beta}{2} \right) \right] - \beta \right\}. \quad (21)$$

Если задано значение поперечной ширины полосы обзора b_α , то угол обзора α при заданной высоте h_{CP} , определяется выражением:

$$\alpha = 2 \operatorname{arctg} \left(\frac{R_e \sin \frac{\psi_\alpha}{2}}{h_{\text{CP}} + R_e \sin \frac{\psi_\alpha}{2} \operatorname{tg} \frac{\psi_\alpha}{4}} \right). \quad (22)$$

Условие, обеспечивающее полное покрытие экватора, можно сформулировать в виде следующей теоремы [1].

Теорема о полном покрытии. *Для того чтобы ССО кратности $K[D; n]$ была орбитой полного покрытия, необходимо и достаточно, чтобы ширина полосы обзора удовлетворяла условию:*

$$b_3 \geq \frac{\Delta L_{\text{сут}} R_e}{m} = \frac{\Delta L_{\text{мв}} R_e}{D} = \frac{2\pi R_e}{n} = b_3^{\min}, \quad (23)$$

при этом полное покрытие будет осуществлено за время, не превосходящее период кратности D .

В соотношениях (23) произведения $\Delta L_{\text{сут}} R_e$ и $\Delta L_{\text{мв}} R_e$ представляют собой соответственно линейные меры суточного и межвиткового смещений по длине экватора.

При анализе покрытия экватора полосами обзора аппаратуры КА удобно использовать относительную ширину полосы обзора:

$$\bar{b}_3 = \frac{b_3}{b_3^{\min}}. \quad (24)$$

Условие (23) с учётом (24) эквивалентно записи \bar{b}_3 .

$$\bar{b}_3 \geq 1. \quad (25)$$

Время, в течение которого достигается сплошное покрытие экватора, называют продолжительностью сплошного покрытия $T_{\text{СП}}$. Если $\bar{b}_3 = 1$, то полосы обзора без перекрытий один раз накроют все точки межвиткового расстояния (а значит, и весь экватор) за период кратности D , т.е. $T_{\text{СП}} = D$. Если же $\bar{b}_3 = D$, что эквивалентно $b_3 = \Delta L_{\text{мв}}$, то период сплошного покрытия экватора полосами обзора равен одним суткам. При $\bar{b}_3 > 1$ соседние полосы обзора начнут перекрываться, и наряду с одноразовым появятся участки экватора с покрытием два и

более раз. Можно сказать, что обеспечивается f -разовое покрытие некоторой точки экватора, если эта точка f раз за период кратности N накрывается полосой обзора бортовой аппаратуры КА. Если данное условие выполняется для любой точки экватора, то имеет место f -разовое покрытие экватора за период кратности орбиты [1].

Теорема о частоте покрытия. Для того чтобы на ССО кратности $K[D; n]$ частота покрытия экватора за период кратности орбиты равнялась f , где $f = 1, \dots, N$, необходимо и достаточно, чтобы полоса обзора имела относительную ширину $\bar{b}_3 = f$.

Теорема с некоторым уточнением может быть распространена на случай \bar{b}_3 – не целое. При этом в качестве f рассматривается целая часть \bar{b}_3 :

$$f = E[\bar{b}_3]. \quad (26)$$

В этом случае вся длина экватора покрывается полосой обзора за период кратности орбиты f раз, и $(\bar{b}_3 - f) \cdot 100\%$ длины экватора покрывается $f + 1$ раз.

Коэффициент перекрытия полос обзора определяется по формуле:

$$\xi = \left(1 - \frac{\Delta \bar{L}_{\text{см}}}{\bar{b}_3}\right) \cdot 100\%, \quad (27)$$

где $\Delta \bar{L}_{\text{см}}$ – относительная линейная величина, равная

$$\Delta \bar{L}_{\text{см}} = \frac{\Delta L_{\text{см}} R_e}{b_3^{\text{min}}}; \quad (28)$$

$\Delta L_{\text{см}}$ – разность гринвичских долгот узлов орбит со смежными (перекрываемыми) полосами обзора.

В общем случае за период кратности орбиты смежные полосы обзора системы КА могут перекрываться с разным коэффициентом перекрытия. При этом выделяют величины максимального ξ_{max} и минимального ξ_{min} коэффициентов перекрытия, которые могут быть как положительными (полосы перекрываются), так и отрицательными (полосы не перекрываются).

Если для орбиты кратности $K[D; n]$ требуется обеспечить заданную продолжительность сплошного покрытия экватора $T_{\text{СП}}$, то бортовая аппаратура должна обладать величиной относительной ширины полосы обзора не менее, чем \bar{b}_3^T [1]:

$$\bar{b}_3^T = \begin{cases} D, & \text{при } T_{\text{СП}} = 1; \\ D - m(T_{\text{СП}} - 1), & \text{при } 1 < T_{\text{СП}} < k; \\ m, & \text{при } T_{\text{СП}} = k; \\ 1, & \text{при } T_{\text{СП}} = D, \end{cases} \quad (29)$$

где

$$k = E \left[\frac{D}{m} \right]^+ ; \quad (30)$$

$E[\dots]^+$ – оператор получения наибольшего ближайшего целого числа. Так если A – целое число, то $E[A]^+ = A$; если A – рациональное число, то $E[A]^+ = A + 1$.

Зная \bar{b}_3^T , легко определяется требуемое число КА с шириной полосы обзора \bar{b}_3 , размещённых в одной плоскости орбиты, для обеспечения времени $T_{СП}$:

$$S^T = E \left[\frac{\bar{b}_3^T}{\bar{b}_3} \right]^+ . \quad (31)$$

Числа КА, определяемого по формуле (31), будет достаточно для обеспечения сплошного покрытия экватора за время $T_{СП}$, если КА разместить таким образом, чтобы полосы обзора соседних спутников перекрывали или касались друг друга. Но такая расстановка КА не всегда удовлетворяет выдвигаемому требованию об их равномерном расположении в плоскости орбиты. В случае выполнения указанного требования может получиться такой вариант расстановки КА, что появятся участки на экваторе, наблюдение которых в течение времени $T_{СП}$ окажется невозможным, чему при вычислениях будет соответствовать наличие отрицательных коэффициентов перекрытия. Тогда подобные орбиты исключаются из рассмотрения.

При известной кратности орбиты и ширине полосы обзора может потребоваться определить период сплошного покрытия экватора за период кратности орбиты одним КА, если при этом частота покрытия экватора $f \geq 2$ (при $f = 1$ $T_{СП} = D$).

Используя (27), получается:

$$T_{СП} = \begin{cases} 1, & \text{при } f = D; \\ E \left[\frac{D - f}{m} \right]^+ + 1, & \text{при } m < f < D; \\ k, & \text{при } f = m; \\ D, & \text{при } f = 1. \end{cases} \quad (32)$$

В выражениях (29) и (32) отсутствует взаимосвязь между периодом сплошного покрытия экватора и относительной шириной полосы обзора, когда соответственно $k < T_{СП} < N$ и $2 \leq \bar{b}_3 < m$. Для охвата всех возможных вариантов требований к характеристикам сплошного покрытия экватора автором разработаны алгоритмы, позволяющие однозначно определить связь между $T_{СП}$ и \bar{b}_3 в обозначенных диапазонах значений.

Алгоритмы получены при анализе распределения полос обзора на интервале, равному одному межвитковому расстоянию, поскольку за период кратности орбиты на межвитковое расстояние приходится D не повторяющихся распо-

ложений полос обзора. Значит, если полосами обзора обеспечивается сплошное покрытие межвиткового расстояния, то ими будет покрыта вся длина экватора.

Для удобства вычислений значения межвиткового и суточного смещений приведены к относительным величинам по аналогии с $\Delta L_{\text{см}}$. Поэтому

$$\Delta \bar{L}_{\text{мв}} = D; \Delta \bar{L}_{\text{сут}} = m. \quad (33)$$

За счёт того, что расчёты ведутся в относительных величинах, особенностью обоих алгоритмов является выполнение операций с целыми числами.

Алгоритм А. Определение относительной ширины полосы обзора \bar{b}_3^T при известной величине периода сплошного покрытия экватора $T_{\text{СП}}$.

1) Формируется массив разностей $\Delta \bar{L}_j$ между относительными гринвичскими долготами узлов с номерами $j = 1 \dots T_{\text{СП}}$, приходящимися на одно межвитковое расстояние, и долготой узла, расположенного в левом крае этого межвиткового расстояния. Значение j определяется номером суток, в которые получено расположение узла внутри межвиткового расстояния. Величина $\Delta \bar{L}_{\text{нач.тр}}^j$ рассчитывается по формуле

$$\Delta \bar{L}_j = m(j - 1) \quad (34)$$

и приводится к интервалу $(0; D)$. Также в массив записывается величина $\Delta \bar{L}_{\text{мв}} = D$.

2) В сформированном массиве производится сортировка его элементов по возрастанию, но с сохранением привязки к каждому элементу его номера j .

3) Формируется второй массив, элементами которого являются пары чисел $[\Delta \bar{L}_{\text{см}}; j]$: разность относительных гринвичских долгот между смежными узлами (разность между соседними элементами первого массива) и наибольший номер узла из рассматриваемых на итерации.

4) Второй массив сортируется по убыванию $\Delta \bar{L}_{\text{см}}$. При равенстве у соседних элементов величины $\Delta \bar{L}_{\text{см}}$ большим считается тот, у которого больше номер j .

5) Выбирается первый элемент отсортированного второго массива $[\Delta \bar{L}_{\text{см}}; j]^1$. Тогда искомая относительная ширина полосы обзора $\bar{b}_3^T = \Delta \bar{L}_{\text{см}}^1$. При этом если $j^1 = T_{\text{СП}}$, то сплошное покрытие экватора обеспечивается за время $T_{\text{СП}}$. Если же $j^1 < T_{\text{СП}}$, то экватор покрывается полосой обзора \bar{b}_3^T за время j^1 .

Алгоритм Б. Определение периода сплошного покрытия экватора $T_{\text{СП}}$ при известной величине относительной ширины полосы обзора \bar{b}_3 .

Определяется частота покрытия экватора f по формуле (26). Формируется цикл по $j = 1 \dots D$. На каждой итерации:

1) Вычисляется величина $\Delta \bar{L}_j$, приводимая к интервалу $(0; D)$:

$$\Delta \bar{L}_j = m(j - 1). \quad (35)$$

2) Определяется диапазон покрытия межвиткового расстояния полосой обзора j -го узла, представляемый в виде целочисленного множества $w_j = \{\Delta\bar{L}_j + 1; \Delta\bar{L}_j + f\}$.

3) Осуществляется объединение множеств: $w_j \cup W$, где W – результирующее множество.

4) Цикл прекращается, когда размер множества W равен D . В этом случае период сплошного покрытия равен последнему значению j : $T_{СП} = j$.

Приведённые алгоритмы примечательны тем, что, в отличие от подхода, изложенного в [1], они позволяют определить необходимую ширину полосы обзора для всего диапазона $T_{СП} \in [1; D]$, где $T_{СП}$ – целое число суток.

Таким образом, соотношения (29) и (32) для орбиты кратности $K[D; n]$ с учётом дополнений записываются в виде:

$$\bar{b}_3^T = \begin{cases} D, & \text{при } T_{СП} = 1; \\ D - m(T_{СП} - 1), & \text{при } 1 < T_{СП} < k; \\ m, & \text{при } T_{СП} = k; \\ \bar{b}_3^A, & \text{при } k < T_{СП} < D; \\ 1, & \text{при } T_{СП} = D, \end{cases} \quad (36)$$

где \bar{b}_3^A – относительная ширина полосы обзора, вычисляемая по алгоритму А;

$$T_{СП} = \begin{cases} 1, & \text{при } f = D; \\ E \left[\frac{D - f}{m} \right]^+ + 1, & \text{при } m < f < D; \\ k, & \text{при } f = m; \\ T_{СП}^B, & \text{при } 1 < f < m; \\ D, & \text{при } f = 1, \end{cases} \quad (37)$$

где $T_{СП}^B$ – период сплошного покрытия экватора, вычисляемый по алгоритму Б.

Алгоритм формирования каталога орбитальных структур космической системы в первом приближении на кратных околокруговых геометрически устойчивых солнечно-синхронных орбитах

Исходными данными для задачи выбора ОС являются:

- 1) Угол обзора бортовой аппаратуры α .
- 2) Диапазон средних высот полёта КА $[h_{ср}^{\min}; h_{ср}^{\max}]$.
- 3) Период сплошного покрытия всех точек экватора полосами обзора (захвата) бортовой аппаратуры $T_{СП}$, сутки.
- 4) Максимальный период кратности орбиты D_{\max} , сутки.
- 5) Минимальный коэффициент перекрытия полос обзора ξ_{\min} , %.

Требуется в соответствии с принятыми исходными данными сформировать каталог, содержащий множество альтернативных вариантов ОС на кратных геометрически устойчивых ССО, ранжированных по приоритету:

- 1) в первую очередь по возрастанию необходимого числа КА в ОС;
- 2) во вторую очередь по возрастанию средней высоты КА.

Допущения:

- все КА должны быть размещены в плоскости одной орбиты;
- не используются орбиты суточной кратности;
- равномерная расстановка КА в плоскости орбиты.

Для решения задачи разработан алгоритм формирования ОС системы КА. В основу алгоритма заложен перебор кратных ССО в заданном диапазоне средних высот. В процессе перебора исключаются варианты орбит суточной кратности (индекс орбиты $m = 0$), т.к. для обеспечения сплошного покрытия экватора полосами обзора бортовой аппаратуры на орбитах суточной кратности необходимо, чтобы ширина полосы обзора была не менее межвиткового сдвига орбиты, что не всегда возможно. К тому же на динамику таких орбит существенное влияние оказывает явление резонанса [4]. Дополнительно для определения параметров кратных геометрически устойчивых орбит применялся алгоритм из статьи [5], учитывающий сжатие Земли.

Алгоритм формирования каталога ОС КС в первом приближении на кратных околокруговых геометрически устойчивых ССО заключается в выполнении следующей последовательности действий:

- 1) по формуле (15) для заданных минимальной $h_{\text{cp}}^{\text{min}}$ и максимальной $h_{\text{cp}}^{\text{max}}$ средних высот определяются соответственно $n_{\text{сут}}^{\text{min}}$ и $n_{\text{сут}}^{\text{max}}$ и осуществляется перебор суточного числа витков $n_{\text{сут}} = n_{\text{сут}}^{\text{min}} \dots n_{\text{сут}}^{\text{max}}$;
- 2) при фиксированном значении $n_{\text{сут}}$ осуществляется перебор величины периода кратности $D = 2 \dots D_{\text{max}}$;
- 3) при фиксированной величине D выполняется перебор индекса орбиты $m = 1 \dots D - 1$;
- 4) для текущих значений $\{n_{\text{сут}}; D; m\}$ вычисляется количество полных витков за период кратности по формуле (11);
- 5) параметры кратности $K\{D; n\}$ используются для определения параметров $T_{\text{др}}, a, e, i, \omega$ геометрически устойчивой ССО с помощью алгоритма из [5];
- 6) по формуле (13) определяется средняя высота орбиты в восходящем узле h_{cp} , при этом если $h_{\text{cp}} \in [h_{\text{cp}}^{\text{min}}; h_{\text{cp}}^{\text{max}}]$, то осуществляется переход к п.7, иначе продолжается перебор кратных орбит в соответствии с пунктами 1, 2, 3;
- 7) по известным значениям угла обзора, высоты и наклона плоскости орбиты с помощью формул (17), (18) и (24) вычисляется относительная ширина полосы обзора бортовой аппаратуры \bar{b}_3 ;
- 8) по формуле (36) рассчитывается требуемая полоса обзора для обеспечения времени полного покрытия экватора \bar{b}_3^T ;
- 9) требуемое количество КА S^T находится по формуле (31);
- 10) определяются минимальный и максимальный коэффициенты перекрытия полос обзора системы КА, для этого:

- формируется двойной цикл: внешний по $j = 1 \dots D$, внутренний по $s = 1 \dots S^T$;
- формируется массив относительных положений узлов всех КА системы, приходящихся на одно межвитковое расстояние, относительно левого края этого межвиткового расстояния

$$\Delta \bar{L}_{js} = m(j - 1) + D \frac{s - 1}{S^T}, \quad (38)$$

причём величина $\Delta \bar{L}_{js}$ приводится к интервалу $(0; D)$; дополнительно в массив записывается величина $\Delta \bar{L}_{мв} = D$;

- сформированный массив сортируется по возрастанию;
- по формуле (27) между соседними элементами отсортированного массива определяется коэффициент перекрытия; среди полученного множества коэффициентов перекрытия выбираются искомые минимальное и максимальное значения.

В результате выполнения указанной последовательности действий формируется каталог ОС, характеристики которых удовлетворяют исходным требованиям. Из этого каталога выбирается вариант, наиболее приемлемый с точки зрения требований проектировщика.

Пример расчёта каталога

Применение разработанного алгоритма рассмотрим для следующих исходных данных:

- 1) Угол обзора бортовой аппаратуры $\alpha = 85,3^\circ$.
- 2) Диапазон средних высот полёта КА $[300; 800]$ км.
- 3) Период сплошного покрытия экватора полосами обзора бортовой аппаратуры КА $T_{сп} = 1$ сут.
- 4) Максимальная кратность замыкания трассы полёта КА $D_{max} = 14$ сут.

В таблице 1 приведён фрагмент каталога ОС, соответствующий исходным данным.

Сформированный каталог содержит 367 вариантов орбитальных построений КС. Теперь требуется из множества вариантов выбрать один.

При выборе ОС из каталога можно руководствоваться различными критериями. В качестве примера предлагается выбрать вариант, удовлетворяющий критерию минимального числа КА, размещаемых на минимальной высоте, при обеспечении коэффициента перекрытия полос обзора аппаратуры КА не менее заданного. Такому критерию соответствует орбита 2-хсуточной кратности с замыканием трассы через 29 витков полёта (позиция 19 в таблице 1).

При размещении КС на орбите с выбранной кратностью для обеспечения покрытия экватора за сутки потребуется 2 КА, разнесённых в плоскости орбиты на 180 град по аргументу широты.

Таблица 1 – Фрагмент каталога орбитальных структур на кратных околокруговых геометрически устойчивых ССО

№	S	h _{ср} , км	D, сутки	m	n _{сут}	n	b _э , км	ξ _{min} , %	T _{др} , мин	a, км
1	2	700,8	26	15	14	379	1374,6	0,00	98,786	7082,2
2	2	702,6	7	4	14	102	1378,4	0,23	98,824	7084,0
18	2	719,8	27	14	14	392	1414,4	2,42	99,184	7101,2
19	2	725,8	2	1	14	29	1427,1	3,17	99,310	7107,2
20	2	731,9	27	13	14	391	1439,8	3,90	99,437	7113,3
139	2	881,7	28	1	14	393	1760,3	18,90	102,595	7263,0
140	2	906,4	28	27	13	391	1814,3	20,91	103,120	7287,7
141	2	906,9	27	26	13	377	1815,3	20,95	103,130	7288,2
211	2	998,5	27	19	13	370	2018,1	27,55	105,081	7379,8
212	2	999,8	10	7	13	137	2021,1	27,63	105,109	7381,1
213	3	500,7	23	5	15	350	964,6	8,99	94,629	6882,2
214	3	501,7	14	3	15	213	966,4	9,15	94,648	6883,1
264	3	555,6	27	1	15	406	1075,5	17,40	95,764	6937,1
265	3	556,0	28	1	15	421	1076,3	17,46	95,772	6937,5
266	3	578,1	28	27	14	419	1121,2	20,38	96,229	6959,5
267	3	578,5	27	26	14	404	1122,0	20,43	96,238	6959,9
365	3	697,2	17	10	14	248	1367,0	33,01	98,710	7078,5
366	3	698,7	12	7	14	175	1370,3	33,15	98,743	7080,1
367	3	700,2	19	11	14	277	1373,3	33,28	98,773	7081,5

Выводы

Разработан алгоритм формирования каталога орбитальных структур КС на кратных геометрически устойчивых ССО, удовлетворяющих заданным требованиям землеобзора. Каталог позволяет проектировщику из множества альтернативных вариантов ОС выбрать наиболее приемлемый с точки зрения принятых критериев.

Разработанный алгоритм обладает новизной, заключающейся в том, что становится возможным определить необходимую ширину полосы обзора в зависимости от заданного периода сплошного покрытия экватора для диапазона значений $T_{СП} \in [1; D]$, где $T_{СП}$ – период сплошного покрытия экватора, измеряемый целым числом суток; D – период кратности орбиты в сутках. Существующий подход, изложенный в [1], позволяет производить расчёты ширины полосы обзора для более узкого диапазона значений периодичности покрытия экватора $T_{СП} \in \left[1; E \left[\frac{D}{m}\right]^+\right]$.

Литература

1. Чернов А.А., Чернявский Г.М. Орбиты спутников дистанционного зондирования Земли // М.: Радио и связь. 2004. 202 с.

2. Концепция развития российской космической системы дистанционного зондирования Земли на период до 2025 года // М.: Российское космическое агентство. 2006. 72 с.
3. Эльясберг П.Е. Введение в теорию полёта искусственных спутников Земли. М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1965. 540 с.
4. Назаренко А.И., Скребушевский Б.С. Эволюция и устойчивость спутниковых систем. М.: Машиностроение, 1981. 284 с.
5. Виноградов Д.Ю. Алгоритмы формирования геометрически средних орбит минимального изменения высоты для космических систем дистанционного зондирования Земли // Инновац. аспекты соц.-экон. развития региона: сб. материалов VIII Ежегодной науч. конф. аспирантов «МГОТУ» (научоград Королёв, Моск. обл., 17 мая 2018 г.) / Технологический университет. 2018. С. 108-117.

УДК 629

Концептуальные основы численно-экспертного метода синергетической оптимизации сложных ракетно-космических объектов при исследовательском их аванпроектировании

Г.Г. Вокин, доктор технических наук, профессор, заведующий базовой кафедрой «Управление и информационные технологии в космических системах», заслуженный деятель науки Российской Федерации, Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Московской области «Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза, летчика-космонавта А.А. Леонова», г. Королев, Московская область,
О.В. Егоров, кандидат технических наук, НИИ космических систем имени А.А. Максимова – филиал АО «ГКНПЦ им. М.В. Хруничева», г. Королев, Московская область

В статье излагаются основы предлагаемого метода выбора параметров сложных проектируемых объектов в заданных диапазонах их значений, которые отыскиваются, исходя из условия, что ведущие показатели эффективности будут достигать максимальных значений, а сопутствующие показатели будут находиться в заданных диапазонах ограничений.

Метод является, по существу, инструментом компьютерной поддержки проектантов при поисковом исследовательском аванпроектировании сложных технических объектов, нацелен в конечном итоге на выбор синергетически оптимальных конструкторских решений и сокращение трудозатрат на этапе поиска и формирования предпочтительных вариантов технических обликов проектируемых изделий ракетно-космической техники.

Сложные технические объекты-изделия, исследовательское аванпроектирование, синергетическая оптимизация, диапазоны изменения параметров объекта и показателей эффективности, численно-экспертные процедуры алгоритма оптимизации.

Conceptual foundations of the numerical expert method of synergetic optimization of complex rocket and space objects during their research advance design

G.G. Vokin, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Basic Department «Management and Information Technologies in Space Systems», Honored Scientist of the Russian Federation, State Budgetary Educational Institution of Higher Education of the Moscow Region «Technological University named after twice Hero of the Soviet Union, pilot-cosmonaut A.A. Leonov», Korolev, Moscow region,
O.V. Egorov, Candidate of Technical Sciences, Khrunichev State Research and Production Space Center Space Systems Institute, Korolev, Moscow region

The article outlines the basics of the proposed method for selecting the parameters of complex projected objects in the specified ranges of their values, which are found based on the condition that the leading performance indicators will reach the maximum values, and the accompanying indicators will be in the specified ranges of values.

The method is, in essence, a tool for computer support of designers in the search and research design of complex technical objects, aimed ultimately at choosing synergistically optimal design solutions and reducing labor costs at the stage of searching and forming preferred variants of the technical appearance of the designed products of rocket and space technology.

Complex technical objects-products, research design, synergetic optimization, ranges of changes in object parameters and performance indicators, numerical and expert optimization algorithm procedures.

Введение

Проектирование объектов, особенно таких достаточно сложных, как изделия ракетно-космической техники, остаётся до настоящего времени слабоформализованной процедурой в силу присутствия творческого начала и процессов поиска при формировании технических обликов изделий. Тем не менее соответствующими специалистами предпринимаются немалые усилия, чтобы уменьшить влияние этих трудностей, ускорить и сделать процессы проектирования более эффективными, особенно в связи с возможностями использования элементов искусственного интеллекта и высокой производительности вычислительной техники. Эта тенденция напрямую касается исследовательского синтеза сложных изделий, на повышение эффективности которого и уменьшение негативного влияния упомянутого выше пробела направлена данная статья.

Как свидетельствует практика, подлежащие проектированию объекты в области ракетно-космической техники являются достаточно сложными и многосвязными. При поисковом проектировании возникают непростые вопросы оценки качества рассматриваемых научно-технических решений. В связи с этим отметим, что всякий в общем случае объект (предмет, изделие, система, комплекс и т.д.) может быть охарактеризован согласно «теории элементов» английского философа Бэкона некоторым множеством показателей, критериев или свойств.

Верхнюю границу количества элементов в упомянутом множестве характеристик установить принципиально невозможно, но на практике с учётом функционального назначения изделия проектант или пользователь могут устанавливать (выбрать) определённое ограничение и обозримое их количество, а также выбрать важнейший ведущий показатель среди них. В процессе создания (проектирования, синтеза, изготовления и т.д.) изделия проектант стремится, естественно, улучшить важнейший (ведущий, глобальный, главный) показатель, но при этом по практическим естественным соображениям другие элементы множества показателей должны находиться в некоторых характерных для них диапазонах,

которые назначаются проектантом из опытно-теоретических и экспертных соображений по обеспечению полноценного устойчивого функционирования изделия согласно его назначению.

На практике проектировщик изделия, стремящийся обеспечить максимальное значение главных показателей, сталкивается с противоречием: другие (сопутствующие) показатели могут выходить за границы упомянутых диапазонов допустимых их значений. Это совершенно естественная и обычная ситуация, при этом возникает задача, разрешение которой связано с большим числом вариантов принятия решений, как правило, численно-экспертным путём. При этом отметим, что, как свидетельствует практика, к относительно простым задачам многоэкстремальной оптимизации по поиску глобального экстремума к аналитическим или численно-аналитическим способам решения задач, к сожалению, свети не удаётся [1-4].

В связи с этим возникает необходимость формирования рационального численно-экспертного формализма для решения задач исследовательского синтеза упомянутого типа, чтобы, по возможности, сократить область интуитивных решений проектанта, которые далеко не всегда бывают рациональными и обеспечить этим самым поиск более объективных и обоснованных решений при синтезе проектируемых изделий.

Задачи такого рода при проектировании сложных объектов ракетно-космической техники возникают, как правило, почти всегда. При наличии высокопроизводительных современных компьютеров и разработке достаточно адекватных математических моделей проектируемых изделий задачи упомянутого типа поддаются решению, что имеет большое практическое значение не только с точки зрения получения возможно более рациональных научно-технических вариантов решений, но и с точки зрения сокращения временных и финансовых затрат на проектирование изделий.

Постановка задачи численно-экспертной оптимизации и выбора синергетически рациональных вариантов параметров проектируемых изделий

Предпосылки, исходные данные, ограничения, допущения и условия.

Пусть проектируемый объект Q характеризуется некоторой совокупностью варьируемых показателей \mathcal{E}_i эффективности, которые могут быть взаимозависимыми и обусловленными. Имеем: $\mathcal{E}_i, i=1,2,\dots,n$. Проектируемый объект имеет ряд составных частей, параметры P_j которых могут проектантом варьироваться при поиске рациональных решений в процессе исследовательского проектирования. Имеем: $P_j, j=1,2,\dots,m$.

На основе опыта, результатов предварительных исследований, оценочных расчётов и исследовательского проектирования устанавливаются предполагаемые диапазоны изменения показателей эффективности. Имеем: $\mathcal{E}_{ин} \leq \mathcal{E}_i \leq \mathcal{E}_{ив}, i=1,2,\dots,n$; где $\mathcal{E}_{ин}, \mathcal{E}_{ив}$ – нижние и верхние значения показателей эффективности.

Кроме того, на базе упомянутых соображений устанавливаются предварительные диапазоны варьирования параметров P_j : $P_{jn} \leq P_j \leq P_{jв}, j=1,2,\dots,m$, где $P_{jn}, P_{jв}$ – нижние и верхние значения параметров.

Одновременно принимаем, что на основе приведенных тех же соображе-

ний построена математическая модель изделия и найдены математические соотношения, которые функционально связывают показатели эффективности \mathcal{E}_i с варьируемыми параметрами P_j составных частей изделия. Имеем: $\mathcal{E}_i = F(P_1, P_2, \dots, P_m)$, $i=1,2,\dots,n$.

При этом надо отдавать отчёт в том, что упомянутые функциональные зависимости являются, как правило, приближёнными, более того, они могут быть нечёткими и выражаться в качественном виде, но при вычислениях известными приёмами в конечном итоге экспертным путём могут сводиться к определённым численным значениям, хотя и приближённым.

Более того, эти данные зачастую приходится получать из результатов математического или натурального моделирования. Заметим, что это соображение носит общий характер, но при проектировании конкретных изделий не исключено, что упомянутые данные могут получаться в качестве предварительных значений, как правило, в качестве поисковых творческих эвристических решений. В этом нет ничего необычного, потому что это приём устоявшейся практики успешного проектирования, имеющий неизбежные объективные предпосылки, основанные на базе прогнозных эвристических решений. Упомянутые процедуры есть следствие творческого процесса при проектировании, который не поддаётся или слабо поддаётся организации и тем более чёткой технологии алгоритмизации.

Контент алгоритма синергетической оптимизации технических решений при исследовательском синтезе изделий

Вербально-формализованная постановка задачи состоит в следующем.

Первым шагом в формулировании постановки задачи является выбор (назначение) ведущего показателя \mathcal{E}_v из ряда практически значимых показателей эффективности \mathcal{E} , принимая, прежде всего, во внимание функциональное назначение изделия.

По замыслу задача состоит в том, чтобы найти максимально-сбалансированное значение ведущего показателя \mathcal{E}_v эффективности путём варьирования параметров-переменных P_j при условии, что другие показатели \mathcal{E}_i будут находиться в предварительно данных проектантом диапазонах.

Учитывая изложенное, задача формулируется в следующем виде: требуется найти значения параметров-переменных P_j , $j=1,2,\dots,m$, при которых достигается максимальное значение $\mathcal{E}_{v\max}$ при выполнении условия: $\mathcal{E}_{in} \geq \mathcal{E}_i \geq \mathcal{E}_{iv}$, $i=1,2,\dots,n$; при этом значения P_j должны также находиться в заблаговременно установленном проектантом диапазонах: $P_{jn} \leq P_j \leq P_{jv}$, $j=1,2,\dots,m$.

Как показывает анализ опыта решения практически важных проектных задач, поиск решения не удаётся свести к аналитическим процедурам по определению, в частности, даже потому, что не всегда функциональные зависимости $\mathcal{E}_i = F(P_1, P_2, \dots, P_m)$, $i=1,2,\dots,n$ представляется возможным установить в явном виде, что вынуждает прибегать, например, к эвристическим экспертным оценкам.

В основу решения задачи положен подход, основанный на экспертно-статистической технологии поиска сбалансированных значений параметров изделия при обеспечении наибольшего значения ведущего показателя \mathcal{E}_v эффективности при условии, что значения других показателей \mathcal{E}_i эффективности и зна-

чения параметров-переменных P_j будут находиться в заданных диапазонах значений [2-4].

Статистический поиск максимального значения \mathcal{E}_v осуществляется путём случайного или детерминированного варьирования параметров по следующему правилу:

текущие значения $P_j = P_{jn} + \Delta 0, \alpha_c (P_{iv} - P_{in})$,

где $\Delta 0, \alpha_c \leq 1$, $\Delta 0, \alpha_c = k \cdot \alpha_c$, $\Delta \alpha_c$ – шаг варьирования параметра, $k=1, 2, \dots, R$, при этом число R может достигать с учётом возможностей вычислительной техники внушительных величин (например, 10^3 - 10^5).

В начале решения задачи задаются предварительно приближённые номинальные значения $P_{jном}$, $j=2, 3, \dots, m$, а значение P_1 задаётся в соответствии с приведенной выше формулой.

В соответствии с предлагаемой технологией поиск сбалансированных значений параметров P_{ic} должен осуществляться циклически путём пошагового перебора всех вариантов, при этом поиск каждого цикла заканчивается только P_{ic} , которому соответствует промежуточный $\max \mathcal{E}_v$.

После завершения первого круга ($q=1$) выбора параметров, когда $j=m$, будет получено m синергетически-сбалансированных значений P_{icb} , $i=1, 2, \dots, m$

По мере наращивания числа кругов, то есть когда $q=2, 3, \dots$, будут наращиваться и значения ведущего показателя \mathcal{E}_v эффективности.

Отметим, что в процессе поиска оптимальных значений параметров в базу данных заносятся только те их сочетания, при которых удовлетворяются все условия по ограничениям.

В качестве сбалансированно-синергетических значений параметров P_{icb}^0 принимаются те их значения, когда $q=G$, при этом приращения ведущего показателя за каждый круг начинают удовлетворять условию:

$$\mathcal{E}_v = |\mathcal{E}_{vq} - \mathcal{E}_{vq-1}| \leq \delta,$$

где $\delta > 0$ – наперёд заданная малая величина, устанавливаемая проектантом.

Итак, при изначальном подходе поиск наибольшего значения ведущего показателя эффективности осуществляется путём последовательного варьирования параметров.

Однако, возможен и другой вариант реализации технологии оптимизации, когда с помощью датчика случайных и детерминированных чисел одновременно задаётся вариант значений параметров. В данном случае количество таких вариантов должно быть по определению достаточно большим и повышаться их число до тех пор, пока приращение ведущего показателя эффективности не будет превосходить упомянутую выше численную величину δ . Надо отметить, что аналитически доказать эквивалентность упомянутых двух подходов не представляется возможным. Более результативный из них можно установить, как видится, только в результате вычислительного эксперимента, но, тем не менее, экспертно-интуитивно эквивалентность их просматривается без особых доказательств при достаточно большом числе кругов оптимизации.

Метод предусматривает также, что в качестве ведущих показателей оп-

тимизируются поочередно и сопутствующие показатели эффективности. По замыслу этот вычислительный приём должен повышать согласованность показателей и уменьшать степень их противоречивости.

Таким образом, при реализации процесса синергетической оптимизации достигается такая ситуация, когда в результате учёта ограничений противоречивость отдельных показателей будет сглаживаться, при этом общий эффект от согласованных численно-экспертных операций будет превосходить простую сумму эффектов, получаемых при независимой оптимизации по отдельным показателям эффективности. Заметим, что это утверждение можно установить и проверить только экспериментальным путём при достаточно большом числе G кругов оптимизации.

На рисунке 1 приведена обобщённая блок-схема реализации тактики поиска синергетически-сбалансированного значения ведущего показателя эффективности, а также определения синергетически-сбалансированных значений параметров P^o_{ic6} . Значения этих параметров являются определяющими исходными данными при формировании проектантом окончательных конструкторских решений проектируемых изделий.

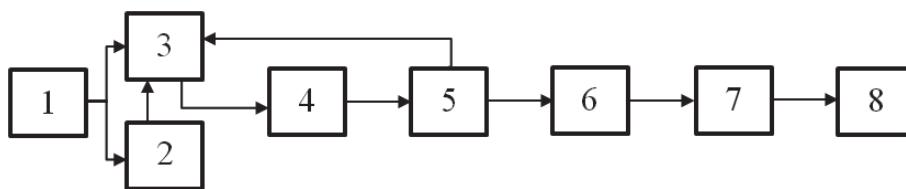


Рисунок 1 – Обобщённая блок-схема программной реализации технологии синергетической оптимизации научно-технических решений при исследовательском проектировании изделий:

- 1 – блок управления, формирование постановок задач и подготовка исходных данных,
- 2 – датчик случайных или детерминированных чисел,
- 3 – формирование вариантов параметров,
- 4 – определение показателей эффективности и проверка условий ограничений,
- 5 – контроль числа просматриваемых вариантов,
- 6 – определение варианта, соответствующего $\max \max \mathcal{E}_b$,
- 7 – определение синергетически оптимальных сбалансированных значений параметров P^o_{ic6}
- 8 – подготовка рекомендаций по использованию полученных параметров P^o_{ic6} при формировании предпочтительных конструкторских решений на этапе исследовательского проектирования изделия.

Заключение

Предлагаемый комплекс численно-экспертных процедур метода выбора параметров проектируемых изделий позволяет решать большой класс задач по определению синергетически-оптимальных и сбалансированных их значений, что является для проектантов важным методическим инструментом на этапе поискового исследовательского проектирования изделий.

Следует отметить, что метод предполагает, естественно, наличие предва-

нительно разработанных достаточно адекватных математических моделей исходных вариантов научно-технических решений с целью обоснованного формирования в последующем предпочтительных технических обликов проектируемых изделий.

Оптимальные значения параметров не только обеспечивают максимально возможные значения ведущего показателя эффективности, но и учитывают накладываемые проектантом ограничения на параметры и сопутствующие показатели эффективности. В итоге реализации предлагаемых процедур оптимизации вырабатываются проектантом данные, необходимые для формирования синергетически-сбалансированных конструкторских решений при поисковом проектировании изделий. Заметим, наконец, что применение предложенного способа при проектировании конкретного изделия по определению требует, естественно, творческого подхода, потому что в силу специфики способа он имеет некоторые особенности концептуального характера.

Литература

1. Де Грат М. Оптимальные статистические решения. М. «Наука», 1974.
2. Жиглянский А.А., Жиглянская А.Г. Методы поиска глобального экстремума. М., «Наука», 1991.
3. Уайлд Д.Дж. Методы поиска экстремумов. М., «Наука», 1967.
4. Штонер Р. Многокритериальная оптимизация. Теория, вычисления и применение. М., «Радио и связь», 1981.

УДК 629.7

Статистический контроль надежности систем ракетно-космической техники с последовательной структурой на этапе наземной отработки

В.Б. Рудаков, советник директора, доктор технических наук, профессор,
Научно-исследовательский институт космических систем имени А.А. Максимова
– филиал АО «ГКНПЦ им. М.В. Хруничева» в городе Королев
(НИИ КС им. А.А. Максимова), г. Королев, Московская область

Рассматривается статистический контроль надежности сложных систем ракетно-космической техники (РКТ), состоящих из независимых последовательно соединенных компонент. При этом для компонент и системы в целом проводится контроль совокупностей заданных значений их технических параметров, предшествующий контролю заданного значения показателя надежности системы в целом. Впервые получены математические зависимости для определения достоверности контроля надежности систем с последовательной структурой, которые учитывают результаты предшествующего структурно-иерархического контроля их технических параметров. Практическое использование этих зависимостей приводит к повышению достоверности контроля заданных требований к надежности систем с последовательной структурой, снижению рисков принятия ошибочных решений и сокращению экономических затрат на наземную отработку.

Иерархия, надежность, оптимизация, параметры, планирование, потери, риски 1 и 2 рода, статистический контроль, требования, целевая функция, экономические затраты, изделие РКТ.

Statistical Control of the Reliability of Rocket and Space Technology Systems with a Consistent Structure at the Stage of Ground Testing

V.B. Rudakov, Advisor of the Director, PhD, Professor,
Scientific Research Institute of Space Systems Named After A.A. Maksimov – the
Branch of Khrunichev State Research and Production Space Center in the City of
Korolev (Maksimov SRC of SS), Korolev, Moscow region

In the article it is considered the statistical control of reliability of complex systems of rocket and space technology (RST) consisting of independent sequentially connected components. At the same time, it is carried out the control of the sets of set values of the technical parameters for the components and the system as a whole preceding the control of the set value of the reliability indicator of the system. For the first time, mathematical dependences were obtained to determine the reliability of reliability control of systems with a sequential structure, which take into account the results of the previous structural and hierarchical control of their technical parameters. The practical use of these dependencies leads to an increase in the reliability of the control

of the specified requirements for the reliability of systems with a consistent structure, reducing the risks of making erroneous decisions and reducing the economic costs of ground testing.

Hierarchy, reliability, optimization, parameters, planning, losses, risks of the 1st and 2nd kind, statistical control, requirements, objective function, economic costs, RST product.

В настоящее время актуальным является направление совершенствования методологии обеспечения и подтверждения требуемого уровня надежности изделий РКТ на этапе их наземной экспериментальной отработки. Реализация этого этапа традиционно требует вложения больших финансовых средств. Поэтому совершенствование методологии должно заключаться в том, что при проведении испытаний и контроля надежности этих изделий с одной стороны необходимо подтвердить заданные в технической документации характеристики надежности, а с другой стороны необходимо постоянно учитывать финансовые средства, которые можно израсходовать на их подтверждение.

Использование традиционных методов статистического контроля не позволяет учесть иерархию изделий РКТ при отработке, последствия принятия ошибочных решений на каждом иерархическом уровне, которые являются следствием возникающих рисков, и накопленный опыт отработки изделий-аналогов. Кроме того, традиционные методы ориентированы на значительные объемы статистических данных, которые в практике отработки РКТ, как правило, отсутствуют.

Одним из главных признаков системы РКТ, как и любой сложной технической системы, отражающим ее целостность, является наличие у нее определенной иерархической структуры. Этот признак полностью определяет характер организации ее наземной отработки и испытаний. Отработку систем [1,2] проводят строго поэтапно и последовательно, испытывая изделия по мере возрастания иерархических уровней. После успешных отработочных испытаний и контроля элементов низших иерархических уровней переходят к автономным испытаниям и контролю компонент, входящих в систему, а после них проводят комплексные испытания и контроль системы в целом, как более высокого иерархического уровня. При этом на каждом уровне контролируется работоспособность, дается оценка и проводится контроль технических характеристик и параметров элементов, компонент и системы в целом и принимаются меры по доведению их значений до уровня требований. Такая последовательность проведения контроля свидетельствует о том, что на каждом иерархическом уровне контроль заданных значений технических параметров компонент, определяющих их работоспособность, предшествует испытаниям и контролю заданных значений показателей надежности системы в целом. Вместе с тем, очевидно, что результаты контроля параметров компонент несут информацию не только о состоянии каждого параметра и их совокупности, определяющей работоспособное состояние, но и какую-то долю информации о надежности системы в целом. И эту информацию

необходимо учитывать для повышения достоверности контроля надежности изделия, которая представляет собой вероятность принятия правильных решений о соответствии показателя надежности заданным требованиям. Таким образом, задача, которая рассматривается в данной работе, состоит в том, чтобы ответить на важный вопрос: каким образом при контроле надежности систем РКТ можно учесть результаты предшествующего контроля технических параметров ее компонент и системы в целом для повышения достоверности контроля заданных требований к надежности изделия?

Поскольку решение этого вопроса связано с результатами, которые были получены ранее, последовательно приведем эти результаты.

Заметим, что частным случаем иерархической структуры сложной системы является структурная схема ее надежности. А так как объектом рассмотрения является сложная техническая система РКТ, состоящая из независимых последовательно соединенных компонент, в дальнейшем наряду с термином «система РКТ» будем употреблять термин «изделие РКТ ($l+1$)-го уровня иерархии», как продукт производства, а наряду с термином «компонента» – «изделие l -го уровня иерархии».

В работах [1,2] были предложены методы оптимального планирования статистического контроля надежности изделий РКТ, основанные на минимизации целевой функции затрат на контроль и потерь, связанных с рисками принятия ошибочных решений. Эта целевая функция вытекают из самой вероятностно-статистической структуры контроля и имеет, в общем случае, следующий вид:

$$C_{\Sigma} = C_{1\alpha}\alpha + C_{1\beta}\beta + C_{1K}n, \quad (1)$$

где $C_{1\alpha}\alpha$ – математическое ожидание потерь за счет браковки *годного* изделия, т.е. удовлетворяющего заданным требованиям по надежности, где α – риск 1 рода;

$C_{1\beta}\beta$ – математическое ожидание потерь за счет приёмки *дефектного* изделия, т.е. не удовлетворяющего заданным требованиям по надежности, где β – риск 2 рода;

$C_{1\alpha}$, $C_{1\beta}$, C_{1K} – средние потери и затраты на контроль одного изделия;
 n – объем контроля (количество изделий, подвергаемых контролю либо количество циклов контроля, связанное с постоянной длительностью контроля и т.д.), подлежащий определению.

Для биномиального плана контроля *априорные* риски 1 и 2 рода α и β , входящие в (1), представляют собой *безусловные* вероятности забраковать *годное* (удовлетворяющее требованиям по надежности) или принять *дефектное* изделие (не удовлетворяющее требованиям), соответственно. Они определяются следующим образом:

$$\alpha = \int_{P_{TP}}^1 (1 - P^n) f(P) dP = \frac{\Gamma(a+b)}{\Gamma(a)\Gamma(b)} \int_{P_{TP}}^1 (1 - P^n) P^{b-1} (1 - P)^{a-1} dP, \quad (2)$$

$$\beta = \int_0^{P_{TP}} P^n f(P) dP = \frac{\Gamma(a+b)}{\Gamma(a)\Gamma(b)} \int_0^{P_{TP}} P^{n+b-1} (1 - P)^{a-1} dP, \quad (3)$$

где $\Gamma(\cdot)$ – полная гамма-функция или интеграл Эйлера второго рода [1,2];
 P_{TP} – заданное значение вероятности безотказной работы изделия;
 P – показатель надежности изделия, трактуется как случайная величина
(в байесовском смысле), имеющая плотность бета-распределения

$$f(P) = \frac{1}{B(b, a)} P^{b-1} (1-P)^{a-1} = \frac{\Gamma(a+b)}{\Gamma(a)\Gamma(b)} P^{b-1} (1-P)^{a-1}, \dots\dots\dots (4)$$

$$B(b, a) = \frac{\Gamma(a)\Gamma(b)}{\Gamma(a+b)} \text{ – полная бета-функция.}$$

Параметры a и b априорного бета-распределения определяются известными методами по накопленной предварительной статистической информации о надежности изделий каждого уровня с учетом ее неоднородности по известным моделям [1,2].

В работах [1,2] показано, что риски 1 и 2 рода (2) и (3) в зависимости от величины объема контроля n изменяются в противоположных направлениях. Поэтому целевая функция (1), в зависимости от величин в нее входящих, может быть возрастающей, убывающей и иметь минимум, которому соответствует оптимальный статистический план контроля (n^* , α^* , β^* , $c=0$). Здесь c – приемочное число плана контроля (контрольный норматив), которое для высоконадежных изделий РКТ равно нулю.

Если функция является возрастающей, то контроль надежности проводить нецелесообразно, поскольку это приведет к увеличению экономических затрат и потерь, связанных с рисками принятия ошибочных решений. Если функция является убывающей, то необходим стопроцентный контроль всех изделий партии (если рассматривается партия изделий) или количество циклов контроля изделия (если рассматривается автоматизированный контроль). И, наконец, если функция имеет минимум, то контроль следует проводить по оптимальному плану (n^* , α^* , β^* , $c=0$). То есть, сама целевая функция является как бы индикатором необходимости проведения испытаний и контроля.

Формализованная постановка задачи оптимального планирования контроля надежности [1,2] записывается следующим образом: найти такое значение объема контроля $n > 0$ и соответствующие ему значения рисков α и β , которые доставляют минимум целевой функции (1), то есть:

найти

$$\min_{n, \alpha, \beta} C_{\Sigma} = \min_{n, \alpha, \beta} \left[C_{1\alpha} \alpha + C_{1\beta} \beta + C_{1k} n \right], \tag{5}$$

где

$$\alpha = \int_{P_{TP}}^1 (1 - P^n) f(P) dP, \tag{6}$$

$$\beta = \int_0^{P_{TP}} P^n f(P) dP, \tag{7}$$

в области

$$\alpha \geq 0, \beta > 0, 0 < n \leq N, \quad (8)$$

где $f(P)$ – определяется выражением (4).

Минимизация такой целевой функции при контроле любого изделия РКТ [1,2] по переменной n , которая принимает целочисленные значения ($n=1,2,\dots, N$), позволяет найти оптимальные статистические планы контроля надежности изделия ($n^*, \alpha^*, \beta^*, c=0$), включающие в себя оптимальное значение объема контроля и оптимальные значения рисков 1 и 2 рода α^* и β^* , которые учитывают накопленную априорную информацию с учетом ее статистической неоднородности. Здесь следует особо заметить, что по определению [1,2] *статистический план контроля* ($n, \alpha, \beta, c=0$) – это совокупность данных о виде контроля, объеме контролируемой выборки, контрольных нормативах и решающих правилах. Статистический план контроля (план контроля) учитывает вероятностную природу контроля, поскольку содержит риски 1 и 2 рода α и β , связанные с принятием ошибочных решений. В свою очередь эти риски являются характеристиками *достоверности контроля* D , которая представляет собой *вероятность принятия правильных решений о выполнении заданных требований по результатам контроля* и является важнейшей характеристикой, то есть:

$$D = 1 - (\alpha + \beta). \quad (9)$$

Приведенная постановка задачи (5)...(8) входит в состав метода оптимального планирования контроля надежности. В дальнейшем этот метод был развит в более сложные методы: метод иерархического контроля надежности, метод иерархического контроля технических параметров изделий РКТ [1,2].

Перейдем теперь к непосредственному решению поставленного в данной статье вопроса, а именно: каким образом при построении статистических планов контроля надежности сложной системы РКТ можно учесть результаты предшествующего контроля технических параметров, определяющих работоспособность компонент, входящих в систему, и системы в целом?

Предположим, что система РКТ $(l+1)$ -го уровня состоит из k независимых последовательно соединенных изделий l -го уровня. Предположим далее, что показатель работоспособности системы $(l+1)$ -го уровня полностью определяется совокупностью N_{Π} независимых между собой технических параметров $\{x_j\}$, $j = \overline{1, N_{\Pi}}$, а показатель работоспособности i -го изделия l -го уровня – совокупностью $\{x_{ri}\}$ параметров, $i = \overline{1, N_{\Pi r}}$; $r = \overline{1, k}$.

На каждый параметр в документации задан допуск односторонний или двухсторонний.

Условимся под *годным* понимать технический параметр изделия, находящийся в пределах заданного допуска, под *дефектным* – параметр, вышедший за пределы допуска. *Годным* будем считать изделие, у которого годны (находятся в пределах допусков) все параметры, и соответственно *дефектным* – изделие, у которого дефектен хотя бы один параметр.

При принятых определениях и допущениях общая схема контроля технических параметров двухуровневой иерархической структуры (изделий РКТ l -го

уровня и системы РКТ ($l+1$ -го уровня) заключается в следующем.

В каждом r -ом изделии l -го уровня проводится контроль совокупности $N_{пр}$ параметров, определенных документацией на изготовление. После проведения контроля соответствующих параметров k независимых изделий l -го уровня эти изделия по результатам контроля принимаются и, далее, из них изготавливается система ($l+1$ -го уровня).

После изготовления системы ($l+1$ -го уровня) проводится контроль ее технических параметров, т.е. проводится контроль совокупности $N_{п}$ параметров этой системы, определенных документацией на ее изготовление.

Такая схема контроля соответствует системе РКТ с последовательной структурой, представленной на рисунке 1, которая является частным случаем иерархической структуры [1,2].

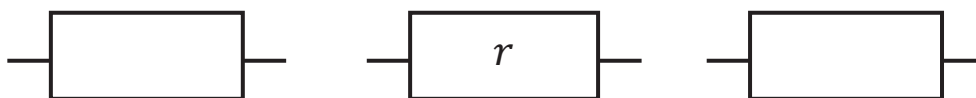


Рисунок 1 – Система РКТ ($l+1$ -го уровня) с последовательной структурой

Все изложенное определяет специфику иерархического контроля параметров систем РКТ и, по аналогии с [1,2], дает возможность сформулировать ряд исходных положений:

1. Совокупность всех параметров конкретных изделий рассматриваемых уровней и допуски на них определены и закреплены в соответствующей документации.

2. Поскольку контроль не является абсолютно достоверным, при контроле каждого параметра средствами технического контроля возникают ошибки 1 и 2 рода [3-5], в результате которых годный параметр можно принять за дефектный, а дефектный – за годный. Вероятности этих ошибок характеризуются метрологическими рисками 1 рода α_{nj} и 2 рода β_{nj} , относящимися к каждому i -му или j -му параметру для изделий РКТ соответствующих уровней, например,

$$\alpha_{nj} = P(A_j)P(\bar{B}_j / A_j) = P(A_j) \alpha_{yj}; \quad \beta_{nj} = P(\bar{A}_j)P(B_j / \bar{A}_j) = P(\bar{A}_j) \beta_{yj},$$

которые определяются методами метрологии [6].

3. При контроле совокупностей $N_{пр}$ и $N_{п}$ параметров каждого изделия рассматриваемых уровней возникают ошибки 1 и 2 рода, которые уже относятся к изделию в целом (l -го и $(l+1)$ -го уровня) и характеризуются соответствующими вероятностями или рисками 1 и 2 рода. Эти риски, очевидно, зависят от общего количества параметров изделий $N_{пр}$ и $N_{п}$, и от рисков 1 и 2 рода (например, α_{nj} , β_{nj}), возникающих при контроле каждого параметра. То есть, для каждого изделия РКТ l -го и $(l+1)$ -го уровня можно записать следующие функционалы:

для r -ого изделия РКТ l -го уровня:

$$\alpha_{Pr} = \alpha_{Pr}(N_{пр}, \alpha_{ni}, \beta_{ni}); \tag{10}$$

$$\beta_{Pr} = \beta_{Pr}(N_{пр}, \alpha_{ni}, \beta_{ni}), \quad r = \overline{1, k}; i = \overline{1, N_{Pr}}; \tag{11}$$

для системы РКТ ($l+1$) -го уровня:

$$\alpha_{Пс} = \alpha_{Пс}\{N_{п}, \alpha_{Пс}(\alpha_{nj}, \beta_{nj}), \beta_{Пс}(\alpha_{nj}, \beta_{nj}); \alpha_{Pr}(N_{пр}, \alpha_{ni}, \beta_{ni}), \beta_{Pr}(N_{пр}, \alpha_{ni}, \beta_{ni})\}, \tag{12}$$

$$\beta_{Пс} = \beta_{Пс} \{N_{П}, \alpha_{Пс}(\alpha_{nj}, \beta_{Пj}), \beta_{Пс}(\alpha_{nj}, \beta_{Пj}); \alpha_{Пг}(N_{Пг}, \alpha_{Пг}, \beta_{Пг}), \beta_{Пг}(N_{Пг}, \alpha_{Пг}, \beta_{Пг})\},$$

$$j = \overline{1, N_{П}}, r = \overline{1, k}; i = \overline{1, N_{Пг}}. \quad (13)$$

где индекс «Пг» означает «параметры г-го изделия l-го уровня иерархии», а индекс «Пс» означает «параметры системы (l+1)-го уровня иерархии».

Наблюдается следующая взаимосвязанная иерархия рисков 1 и 2 рода: риски при контроле каждого параметра изделий РКТ l-го и (l+1)-го уровней и риски при контроле изделий в целом l-го и (l+1)-го уровней.

Поскольку контроль изделий низшего уровня иерархии предшествует контролю изделия более высокого (l+1)-го уровня, то результаты контроля изделий l-го уровня несут информацию не только о состоянии технических параметров данного l-го уровня, но и определенную долю информации о состоянии изделия РКТ более высокого (l+1)-го уровня. Поэтому результаты контроля изделий низшего уровня необходимо учитывать при планировании контроля изделий более высокого уровня. Таким образом, риски, возникающие при контроле изделий различных уровней должны быть взаимосвязаны. Чтобы определить эти взаимосвязи, проведем следующие рассуждения.

Рассмотрим *апостериорный* случай.

Предположим, что проведен контроль всех изделий РКТ l-го уровня иерархии. При этом какие-то изделия возвращались поставщикам на регулировку, повторный контроль, доработку, замену дефектных изделий и т.д. Но, в конечном итоге, для изготовления системы РКТ более высокого (l+1)-го уровня имеется k принятых ($r = \overline{1, k}$) изделий l-го уровня, из которых комплектуется система более высокого (l+1)-го уровня.

Поскольку для изделий l-го уровня проводился контроль их технических параметров и изделия приняты, то они будут приняты с определенными рисками.

При этом как показано в работах [1,2], риски 1 рода $\alpha_{Пг}$, $r = \overline{1, k}$, будут равны нулю, $\alpha_{Пг}=0$, а *апостериорные* риски 2 рода $\beta_{Пг}^A$, будут совпадать с вероятностями того, что принятые изделия являются дефектными

$\beta_{Пг}^A = P(\overline{A}_{r}), r = \overline{1, k}$. То есть, наличие $\beta_{Пг}^A = P(\overline{A}_{r})$ для всех изделий РКТ l-го уровня свидетельствует о том, что контроль не является абсолютно достоверным.

Учитывая этот результат, *априорные* риски 1 и 2 рода $\alpha_{Пс}$ и $\beta_{Пс}$ для планирования контроля системы (l+1)-го уровня оказываются связанными с *апостериорными* рисками $\beta_{Пг}^A$, с которыми *приняты* изделия РКТ l-го уровня иерархии. Поэтому при планировании контроля совокупности технических параметров системы высшего, т.е. (l+1)-го уровня, имеем следующие функционалы:

для системы (l+1)-го уровня:

$$\alpha_{Пс} = \alpha_{Пс} \{N_{П}, \alpha_{Пс}(\alpha_{nj}, \beta_{Пj}), \beta_{Пс}(\alpha_{nj}, \beta_{Пj}); \beta_{Пг}^A(N_{Пг}, \alpha_{Пг}, \beta_{Пг})\}, \quad (14)$$

$$\beta_{Пс} = \beta_{Пс} \{N_{П}, \alpha_{Пс}(\alpha_{nj}, \beta_{Пj}), \beta_{Пс}(\alpha_{nj}, \beta_{Пj}); \beta_{Пг}^A(N_{Пг}, \alpha_{Пг}, \beta_{Пг})\}, \quad (15)$$

то есть *априорные* риски $\alpha_{Пс}$ и $\beta_{Пс}$, возникающие при контроле параметров системы (l+1)-го уровня, уже являются функциями *только апостериорных рисков* $\beta_{Пг}^A$, с которыми приняты изделия РКТ l-го уровня иерархии, а также рис-

ков, возникающих при контроле ее технических параметров.

В выражениях (14), (15) по-прежнему:

N_{Π} , $N_{\Pi r}$ – общая совокупность технических параметров системы РКТ $(l+1)$ -го уровня и r -го изделия l -го уровня, соответственно;

$\beta_{\Pi r}^A$ – апостериорный риск 2 рода, с которым принято r -ое изделие РКТ l -го уровня, $r = \overline{1, k}$;

α_{nj} , β_{nj} , α_{ni} , β_{ni} – метрологические риски 1 и 2 рода, возникающие при контроле совокупностей технических параметров системы РКТ $(l+1)$ -го уровня и изделия l -го уровня, связанные с погрешностями технических средств их контроля, $j = \overline{1, N_{\Pi}}$, $i = \overline{1, N_{\Pi r}}$. Эти риски определяются методами метрологии [6].

Апостериорный риск 2 рода $\beta_{\Pi r}^A$, с которым принято r -ое изделие РКТ l -го уровня иерархии, $r = \overline{1, k}$; в соответствии с [1,2] определяется на основе выражения

$$\beta_{\Pi r}^A = \prod_{i=1}^{N_{\Pi r}} \left[P(A_i) (1 - \alpha_{yi}) + \beta_{ni} \right] - \prod_{i=1}^{N_{\Pi r}} P(A_i) \prod_{i=1}^{N_{\Pi r}} (1 - \alpha_{yi}), \dots, r = \overline{1, k} \dots \dots \dots (16)$$

с учетом результатов контроля технических параметров r -го изделия l -го иерархического уровня.

Проведенный анализ позволяет непосредственно перейти к разработке математических зависимостей для определения рисков принятия ошибочных решений по результатам иерархического контроля систем РКТ. Получим эти зависимости в условиях рассматриваемой задачи.

Пусть по-прежнему проводится контроль параметров каждого изделия l -го уровня, т.е. в каждом изделии контролируется $N_{\Pi r}$ параметров, $r = \overline{1, k}$. При этом, как отмечалось, некоторые изделия возвращаются поставщику на регулировку, повторный контроль, доработку и т.д. Но в конечном итоге для изготовления системы $(l+1)$ -го уровня имеются k принятых изделий нижнего уровня, из которых комплектуется система высшего уровня.

Поскольку для изделий проводился контроль параметров и изделия *приняты* (риски $\alpha_r = 0$), то они будут приняты с определенными *апостериорными*

рисками 2 рода $\beta_{\Pi r}^A$. Возникает вопрос: каким образом *априорные* риски $\alpha_{\Pi c}$ и $\beta_{\Pi c}$ для системы РКТ $(l+1)$ -го уровня связаны с рисками $\beta_{\Pi r}^A$, с которыми приняты изделия РКТ l -го уровня? Для решения этого вопроса введем в рассмотрение следующие случайные события:

A – система $(l+1)$ -го уровня является годной. Это событие является сложным и состоит из двух событий:

$$A = A_1 A_2,$$

где A_1 – событие, состоящее в том, что все изделия l -го уровня, входящие в систему, являются годными;

A_2 – событие, состоящее в том, что все параметры системы $(l+1)$ -го уровня являются годными (находятся в пределах заданных допусков).

При этом, поскольку событие A_1 предшествует событию A_2 их можно считать независимыми событиями.

Далее:

$\overline{A} = \overline{A_1} \overline{A_2}$ – сложное событие, противоположное событию A ;

V – событие, состоящее в том, что система $(l+1)$ -го уровня по результатам контроля будет принята;

\overline{V} – противоположное событие (система будет забракована);

A_r – событие, состоящее в том, что r -ое изделие l -го уровня является годным;

$\overline{A_r}$ – противоположное событие;

V_r – событие, состоящее в том, что r -ое изделие l -го уровня по результатам контроля будет принято;

$\overline{V_r}$ – противоположное событие (изделие l -го уровня по результатам контроля будет забраковано).

Среди введенных событий по условию задачи событие V_r является достоверным, поскольку все k изделий l -го уровня уже приняты для изготовления системы $(l+1)$ -го уровня. Поэтому вероятность этого события $P(V_r) = 1$, а событие $\overline{V_r}$ является невозможным событием, поэтому $P(\overline{V_r}) = 0$.

Обратимся вновь к системе $(l+1)$ -го уровня, которая состоит из k независимых изделий l -го уровня. Учитывая определения годных и дефектных изделий и системы, справедливо следующее утверждение:

система $(l+1)$ -го уровня является *годной*, если годны все k изделий l -го уровня, и после изготовления системы все ее технические параметры находятся в пределах заданных допусков. И, наоборот, система $(l+1)$ -го уровня является *дефектной*, если дефектно, хотя бы одно изделие l -го уровня, и после изготовления системы, хотя бы один ее технический параметр вышел за пределы установленного допуска. По этой причине для события A имеем [7]:

$$A = A_2 \bigcap_{r=1}^k A_r \dots \quad (17)$$

Определим риск 1 рода для системы $(l+1)$ -го уровня. По определению

$$\alpha_{\text{ПС}} = P(A \overline{V}) = P(A)P(\overline{V} / A).$$

Запишем соответственно риски 1 и 2 рода для r -го изделия l -го уровня:

$$\alpha_{\text{Пр}} = P(A_r)P(\overline{V_r} / A_r), \quad \beta_{\text{Пр}} = P(\overline{A_r})P(V_r / \overline{A_r})$$

Но так как r -ое изделие l -го уровня принято, то имеем:

$$P(\overline{V_r} / A_r) = 0 \text{ и } P(V_r / \overline{A_r}) = 1, \text{ то есть } \alpha_{\text{Пр}}^A = 0 \text{ и } \beta_{\text{Пр}}^A = P(\overline{A_r}), \quad r = \overline{1, k}.$$

Далее, поскольку изделия l -го уровня иерархии независимы:

$$P(A) = P(A_2) \prod_{r=1}^k P(A_r) = P(A_2) \prod_{r=1}^k [1 - P(\overline{A_r})] = P(A_2) \prod_{r=1}^k (1 - \beta_{\text{Пр}}^A).$$

Подставляя это выражение в выражение для *априорного* риска 1 рода $\alpha_{\text{ПС}}$,

относящемуся к системе РКТ ($l+1$)-го уровня получим:

$$\alpha_{\text{Пс}} = P(A_2) P(\overline{B} / A_2) \prod_{r=1}^k (1 - \beta_{\text{П}r}^A). \quad (18)$$

Для *априорного* риска 2 рода справедливы аналогичные рассуждения

$$\beta_{\text{Пс}} = P(\overline{A}_2 | B) = P(\overline{A}_2) P(B / \overline{A}_2) = [1 - P(A_2)] P(B / \overline{A}_2) \\ \text{или } \beta_{\text{Пс}} = P(\overline{A}_2) P(B / \overline{A}_2) [1 - \prod_{r=1}^k (1 - \beta_{\text{П}r}^A)], \quad (19)$$

где индекс «Пс» означает «параметры системы».

Соотношения $P(A_2) P(\overline{B} / A_2)$ и $P(\overline{A}_2) P(B / \overline{A}_2)$, входящие в (18) и (19), представляют собой *априорные* риски принятия ошибочных решений, возникающие при контроле технических параметров системы ($l+1$)-го уровня иерархии. Они определяются на основе выражений, полученных в работах [1,2], с учетом того, что проводится контроль всех параметров $N_{\text{П}}$ системы ($l+1$)-го уровня. Используя эти выражения и учитывая (18) и (19), получаем:

$$\alpha_{\text{Пс}} = \prod_{j=1}^{N_{\text{П}}} P(A_j) \left[1 - \prod_{j=1}^{N_{\text{П}}} (1 - \alpha_{y_j}) \right] \prod_{r=1}^k (1 - \beta_{\text{П}r}^A), \quad (20)$$

$$\beta_{\text{Пс}} = \left\{ \prod_{j=1}^{N_{\text{П}}} [P(A_j) (1 - \alpha_{y_j}) + \beta_{\text{П}j}] - \prod_{j=1}^{N_{\text{П}}} P(A_j) \prod_{j=1}^{N_{\text{П}}} (1 - \alpha_{y_j}) \right\} \left[1 - \prod_{r=1}^k (1 - \beta_{\text{П}r}^A) \right] \dots, \quad (21)$$

где $N_{\text{П}}$ – общее количество независимых параметров системы ($l+1$)-го уровня иерархии;

$P(A_j) = 1 - P(P(\overline{A}_j))$ – вероятность того, что j -й параметр системы годный (событие A_j);

$\alpha_{y_j} = P(\overline{B}_j / A_j)$ – условная вероятность того, что по результатам контроля j -й параметр системы признан дефектным (событие \overline{B}_j), хотя на самом деле он является годным (событие A_j);

$\beta_{y_j} = P(B_j / \overline{A}_j)$ – условная вероятность того, что по результатам контроля j -й параметр системы признан годным (событие B_j), хотя на самом деле он является дефектным (событие \overline{A}_j).

$\beta_{\text{П}j} = P(\overline{A}_j) P(B_j / \overline{A}_j) = P(\overline{A}_j) \beta_{y_j}$ – безусловная вероятность того, что j -й параметр системы является дефектным и будет признан годным.

Эти метрологические риски, возникающие при контроле каждого параметра системы ($l+1$)-го уровня иерархии, определяются методами метрологии [6].

Таким образом, разработаны математические зависимости (20) и (21) для определения *априорных* рисков, связанных с принятием ошибочных решений по результатам иерархического контроля технических параметров системы РКТ ($l+1$)-го уровня с последовательной структурой, с учетом результатов предшест-

вующего контроля параметров входящих в нее изделий l -го уровня.

В итоге, учитывая (21), и то, что система по результатам контроля ее технических параметров принимается для дальнейшего контроля заданных требований к ее надежности с определенным *апостериорным* риском 2 рода, этот риск определяется на основе следующей формулы:

с учетом результатов контроля технических параметров системы.

$$\beta_{ПС}^A = \left\{ \prod_{j=1}^{N_{П}} [P(A_j)(1 - \alpha_{yj}) + \beta_{Пj}] - \prod_{j=1}^{N_{П}} P(A_j) \prod_{j=1}^{N_{П}} (1 - \alpha_{yj}) \right\} \left[1 - \prod_{r=1}^k (1 - \beta_{Пr}^A) \right], \dots (22)$$

Таким образом, по результатам параметрического контроля системы РКТ могут реализоваться только два события: либо событие A – принятая система является годной с вероятностью $(1 - \beta_{ПС}^A)$, либо событие \bar{A} – принятая система является дефектной с вероятностью $\beta_{ПС}^A$.

Заметим, что выражения $\prod_{r=1}^k (1 - \beta_{Пr}^A)$ и $\left[1 - \prod_{r=1}^k (1 - \beta_{Пr}^A) \right]$, входящие в (20)-(22) меньше единицы, откуда следует важный вывод – проведение предшествующего контроля *технических параметров* изделий l -го уровня уменьшает риски принятия ошибочных решений при контроле технических параметров системы $(l+1)$ -го уровня.

Перейдем теперь к следующему этапу контроля системы – контролю ее надежности.

При планировании контроля надежности системы будем считать *годной* систему, удовлетворяющую заданным требованиям по надежности, и *дефектной* – не удовлетворяющую заданным требованиям. Учитывая эти определения, введем в рассмотрение следующие события.

A – система с точки зрения контроля ее технических параметров и надежности является годной; \bar{A} – противоположное событие.

B – система по результатам контроля ее надежности будет принята; \bar{B} – противоположное событие.

По определению риски 1 и 2 рода связаны с вероятностями наступления следующих событий:

$$\alpha = P(A \bar{B}), \tag{23}$$

$$\beta = P(B \bar{A}), \tag{24}$$

Поскольку этапы контроля технических параметров компонент, системы в целом и этап контроля ее надежности в виде вероятности безотказной работы $P_{ТР}$ независимы, то вероятность того, что система РКТ является годной, будет определяться следующим произведением вероятностей

$$P(A) = (1 - \beta_{ПС}^A) P(A_n). \tag{25}$$

А вероятность того, что система является дефектной, будет равна

$$P(\bar{A}) = \beta_{\text{ПС}}^A [1 - P(A_n)], \quad (26)$$

где $P(A)$ – вероятность того, что система является годной с точки зрения предшествующего контроля ее технических параметров и заданных требований к ее надежности; вероятности $(1 - \beta_{\text{ПС}}^A)$ и $\beta_{\text{ПС}}^A$ определяют годность и дефектность системы по результатам предшествующего контроля ее технических параметров с учетом результатов контроля технических параметров ее компонент (22); а $P(A_n)$ – вероятность того, что система является годной с точки зрения ее надежности.

Тогда, учитывая определения безусловных *априорных* рисков (23),(24), приведенные выше, а также выражения (2), (3) и (25), (26), получаем математические зависимости для определения *априорных* рисков 1 и 2 рода, возникающих при контроле надежности системы:

$$\alpha = (1 - \beta_{\text{ПС}}^A) \int_{P_{\text{ТР}}}^1 (1 - P^n) f(P) dP = (1 - \beta_{\text{ПС}}^A) \frac{\Gamma(a+b)}{\Gamma(a)\Gamma(b)} \int_{P_{\text{ТР}}}^1 (1 - P^n) P^{b-1} (1 - P)^{a-1} dP, \quad (27)$$

$$\beta = \beta_{\text{ПС}}^A \int_0^{P_{\text{ТР}}} P^n f(P) dP = \beta_{\text{ПС}}^A \frac{\Gamma(a+b)}{\Gamma(a)\Gamma(b)} \int_0^{P_{\text{ТР}}} P^{n+b-1} (1 - P)^{a-1} dP, \quad (28)$$

Выражения (27) и (28) необходимы для определения достоверности контроля надежности систем РКТ с учетом результатов предшествующего параметрического контроля работоспособности составляющих ее компонент и системы в целом. В соответствии с (9), (27) и (28) выражение для определения *априорной* достоверности контроля надежности системы будет иметь следующий вид

$$D = 1 - \left\{ (1 - \beta_{\text{ПС}}^A) \frac{\Gamma(a+b)}{\Gamma(a)\Gamma(b)} \int_{P_{\text{ТР}}}^1 (1 - P^n) P^{b-1} (1 - P)^{a-1} dP + \beta_{\text{ПС}}^A \frac{\Gamma(a+b)}{\Gamma(a)\Gamma(b)} \int_0^{P_{\text{ТР}}} P^{n+b-1} (1 - P)^{a-1} dP \right\}, \quad (29)$$

где *апостериорный* риск 2 рода $\beta_{\text{ПС}}^A$ определяется формулой (22).

Если контроль надежности по результатам испытаний уже проведен и система принята для дальнейшего использования (*апостериорный случай*), то $\alpha = 0$. В этом случае выражение (29) для *апостериорной* достоверности контроля заданных требований к надежности системы РКТ принимает следующий вид

$$D^A = 1 - \beta_{\text{ПС}}^A \beta_{\text{Н}}^A = 1 - \beta_{\text{ПС}}^A \frac{\Gamma(a+b)}{\Gamma(a)\Gamma(b)} \int_0^{P_{\text{ТР}}} P^{n+b-1} (1 - P)^{a-1} dP \quad (30)$$

где индекс «н» означает надежность;

$\beta_{\text{Н}}^A$ – *апостериорный* риск 2 рода, с которым принята система после контроля ее надежности и который определяется с учетом результатов, полученных при контроле ее надежности.

Выражение (30) представляет собой *апостериорную* достоверность, то есть вероятность принятия правильных решений о выполнении заданных требований по результатам контроля надежности системы РКТ при наземной отработке с учетом результатов предшествующего контроля ее технических параметров и параметров ее компонент.

Полученные выражения (27)-(30) соответствуют любому статистическому плану контроля надежности системы ($n, \alpha, \beta, c=0$).

Если испытания системы проводятся по оптимальному плану контроля надежности ($n^*, \alpha^*, \beta^*, c=0$) в соответствии с постановкой (5)-(8), то можно определить *априорную* и *апостериорную* достоверность контроля на основе (27)-(30) следующим образом

$$D = 1 - \{(1 - \beta_{\Pi}^A) \alpha_{\Pi}^* + \beta_{\Pi}^A \beta_{\Pi}^*\}, \quad (31)$$

$$D^A = 1 - \beta_{\Pi}^A \beta_{\Pi}^{A*}. \quad (32)$$

Таким образом, разработаны математические зависимости, которые позволяют учесть результаты предшествующего структурно-иерархического контроля технических параметров систем РКТ с последовательной структурой при контроле их надежности, что приводит к повышению достоверности контроля выполнения заданных требований к надежности таких систем на этапе наземной отработки, а также к сокращению экономических затрат на наземную отработку.

Литература

1. Волков Л.И., Рудаков В.Б. Статистический контроль иерархических систем. М.: СИП РИА, 2002. 355с.
2. Меньшиков В.А., Рудаков В.Б., Сычев В.Н. Контроль качества космических аппаратов при отработке и производстве. М.: Машиностроение, 2009. 400с.
3. Земмельман М.А. и др. О связи погрешности измерений при контроле с показателями достоверности контроля параметров образцов продукции // Измерительная техника. 1986. № 10. с. 3-5.
4. Донецкая Т.В., Сиднев А.Г. Инженерный метод определения вероятностей ошибок 1 и 2 рода при допусковом контроле параметров // Метрология: Прил. к журн.: Измерительная техника. 1983. № 8. с. 3-10.
5. Фридман И.Д. Способ вычисления вероятностей ошибок допускового контроля // Прил. к журн.: Измерительная техника. 1984. № 10. с. 3-12.
6. Сычев В.И., Храменков В.Н., Шкитин А.Д. Основы метрологии военной техники. М.: Воен.издат., 1993. 393с.
7. Феллер В. Введение в теорию вероятностей и ее приложения. М.: Мир, 1984. т. 1, 2.

УДК 629.7.047.2

Численно-экспертный способ выбора параметров солнечно-синхронных орбит для полномасштабного мониторинга северных районов Российской Федерации

Г.Н. Степанов, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, базовая кафедра «Управление и информационные технологии в космических системах», Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Московской области «Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза, летчика-космонавта А.А. Леонова», г. Королев, Московская область, НИИ КС имени А.А. Максимова – филиал АО «ГКНПЦ им. М.В. Хруничева», г. Королев, Московская область

Среди многообразия различных типов орбит выделяется класс солнечно-синхронных (ССО). Традиционно они используются космическими аппаратами дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). В статье приводятся результаты оценки и анализа параметров солнечно-синхронных круговых орбит с целью обеспечения оптимальных режимов освещённости трассы КА, характеристик обзора поверхности Земли, видимости КА с наземных пунктов с учетом требований и ограничений.

Солнечно-синхронные круговые орбиты, изомаршрутность, местное время полета, освещенность трасс, обзор поверхности Земли, видимость КА с наземных пунктов.

Numerical and expert-oriented method of choosing the parameters of Sun-synchronous orbits for wide-scale monitoring Northern Russia regions

G.N. Stepanov, candidate of technical sciences, lead scientist, department «Control and information technologies in space systems», State Budgetary Educational Institution of Higher Education of the Moscow Region «Technological University named after twice Hero of the Soviet Union, pilot-cosmonaut A.A. Leonov», Korolev, Moscow region, NII KS named in honor of A.Maksimov – branch of JSC «M. Khrunichev GKNPZ», Korolev, Moscow region

Among the variety of orbits, sun synchronous orbit holds a special place. They are traditionally employed by Earth surveying spacecraft. Article covers evaluation results and parameters analysis for circular sun synchronous orbits - to ensure optimal illumination along satellite ground track, Earth surface observational conditions, satellite visibility from ground stations with related requirements and limitations.

Circular sun synchronous orbits, track repeatability, local satellite time, ground track illumination, Earth surface view, visibility of SC from ground stations.

Введение

В настоящее время для эффективного использования космических аппаратов дистанционного зондирования Земли (КА ДЗЗ) в целях полномасштабного обзора и мониторинга северных территорий РФ целесообразно разработать способ комплексной оценки характеристик возможных вариантов солнечно-синхронных орбит и выбор предпочтительных вариантов из них для обеспечения оптимальных условий:

- по освещенности наблюдаемых с КА участков поверхности Земли;
- по видимости КА с наземных пунктов управления и связи с КА;
- по выполнению ограничений на массово-энергетические и аппаратные характеристики КА и средств выведения.

При выборе и оценки оптимальных орбит приняты следующие требования и ограничения:

- приоритетной зоны обслуживания по широте составляет от 300 с.ш. до 750 с.ш. и по долготе от 100 в.д. до 1800 в.д.;
- высота Солнца над горизонтом в подспутниковой точке при наблюдении поверхности Земли с КА должна быть не менее 50°;
- периодичность обзора любой точки приоритетной зоны обслуживания должна быть не более 3 суток;
- угол наблюдения КА с наземного пункта в зонах видимости составляет не менее 5 град;
- высота солнечно-синхронной орбиты составляет не более 900 км.;
- диапазон возможных углов обзора аппаратуры КА по полуконусу относительно радиуса-вектора составляет от 100 до 400°.

При обеспечении перечисленных выше условий съемок может быть достигнуто режим упомянутой актуальной задачи.

Определение параметров солнечно-синхронных изомаршрутных круговых орбит. Искомые варианты орбит выбирались из семейства круговых изомаршрутных орбит с периодом повторения трассы не более 3 суток. Параметры данных орбит рассчитывались по методике [2].

Введем следующие обозначения: N – ближайшее количество целых витков в 1 сутки (86400 сек), $T_{птр}$ – период повторения трассы КА в сутках, $N_{птр}$ – период повторения трассы КА в витках, N_t – точное количество витков в одни сутки, i – наклонение орбиты, $H_{кр}$ – высота круговой орбиты относительно среднего радиуса Земли 6371,032 км, ΔL_{mv} – межвитковое расстояние по долготе на экваторе, ΔL_N – смещение по долготе на экваторе через N витков (суточный сдвиг трассы по долготе), $T_{др}$ – драконический период, $n_{пс}$ – число витков в «полётных сутках», m – индекс орбиты.

Число витков в «полётных сутках» – целая часть от N_t . Индекс кратной орбиты определяется из соотношения $m = N_{птр} - T_{птр} * n_{пс}$

Для исследуемого диапазона высот при $N_T=14...16$, $T_{птр} = 1...3$ суток параметры орбит приведены в таблице 1 в порядке возрастания высот.

Таблица 1 – Параметры круговых солнечно-синхронных изомаршрутных орбит

№ п/п	N, вит	T _{птр} р сут	N _{птр} вит	N _т , вит	i град.	Нкр, км	ΔL _{мв} , град.	ΔLN, град.	T _{др} , мин.	ппс вит.	m
1	16	1	16	16.0	96.5878	285.067	-22.5615	0	90.0	16	0
2	16	3	47	152/3	96.9210	379.071	-23.0416	-7.6805	91.9149	15	2
3	16	2	31	15.5	97.0967	427.335	-23.2893	-11.6447	92.9032	15	1
4	15	3	46	151/3	97.2789	476.472	-23.5425	7.8475	93.9130	15	1
5	15	1	15	15.0	97.6640	577.470	-24.0656	0	96.0	15	0
6	15	3	44	142/3	98.0791	682.283	-24.6126	-8.2042	98.1818	14	2
7	15	2	29	14.5	98.2989	736.193	-24.8955	-12.4477	99.3103	14	1
14	3	43	141/3	141/3	98.5274	791.146	-25.1850	8.3950	100.4651	14	1
	14	1	14	14.0	99.0124	904.317	-25.7846	0	102.8571	14	0

Данные таблицы 1 были проверены путём численного прогноза параметров орбит с учётом возмущений от второй зональной гармоники геопотенциала. Погрешности прогнозирования долготы выхода на экватор по кратности составили не более 0.001 град в сутки.

Для дальнейших оценок были выбраны варианты орбит № 5-7 в диапазоне высот от 550 до 750 км с периодами повторения трассы от 1 до 3 суток.

Определение изменений местного времени полёта в зависимости от широты подспутниковой точки. Местное время полёта КА определяется по соотношению $t_m = 12 \text{ час} + \Delta\lambda$, где $\Delta\lambda$ – разность долгот подспутниковой и подсолнечной точек, выраженная в часовой мере из соотношения 24 часа = 360°.

Очевидно, что для всех возможных подспутниковых точек с одинаковой широтой максимальная освещённость Солнцем обеспечивается в 12 часов местного времени.

Таблица 2 – Разности между местными временами прохождения заданных широт и экватора в восходящей и нисходящей частях витка

φ _i , град	Нкр = 577.470 км		Нкр = 682.283 км		Нкр = 736.193 км	
	восх. часть t _{мф} – t _{мву} , час	нисх. часть t _{мф} – t _{мну} , час	восх. часть t _{мф} – t _{мву} , час	нисх. часть t _{мф} – t _{мну} , час	восх. часть t _{мф} – t _{мву} , час	нисх. часть t _{мф} – t _{мну} , час
30	-0.294	0.294	-0.312	0.312	-0.320	0.320
40	-0.420	0.420	-0.454	0.454	-0.466	0.466
50	-0.611	0.611	-0.645	0.645	-0.664	0.664
55	-0.734	0.734	-0.775	0.775	-0.797	0.797
60	-0.893	0.893	-0.943	0.943	-0.970	0.970
65	-1.112	1.112	-1.175	1.175	-1.208	1.208
70	-1.438	1.438	-1.521	1.521	-1.566	1.566
75	-1.997	1.997	-2.120	2.120	-2.185	2.185

Освещенность трассы КА как геометрического места подспутниковых точек можно регулировать выбором местного времени пролёта экватора на восходящем узле (при освещённой восходящей части витка) или нисходящем узле (при освещённой нисходящей части витка) орбиты, так как разности местных времён пролёта фиксированных широт и экватора для данной орбиты от витка к витку остаются постоянными. В таблице 2 представлены разности местных времён пролёта ряда фиксированных широт φ_i (из приоритетной зоны обслуживания от 30° до 75° с.ш.) и экватора для трёх выбранных вариантов орбит.

Из таблицы 2 видно, что для одних и тех же широт разности на восходящей и нисходящей части витка по абсолютной величине одинаковы и имеют разный знак. Для трёх выбранных орбит на одной и той же широте и одинаковых узлах на экваторе разности в местном времени близки и отличаются для низких широт не более, чем на 0,05 часа (3 мин.) и для высоких широт не более, чем на 0,19 часа (11,4 мин). Разности для орбиты с высотой $H_{кр} = 682.283$ км находятся примерно посередине диапазона их изменения от параметров орбит, отклонения для других орбит на высоких широтах составляет 0,12 часа (7,2 мин.), поэтому дальнейший выбор параметров для обеспечения оптимальной освещённости без потери общности можно проводить путём анализа только данной орбиты.

Порядок выбора оптимальных режимов освещённости трассы КА. Известно, что с возрастанием широты освещенность земной поверхности Солнцем, характеризующаяся углом α падения солнечных лучей на поверхность Земли, убывает. Поэтому для обеспечения удовлетворительной освещённости трассы прежде всего в области высоких широт необходимо, чтобы местное время пролёта трассы на высоких широтах от 65° до 75° в пределах приоритетной зоны обслуживания было близким к 12 часам, т. к. угол α в точках трассы на данных широтах при таких условиях близок к максимальному. Пользуясь данными таблицы 2, границы возможного диапазона для местных времён пересечения экватора можно определить из уравнений:

для варианта освещенной нисходящей части витка:

нижняя граница: $t_{m75} = 12$ час; 12 час – $t_{minmny} = 2.120$ час;
 $t_{minmny} = 9.880$ час;

верхняя граница: $t_{m65} = 12$ час; 12 час – $t_{maxmny} = 1.175$ час;
 $t_{maxmny} = 10.825$ час;

для варианта освещенной восходящей части витка:

нижняя граница: $t_{m65} = 12$ час; 12 час – $t_{minmvy} = -1.175$ час;
 $t_{minmvy} = 13.125$ час;

верхняя граница: $t_{m75} = 12$ час; 12 час – $t_{maxmvy} = -2.120$ час;
 $t_{maxmvy} = 14.120$ час;

Отсюда следует, что имеется 2 возможных диапазона изменения местного времени пересечения экватора:

при освещении в нисходящей части витка – с 9 час 53 мин до 10 час 50 мин в нисходящем узле,

при освещении в восходящей части витка – с 13 час 09 мин до 14 час 06 мин в восходящем узле.

Учитывая, что в течение года долгота истинного Солнца может отличаться от средней на величину не более ± 4 град. (что во временной мере соответствует отличию истинных солнечных суток от средних не более, чем на 16 мин), до-

пустимый диапазон изменения местного времени пересечения экватора, в котором в течение всего года гарантируется выполнение указанных выше условий освещённости трассы в высоких широтах составляет:

в нисходящем узле при освещении в нисходящей части витка – с 10 час 09 мин до 10 час 34 мин,

в восходящем узле при освещении в восходящей части витка – с 13 час 25 мин до 13 час 50 мин.

Таблица 3 – Характеристики освещённости трассы КА в нисходящей части витка

Дата	φ , град.	30	40	50	55	60	65	70	75
21.03	α , град.	54.64	46.95	38.51	34.09	29.55	24.90	20.08	14.96
	t , час	10.68	10.82	11.01	11.14	11.31	11.54	11.89	12.49
21.06	α , град.	72.34	68.53	61.51	57.37	52.97	48.36	43.51	38.31
	t , час	10.77	10.91	11.11	11.24	11.40	11.64	11.98	12.58
23.09	α , град.	56.24	47.95	39.03	34.42	29.70	24.88	19.91	14.64
	t , час	10.93	11.07	11.26	11.39	11.56	11.79	12.14	12.74
21.12	α , град.	33.89	24.88	15.65	10.96	6.23	1.42	< 0	< 0
	t , час	10.83	10.97	11.16	11.29	11.46	11.69	-	-

Таблица 4 – Характеристики освещённости трассы КА в восходящей части витка

Дата	φ , град.	30	40	50	55	60	65	70	75
21.03	α , град.	54.60	46.91	38.47	34.05	29.51	24.86	20.04	14.92
	t , час	13.32	13.18	12.99	12.86	12.69	12.44	12.11	11.51
21.06	α , град.	70.00	66.95	60.64	56.77	52.59	48.16	43.47	38.41
	t , час	13.42	13.27	13.08	12.95	12.78	12.55	12.20	11.60
23.09	α , град.	52.50	45.43	37.49	33.29	28.95	24.48	19.84	14.91
	t , час	13.57	13.43	13.23	13.11	12.94	12.71	12.36	11.76
21.12	α , град.	32.44	23.82	14.94	10.43	5.85	1.21	< 0	< 0
	t , час	13.47	13.33	13.14	13.01	12.83	12.61	-	-

В угловой мере разность $\Delta\lambda$ с между долготой пересечения КА экватора и долготой подсолнечной точки, соответствующая указанному диапазону, составляет:

при освещении в нисходящей части витка – от минус 27.75 до минуса 21.50 град. в нисходящем узле,

при освещении в восходящей части витка с 21.25 до 27.50 град. в восходящем узле.

Определение характеристик освещённости трассы КА в приоритетной зоне обслуживания при оптимальном режиме мониторинга.

В таблицах 3 и 4 представлены характеристики освещённости подспутниковых точек при прохождении КА серии фиксированных широт в приоритетной зоне обслуживания в даты солнцестояний и равноденствий соответственно для вариантов освещённой нисходящей и восходящей части витков. Разности долгот $\Delta\lambda_c$ на дату весеннего равноденствия были выбраны соответственно равными -24.5° и 24.5° , что приходится приблизительно на середины указанных в п.3 допустимых диапазонов.

Из таблиц 3, 4 видно, что по характеристикам освещённости варианты прохождения освещённой части витка в нисходящей и восходящей частях практически одинаковы. Одинаковы и характеристики освещённости в даты весеннего и осеннего равноденствий, разница в углах α_c на одних и тех же широтах не превышает $0,5^\circ$. Для выбранных значений $\Delta\lambda_c$ местное время прохождения широты 70° с точностью до 0,4 часа составляет 12 часов.

В таблицах 5, 6 соответственно для вариантов освещённых нисходящей и восходящей частей витка в даты равноденствий и солнцестояний приведены местные времена прохождения экватора в восходящем и нисходящем узлах во временной и угловой мере и диапазоны широт, в которых угол α_c составляет более 5 и более 10 град.

Таблица 5 – Прохождение экватора и граничные широты по характеристикам освещённости в нисходящей части витка

Дата	tmvu	$\Delta\lambda_c$ ву	tmну	$\Delta\lambda_c$ ну	$\varphi(\alpha_c > 5^\circ)$	$\varphi(\alpha_c > 10^\circ)$
21.03	22.37 час	155.51°	10.37 час	-24.50°	<81.77°	<79.20°
21.06	22.46	156.92	10.46	-23.08	>66.10	>70.94
23.09	22.61	159.21	10.62	-20.78	<81.62	<78.86
21.12	22.52	157.78	10.52	-22.23	<61.28	<56.02

Примечание: Для дня летнего солнцестояния указаны нижние границы диапазонов на широт для «обратной» от Солнца по отношению к Северному полюсу стороны Земли.

Таблица 6 – Прохождение экватора и граничные широты по характеристикам освещённости в восходящей части витка

Дата	tmvu	$\Delta\lambda_c$ ву	tmну	$\Delta\lambda_c$ ну	$\varphi(\alpha_c > 5^\circ)$	$\varphi(\alpha_c > 10^\circ)$
21.03	13.63 час	24.50°	1.63 час	-155.50°	<81.76°	<79.17°
21.06	13.73	25.94	1.73	-154.06	>65.38	>70.31
23.09	13.88	28.24	1.88	-151.75	<81.83	<79.28
21.12	13.80	26.58	1.80	-153.02	<60.91	<55.45

Примечание: Для дня летнего солнцестояния указаны нижние границы диапазонов

на широт для «обратной» от Солнца по отношению к Северному полюсу стороны Земли.

Из таблиц 5 и 6 видно, что в день зимнего солнцестояния на широтах больше $61^\circ \alpha c < 5^\circ$, т.е. часть приоритетной зоны обслуживания на широтах от 61 до 66 град. недостаточно освещена для наблюдения, а севернее 66 град. находится в тени. Точная оценка показывает, что вся зона приоритетного обслуживания, включая её северную границу на широте 75° достаточно освещена в период с 23.02 по 18.10.

Определение характеристик обзора поверхности Земли и условий полномасштабного мониторинга Северных районов Российской Федерации. **Введем следующие обозначения:**

β – задаваемый характеристиками бортовой аппаратуры угол полуконуса обзора Земли с КА, (ось – радиус-вектор КА, вершина – КА); α – угол центрального полуконуса, соответствующего конусу обзора Земли с КА (ось совпадает с осью конуса обзора, вершина – в центре Земли); $\Delta L_{по}$ – ширина полосы обзора поверхности Земли в линейной мере; D_{max} – максимальное расстояние от КА до поверхности Земли в пределах конуса обзора (минимальное расстояние равно $H_{кр}$); d – максимальное изменение дальности от КА до поверхности Земли в пределах конуса обзора относительно $H_{кр}$.

Расчеты данных характеристик проводились с использованием допущения о сферической форме Земли [3].

В таблице 7 приведены характеристики обзора поверхности Земли для трёх выбранных орбит для значений угла β , равных 40° , 20° и 10°

Таблица 7 – Характеристики обзора поверхности земли с КА

<i>H_{кр}, км</i>	<i>β, град.</i>	<i>α, град.</i>	<i>ΔL_{по}, км</i>	<i>D_{max}, км</i>	<i>d, км</i>
577.470	40	4.511	1003.21	779.60	0.350
	20	1.902	422.98	618.27	0.072
	10	0.917	203.95	587.21	0.017
682.283	40	5.367	1193.57	927.122	0.356
	20	2.250	500.38	731.297	0.072
	10	1.084	241.072	693.966	0.017
736.193	40	5.813	1292.67	1003.792	0.363
	20	2.429	540.23	789.533	0.073
	10	1.170	260.11	748.898	0.017

В таблице 8 приведены минимальные межтрассовые расстояния $\Delta L_{мтр \min}$ по долготе на различных широтах в линейной мере для трёх выбранных орбит в пределах периода повторения трассы. Для орбиты суточной кратности с высотой $H_{кр}=577.470$ км минимальное межтрассовое расстояние по долготе равно межвитковому, так как суточный сдвиг трассы по долготе отсутствует. Для орбит двух- и трехсуточной кратности минимальное межтрассовое расстояние на экваторе в угловой мере равно суточному сдвигу трассы по долготе ΔL_N (см. табл. 1).

Условием полного покрытия поверхности Земли полосами обзора на какой-либо широте φ является выполнение неравенства $\Delta L_{по} \geq \Delta L_{мтр \min}(\varphi)$.

Анализ выполнения этого условия по данным таблиц 7,8 на рассматри-

ваемых орбитах для различных значений широты φ и угла обзора β , показывает следующее.

Таблица 8 – Минимальные межтрассовые расстояния по долготе на различных широтах (в км)

Нкр, км	$\varphi=0^\circ$	$\varphi=30^\circ$	$\varphi=40^\circ$	$\varphi=50^\circ$	$\varphi=60^\circ$	$\varphi=70^\circ$
577.470	2675.99	2317.47	2049.92	1720.09	1337.99	915.24
682.283	912.27	790.05	698.84	586.40	456.13	312.01
736.193	1384.13	1198.69	1060.30	889.70	692.06	473.40

На орбите суточной кратности $N_{кр}=577.470$ км полное покрытие при $\beta=10^\circ, 20^\circ$ всех рассматриваемых широт не обеспечивается. При $\beta=40^\circ$ условия полного покрытия выполнены только для широты 70° . Точная оценка показывает, что условия полного покрытия обеспечиваются на широтах более $68,0^\circ$.

На орбите трёхсуточной кратности с высотой $N_{кр}=682.283$ км условия полного покрытия при $\beta=10^\circ$ для всех рассматриваемых широт не обеспечиваются. При $\beta=20^\circ$ условия полного покрытия выполняются для широт 60° и 70° . Точная оценка показывает, что условия полного покрытия обеспечиваются на широтах более $56,7^\circ$. При $\beta=40^\circ$ условия полного покрытия обеспечиваются для всех рассматриваемых широт, в том числе и на экваторе.

На орбите двухсуточной кратности с высотой $N_{кр}=736.193$ км условия полного покрытия при $\beta=10^\circ$ для всех рассматриваемых широт не обеспечиваются. При $\beta=20^\circ$ условия полного покрытия выполняются для широты 70° . Точная оценка показывает, что условия полного покрытия обеспечиваются на широтах более $67,0^\circ$. При $\beta=40^\circ$ условия полного покрытия не обеспечиваются только на экваторе, для широт 30° и далее условия полного покрытия выполняются. Точная оценка показывает, что полное покрытие обеспечивается на широтах более $21,0^\circ$.

Таким образом, из трёх рассмотренных орбит наиболее предпочтительной по обеспечению условий полного покрытия является орбита трёхсуточной кратности с высотой $N_{кр}=682.283$ км. При $\beta=40^\circ$ за трое суток обеспечивается глобальное покрытие поверхности Земли. При $\beta=20^\circ$ полное покрытие поверхности Земли обеспечивается на широтах более $56,7^\circ$.

Таблица 9 – Минимальные углы обзора для обеспечения условий полного покрытия

$N_{кр}, км$	вариант	$\beta_{min}, град.$	$D_{max}, км$	$d, км$
577.470	глоб.	61.62	1509.57	1.614
	$\varphi \geq 30^\circ$	59.36	1339.33	1.319
682.283	глоб.	33,12	834.12	0.223
	$\varphi \geq 30^\circ$	29.61	798.88	0.171
736.193	глоб.	41.75	1037.18	0.409
	$\varphi \geq 30^\circ$	38.06	970.78	0.319

В таблице 9 приведены минимальные значения угла обзора β , при которых на рассматриваемых орбитах за период кратности может быть обеспечено:

- глобальное покрытие поверхности Земли полосами обзора;

– полное покрытие поверхности Земли в приоритетной зоне обслуживания на широтах более 30°.

Приведены также соответствующие им значения D_{\max} и d .

Определение характеристик видимости КА с наземных пунктов контроля КА ДЗЗ и рекомендации по их размещению. Зоны видимости рассчитывались с ограничением по углу места наблюдения КА не менее 5°. Для практического использования считались пригодными те интервалы зон, продолжительность которых составляет не менее 1 минуты. Все данные рассчитывались для орбиты 3-х суточной кратности с высотой $H_{кр}=682.283$ км.

В таблицы 10 приведены обобщённые характеристики видимости для ряда населённых пунктов – указаны диапазоны долгот пересечения экватора в восходящих частях витков, на которых продолжительность зон видимости составляет не менее 1 минуты. Пункты указаны в порядке возрастания географической широты. Отдельно указаны долготы витков, на которых относительно данного пункта наблюдения КА проходит через зенит – на таких витках продолжительность зоны видимости максимально возможная. При полёте КА долготы пересечения экватора от витка к витку ступенчато уменьшаются на величину межвиткового расстояния (для рассматриваемой орбиты на 24.613°), так что вход в любой интервал видимости всегда происходит через правую границу (в таблице – «вход»), выход – через левую (в таблице – «выход»).

Таблица 10 – Интервалы долгот начала витков КА, видимых с наземных пунктов

название пункта	широта В, град.	долгота L, град.	видим. в восх. части витка			видим. в нисх. части витка		
			выход	зенит	вход	выход	зенит	вход
Щёлково	55.95	37.96	16.29	53.98	100.72	167.59	214.21	251.81
С.-Петербург	59.71	30.19	6.37	48.19	107.51	145.14	204.46	246.28
Якутск	61.98	129.66	104.13	149.32	-	-	302.28	347.37
Н. Уренгой	66.08	76.68	46.85	99.79	-	-	245.84	298.78

Из таблицы 10 видно, что чем севернее расположен пункт, тем больше продолжительность интервалов долгот видимых витков. Для пунктов Щёлково и С.-Петербург имеется 2 интервала видимости в восходящей и нисходящей частях витков. Для пунктов Якутск и Н.Уренгой, расположенных севернее, интервалы видимости сливаются в один длинный интервал, в начальной части которого (у верхней границы) зоны видимости имеются в нисходящей части витка, а в конечной (у нижней границы) – в восходящей. Более точные оценки показывают, что для рассматриваемой орбиты слияние интервалов видимости в один наблюдается для пунктов, широта которых больше 61,25°.

Другими обобщёнными характеристиками видимости являются:

- максимальная продолжительность зоны видимости: для рассматриваемой орбиты независимо от пункта наблюдения она составляет 11,3 мин;
- разности долгот (относительно долготы наземного пункта) пересечения экватора в восходящем $\Delta L_{\text{в}}$ и нисходящем узлах $\Delta L_{\text{н}}$ орбиты для границ интервалов и долгот витков прохода КА относительно пункта через зенит;
- продолжительности интервалов долгот видимых витков, выраженные в градусах δL и в межвитковых расстояниях (витках) δN .

Разности долгот позволяют вычислить интервалы видимости по долготе пересечения экватора на витках для любого другого пункта, расположенного на одной и той же широте с исходным. Для этого достаточно к относительным долготам прибавить долготу наземного пункта.

Величина δN равна среднему количеству смежных видимых витков при попадании долгот начал витков в пределы данного интервала. По аналогии, продолжительность промежутков между интервалами, отнесённая к межвитковому расстоянию равна среднему количеству смежных невидимых витков.

В таблице 11 представлены обобщённые характеристики видимости для пунктов с широтами, эквивалентными широте Щёлкова и С.-Петербурга, расположенных южнее $61,25^\circ$ широты и для которых наблюдается 2 интервала видимости по долготам витков с зонами в восходящей и нисходящей частях витков (ВЧВ, НЧВ). Указана продолжительность двух промежутков (большого и малого) между этими интервалами.

Таблица 11 – Обобщённые характеристики видимости КА с наземных пунктов, расположенных южнее $61,25^\circ$

В, град.	название интервала	$\Delta L_{\text{в}}$, град.			$\Delta L_{\text{н}}$, град.			δL , град.	δN , вит.
		выход	зенит	вход	выход	зенит	вход		
55.9 5	видимость в ВЧВ	-21.67	16.02	62.76	-213.85	-176.25	-129.63	84.33	3.43
	малый промеж.	62.76	-	129.63	-129.63	-	-62.76	66.87	2.73
	видимость в НЧВ	129.63	176.25	213.85	-62.76	-16.02	21.67	84.33	3.43
	большой промеж.	213.85	-	-21.67	21.67	-	-213.85	124.48	5.07
59.7 1	видимость в ВЧВ	-23.82	18.00	77.32	-216.09	-174.27	-114.95	101.14	4.12
	малый промеж.	107.51	-	145.14	-114.95	-	-77.32	37.63	1.54
	видимость в НЧВ	114.95	174.27	216.09	-77.32	-18.00	23.82	101.14	4.12
	большой промеж.	216.09	-	-23.82	23.82	-	-216.09	120.09	4.88

В таблице 12 представлены обобщённые характеристики видимости для пунктов с широтами, эквивалентными широте Якутску и Н. Уренгою, расположенных севернее $61,25^\circ$ широты для которых имеется один непрерывный интервал видимости по долготам витков. Указаны долготы в середине интервалов на долготе «слияния» между долготами прохождения в зените в восходящих и нисходящих частях витка, где максимальный угол места в зоне оказывается в ло-

кальном минимуме (угл) функции относительной долготы. Указаны также границы и продолжительность интервала относительных долгот, на которых зоны видимости отсутствуют.

Таблица 12 – Обобщённые характеристики видимости КА с наземных пунктов, расположенных севернее 61,25°

В, град.	название интервала	i (узел)	ΔLi_{ij} , град.					угл, град.	δL , град.	δN , вит.
			выход	зен. ВЧВ	слияние	зен. НЧВ	вход			
61.98	видимые витки	i = в	-25.43	19.66	96.14	172.62	217.71	6.0	243.14	9.80
		i = н	-217.71	-	-96.14	-19.66	25.43			
	невидимые витки	i = в	217.71	-	-	-	-25.43	-	116.86	4.86
		i = н	25.43	-	-	-	-217.71			
66.08	видимые витки	i = в	-29.83	23.11	96.14	169.16	222.10	12.0	251.93	10.26
		i = н	-222.10	-	-96.14	-23.11	29.83			
	невидимые витки	i = в	222.10	-	-	-	-29.83	-	108.07	4.40
		i = н	29.83	-	-	-	-222.10			

Анализ таблиц 11, 12 показывает, что в относительных долготах интервалы видимости в нисходящих частях витка для нисходящих узлов и в восходящих частях витка для нисходящих узлов симметричны относительно нулевой относительной долготы – долготы наземного пункта. Для пунктов, расположенных южнее широты 61.25°, имеются 2 интервала видимости, продолжительностью в 3-4 витка, между которыми есть малый промежуток в 2-3 невидимых витка и большой в 5 невидимых витков. Для пунктов, расположенных севернее широты 61,25°, имеется один интервал видимости в 9-10 витков и интервал отсутствия видимости в 4-5 витков.

Для обеспечения условий видимости с одного наземного пункта на всех витках наблюдения, проходящих в диапазоне долгот зоны приоритетного обслуживания (ЗПО) от 10° до 180° целесообразнее выбирать наземный пункт, расположенный севернее широты 61.25°, так как только для таких пунктов длина интервала долгот видимых витков δL оказывается больше длины диапазона долгот ЗПО (170°).

При выборе варианта наблюдения ЗПО в освещённой восходящей части витка (см. табл.6) целесообразно обеспечивать видимость КА на витках, долготы в восходящих узлах которых перекрывают диапазон долгот ЗПО. Поскольку интервал относительных долгот витков в таких узлах, где обеспечивается видимость согласно табл. 12 составляет от -25°...-30° до 218°...222°, пункт наблюдения в этом случае следует размещать в западных регионах РФ ($L=30^\circ \dots 40^\circ$). Например, одним из возможных вариантов является Мурманск ($B=68,96^\circ L=33,09^\circ$) с приблизительным диапазоном долгот восходящих узлов видимых витков от 0° до 255°.

При выборе варианта наблюдения ЗПО в освещённой нисходящей части витка (см. табл. 5) целесообразно обеспечивать видимость на витках, долготы в нисходящих узлах которых перекрывают диапазон долгот ЗПО. Поскольку интервал относительных долгот витков в таких узлах, где обеспечивается види-

мость согласно табл. 12 составляет от $-218^{\circ} \dots -222^{\circ}$ до $25^{\circ} \dots 30^{\circ}$, пункт наблюдения в этом случае следует размещать в восточных регионах РФ ($L=150^{\circ} \dots 180^{\circ}$). Например, одним из возможных вариантов является Анадырь ($B=64,73^{\circ}$ $L=177,52^{\circ}$) с приблизительным диапазоном долгот нисходящих узлов видимых витков от -43° до 204° .

Для пунктов, расположенных южнее широты 61.25° видимость на всех витках в диапазоне долгот ЗПО можно обеспечить с двух пунктов, расположенных примерно на одной широте и разнесённых по долготе на $70 \dots 80^{\circ}$. В этом случае интервал малого промежутка невидимых витков с одного пункта перекрывается с 4-х градусным запасом (для широты Щёлкова) одним из интервалов видимых витков другого пункта. При выборе варианта ЗПО в освещённой восходящей части витка (табл. 6) долгота западного из пары пунктов должна составлять не более $31 \dots 33^{\circ}$, а при выборе варианта ЗПО в освещённой нисходящей части витка (табл. 5) долгота восточного из пары пунктов должна составлять не менее $156 \dots 159^{\circ}$.

Заключение

Таким образом, из проведенного исследования комплексной оценки и анализа семейства возможных вариантов солнечно-синхронных орбит на условия использования КА ДЗЗ по целевому назначению можно сделать следующие выводы:

1. Из рассмотренных орбит (высота не более 900 км.) наиболее предпочтительной по обеспечению условий полного покрытия, минимальным изменениям условий освещенности трассы полета КА, глобальному покрытию поверхности Земли полосами обзора и полному покрытию поверхности Земли в зоне обслуживания северных территорий РФ, максимальной продолжительности зоны видимости с наземных пунктов контроля является орбита трёхсуточной кратности с высотой $H_{кр} = 682.283$ км. и обеспечивает выполнение основных баллистических требований, предъявляемых к функционированию перспективных КА ДЗЗ, изложенных в [1,2].

2. Разработанный численно-экспертный способ может быть использован при проектировании и обосновании параметров (высоты и наклона плоскости ССО) рабочих орбит КА ДЗЗ на солнечно-синхронных круговых и эллиптических орбит.

Литература

1. Концепция развития российской космической системы дистанционного зондирования Земли на период до 2025 года // М: Российское космическое агентство. 2006. 44 с.
2. Чернов А.А., Чернявский Г.М. Орбиты спутников дистанционного зондирования Земли, Лекции и упражнения. М.: Радио и связь, 2004. 200 с.
3. Баринов К.Н., Бурдаев М.Н., Мамон П.А. Динамика и принципы построения орбитальных систем космических аппаратов. М.: Машиностроение, 1975.

УДК 629.7

Оценка готовности оборудования стартового космического комплекса на ранних этапах его создания

Л.В. Эртман, начальник Научно-исследовательского комплекса, кандидат технических наук, старший научный сотрудник,

В.Б. Рудаков, советник директора, доктор технических наук, профессор, Научно-исследовательский институт космических систем имени А.А. Максимова – филиал АО «ГКНПЦ им. М.В. Хруничева» в городе Королев (НИИ КС им. А.А. Максимова), г. Королев, Московская область

Оценивание готовности оборудования стартового космического комплекса (СКК) на этапе его создания вызывает существенные затруднения вследствие отсутствия или недостаточного объема экспериментальных данных о характеристиках его надежности. В настоящей статье предлагается осуществлять оценивание готовности СКК на основе таких характеристик как: характеристики надежности его элементов, структурная схема надежности на уровне элементов, алгоритм его функционирования в период дежурства, проектные значения показателей восстановления работоспособного состояния при возникновении отказа, проектные характеристики системы диагностики. Предлагаются математические зависимости и способы имитационного моделирования, которые используют данные характеристики СКК для расчета коэффициента готовности СКК.

Вероятность, время восстановления, готовность, дежурство, коэффициент готовности, математическое ожидание, оборудование, показатель надежности, работоспособность, элементы.

Assessment of the Readiness of the Equipment of the Launch Space Complex at the Early Stages of its Creation

L.V. Ertman, Head of the Scientific Research Complex, PhD, Senior Scientific Researcher,

V.B. Rudakov, Advisor of the Director, PhD, Professor, Scientific Research Institute of Space Systems Named After A.A. Maksimov – the Branch of Khrunichev State Research and Production Space Center in the City of Korolev (Maksimov SRC of SS), Korolev, Moscow region

Assessing the readiness of the equipment of the launch space complex (LSC) at the stage of its creation causes significant difficulties due to the lack or insufficient amount of experimental data on the characteristics of its reliability. In the article, we propose to evaluate the readiness of the LSC based on such characteristics as: reliability characteristics of its elements, a structural diagram of reliability at the level of elements, an algorithm for its operating during duty, project values of indicators for re-

storing the operational state in the event of a failure, project characteristics of the diagnostic system. In addition, we propose mathematical dependencies and simulation methods used these LSC characteristics for calculating of the LSC readiness coefficient.

Probability, recovery time, readiness, duty, readiness coefficient, mathematical expectation, equipment, reliability indicator, operability, elements.

Стартовый космический комплекс (СКК) представляет собой совокупность стационарных и подвижных технических средств (технологическое оборудование) и сооружений, предназначенных для обеспечения готовности, подготовки и пуска ракет космического назначения.

Технологическое оборудование стартового комплекса предназначено для проведения всех видов работ с ракетой космического назначения и (или) с её составными частями на стартовой позиции.

В СКК при анализе и оценке технического состояния и надёжности в качестве основных заданных функций оборудования стартового комплекса обычно рассматривают:

- хранение;
- дежурство в установленной готовности;
- подготовка ракеты космического назначения к пуску за заданное время.

В соответствии с требованиями руководящих документов [3, 4, 5] анализ и оценка надёжности оборудования стартового комплекса в целом и его структурных элементов должна проводиться на ранних стадиях его создания: стадиях проектирования и наземных испытаний (экспериментальной отработки). При этом оценка на любой из указанных стадий должна быть ориентирована на этап эксплуатации.

Этап эксплуатации характеризуется следующими периодами:

- хранение τ_{xp} – период времени с момента принятия технологического оборудования стартового комплекса эксплуатирующей организацией t_0 до момента поступления команды на подготовку к пуску t_k или до конца установленного срока эксплуатации;
- дежурство в установленной готовности τ_d – период времени от момента приведения в установленную готовность t_{np} до момента поступления команды на подготовку к пуску t_k ;
- подготовка к пуску $\tau_{пск}$ – период времени от момента начала подготовки СКК к приему ракеты космического назначения (РКН) $t_{нп}$ до момента пуска $t_{п}$.

Каждый из указанных периодов эксплуатации характеризуется группой основных и вспомогательных показателей надёжности, для расчёта которых, как правило, используются следующие исходные данные:

n_i – количество неисправностей и отказов оборудования стартового комплекса при проведении i -го вида работ (подготовка к применению, техническое обслуживание, применение по назначению и т.д.);

τ_{ei} – продолжительность устранения i -й неисправности (отказа), $i = \overline{1, n}$;

$\tau_{под}$ – продолжительность подготовки оборудования стартового комплекса к применению по назначению;

T_{pec} – расход ресурса оборудования стартового комплекса (наработка оборудования стартового комплекса в циклах, часах);

k_j – категория оборудования j -го стартового комплекса;

N_{ei} – количество обслуживающего персонала, участвующего в проведении работ по i -му восстановлению исправного состояния стартового комплекса;

N_j – количество обслуживающего персонала, эксплуатирующего стартовый комплекс;

Основным показателем надежности СКК в период дежурства является коэффициент готовности оборудования СКК. Его оценка проводится с использованием соотношения:

$$K_{г} = \frac{T_p}{T_p + T_{в}} = 1 - \frac{T_{в}}{T_{э}} \quad (1)$$

где T_p – время нахождения СКК данного типа в работоспособном (исправном) состоянии за период эксплуатации;

$T_{в}$ – время восстановления работоспособного (исправного) состояния СКК за рассматриваемый интервал времени $T_{э}$;

$T_{э}$ – продолжительность эксплуатации СКК (продолжительность периода, за который осуществляется оценка коэффициента готовности).

Основным показателем надежности СКК в период применения является оценка вероятности подготовки РКН к запуску $\hat{P}(\tau_{п})$ за заданное время $\tau_{п}^{зад}$ и ее среднее квадратическое отклонение $\sigma_{\hat{P}(\tau_{п})}$;

Вероятность безотказного функционирования оборудования СКК в период применения по назначению рассчитывается на основе структурной схемы надежности (ССН) и информации о надёжности комплектов (систем) оборудования СКК с использованием соотношения:

$$P(\tau_{п}) = \prod_{i=1}^{N_k} P_i(\tau_{п}) \quad (2)$$

где N_k – число комплектов (систем) технологического оборудования СКК, входящих в ССН;

$P_i(\tau_{п})$ – вероятность безотказной работы i -го комплекта (системы) технологического оборудования СКК в период применения по назначению ($i = \overline{1, N_k}$).

Однако указанная вероятность $P(\tau_{п})$, хотя и является важной характеристикой СКК, но является только техническим показателем и не отображает полные свойства СКК в период проведения операций по подготовке РКН к запуску. Наиболее полно свойство надежности СКК в указанный период отображает оперативно-технический показатель, так как отказ оборудования СКК еще не влечет за собой невыполнение заданной функции по подготовке РКН к запуску. Это обусловлено наличием резерва времени, который позволяет устранить возник-

ший отказ и выполнить задачу по подготовке к запуску за заданное время. Кроме того, процесс подготовки к запуску имеет сетевую структуру, которая позволяет эффективно использовать указанный резерв времени. Также к основным показателям надежности следует отнести среднее время подготовки РКН к запуску на СКК $\hat{M}(\tau_n)$ и его среднее квадратическое отклонение.

Для оценки этих показателей K_g и $P(\tau_n)$ необходима информация статистического характера. На этапе эксплуатации эту информацию получают в процессе эксплуатации в виде экспериментальных данных, проводят расчеты показателей непосредственно по приведенным выше формулам. На ранних этапах создания СКК такая информация отсутствует. Кроме того, для получения адекватных оценок на стадии экспериментальной отработки необходим определенный объем исходных данных о характеристиках надежности оборудования СКК, которого, как правило, оказывается недостаточно. Поэтому для вычисления показателей надежности применяются расчетные и расчетно-экспериментальные методы. В основе этих методов лежат имманентные свойства систем, агрегатов, деталей, узлов приборов и элементов, которые закладываются конструктором на этапе проектирования и в последующем реализуются на этапе экспериментальной отработки СКК, его систем, агрегатов, элементов. К таким свойствам, прежде всего, относятся характеристики надежности конструктивно неделимых элементов, а так же приборов и узлов следующего уровня иерархии, проектные значения времени восстановления работоспособности (исправности) при выявлении отказов, проектные характеристики системы диагностики.

Все эти характеристики должны использоваться для расчета показателей надежности СКК. Они содержатся в справочниках, в документации по результатам проектирования и различных испытаний, которые осуществляются в период создания СКК. Облеченные в структурные схемы надежности систем и агрегатов СКК, они являются главной первичной информацией для всех последующих расчетов показателей надежности СКК расчетным и расчетно-экспериментальными методами.

На этапе создания наиболее важными являются основные показатели надежности, на которые задаются требования в ТТЗ на создание СКК. К ним относятся описанные ранее показатели K_g , $\hat{P}(\tau_n)$, $\hat{M}(\tau_n)$.

Рассмотрим математические зависимости для расчета показателя надежности СКК на этапе дежурства – коэффициента готовности. Расчет данного показателя осуществляется на основе соотношения (1). Для проведения оценивания коэффициента готовности расчетным и расчетно-экспериментальными методами соотношение (1) представим в следующем виде.

$$K_g = 1 - \sum_{i=1}^q T_{vi} / T_{\Sigma} , \quad (3)$$

где T_{vi} – математическое ожидание времени восстановления СКК при i -ой проверке работоспособности (исправности) его оборудования в период эксплуатации T_{Σ} ;

q – число проверок работоспособности (исправности) оборудования СКК

в период эксплуатации T_{Σ} .

В практике эксплуатации контроль работоспособности СКК и восстановление работоспособного состояния производится преимущественно на уровне конструктивно-съемных единиц (КСЕ). При допущении, что во время очередного контроля работоспособности (исправности) СКК может находиться в состоянии отказа (неисправности) только одна КСЕ, величина T_{Vi} определится из следующего соотношения:

$$T_{Vi} = \sum_{k=1}^L u_{ik} \tau_{ik} \quad (4)$$

где u_{ik} – вероятность восстановления k -ой КСЕ при i -ой проверке работоспособности (исправности) оборудования СКК;

τ_{ik} – время восстановления работоспособности СКК путем замены отказавшей k -ой КСЕ согласно технологической карте восстановления работоспособности с учетом функционирования системы диагностики;

L – число КСЕ в оборудовании СКК.

Значение u_{ik} рассчитывается по известной из теории восстановления зависимости [1]:

$$u_{ik} = \sum_{j=0}^{i-1} u_{jk} f_{i-j} \quad , \quad (5)$$

где f_{i-j} – вероятность того, что данная (k -ая) КСЕ впервые отказала при i -ом контроле работоспособности. Значение этой вероятности вычисляется по следующей математической зависимости:

$$f_{i-j} = p_{i-j-1} - p_{i-j} \quad (6)$$

Величины p_{i-j} и p_{i-j-1} являются вероятностями безотказной работы k -ой КСЕ за периоды $(k-j) \cdot \Delta T$ и $(k-j-1) \cdot \Delta T$ соответственно (ΔT – длительность межконтрольного периода). На этапе проектирования эти вероятности вычисляются по структурным схемам надежности СКК, составленным на уровне комплектов элементов с характеристиками надежности, взятыми из справочной литературы и иной документации по испытаниям элементов.

Очевидно, что в исходной точке функционирования СКК все его системы, агрегаты и КСЕ находятся в исправном состоянии, поэтому вероятность восстановления в этой точке принимается равной единице $u_0 = 1$.

Вычисления проводятся последовательно от $i = 1$ до $i = q$.

Так, например,

$$\text{при } i = 1 \quad u_1 = \sum_{j=0}^0 u_j f_{i-j} = u_0(p_0 - p_1) \quad (7)$$

$$\text{при } i = 2 \quad u_2 = \sum_{j=0}^1 u_j f_{i-j} = u_0(p_1 - p_2) + u_1(p_0 - p_1) \quad (8)$$

$$\text{при } i = 3 \quad u_3 = \sum_{j=0}^2 u_j f_{i-j} = u_0(p_2 - p_3) + u_1(p_1 - p_2) + u_2(p_0 - p_1) \quad (9)$$

Таким образом, вычисляются значения вероятностей восстановления в i -

ой точке контроля работоспособности для каждой КСЕ. Вычисленные значения подставляются в формулу (4).

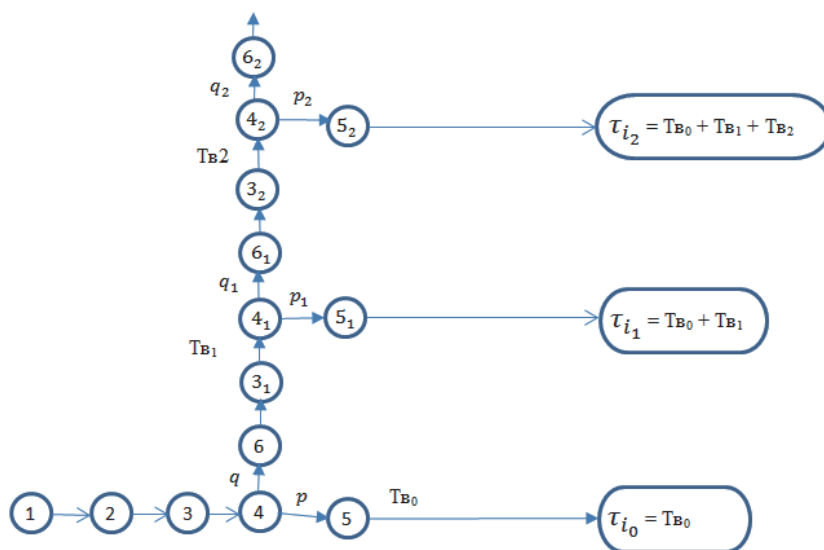


Рисунок 1 – Схема определения значения времени восстановления работоспособного (исправного) состояния СКК при обнаружении отказа i -ой КСЕ путем ее замены

На этапе эксплуатации значения времен восстановления τ_{i_k} при отказах КСЕ могут быть получены опытным путем. На этапе проектирования и экспериментальной отработки, как отмечалось выше, получение указанных данных в виде статистической информации является проблематичным. Это обусловлено новизной разрабатываемого СКК, что не позволяет в полной мере использовать СКК-аналог, так как временные характеристики вновь разрабатываемого СКК могут существенно отличаться от СКК-аналога. Поэтому существует необходимость получения значений времен восстановления τ_{i_k} при отказах КСЕ на основе собственных характеристик разрабатываемого СКК, которыми он обладает на этапах проектирования и экспериментальной отработки. К таким характеристикам, относятся:

1. Характеристики надежности СКК, его составных частей и элементов.
2. Проектные времена восстановления КСЕ и разрабатываемые на их основе технологические карты выполнения операций по восстановлению работоспособности (исправности) СКК при отказе определенных КСЕ. Эти карты должны учитывать только чистое время на выполнение каждой операции, без учета возможных задержек из-за организационных ошибок, недостаточной квалификацией обслуживающего персонала, отсутствием необходимых ЗИП при устранении отказов и др. Такое время будет представлять собой первое приближение расчетного времени восстановления работоспособности СКК путем замены отказавшей КСЕ.

3. Проектные характеристики системы диагностики выявления отказов и неисправностей приборов (КСЕ) с точностью до одной, двух и т.д. КСЕ.

Все указанные характеристики являются основой для вычисления значений времен восстановления работоспособности (исправности) СКК путем замены отказавшей КСЕ.

На рисунке 1 представлена схема получения значения времени одного восстановления работоспособности (исправности) СКК путем замены отказавшей k -ой КСЕ τ_{ik} (см. формулу (1)).

На рисунке 1 имеют место следующие обозначения:

- 1 – начало эксплуатации;
- 2 – обнаружение отказа во время проверки работоспособности (исправности) при дежурстве;
- 3 – определение отказавшей КСЕ системой диагностики;
- 4 – замена отказавшей КСЕ;
- 5 – отказ КСЕ подтвердился;
- 6 – отказ КСЕ не подтвердился.
- $p, p_1, p_2, p_3 \dots$ – вероятности правильного обнаружения отказавшей КСЕ системой диагностики с точностью до одной, двух, трех и т.д. КСЕ;
- $q, q_1, q_2, q_3 \dots$ – вероятности ошибочного обнаружения отказавшей КСЕ системой диагностики с точностью до одной, двух, трех и т.д. КСЕ;
- $T_{в0}$ – длительность восстановления работоспособности СКК путем замены отказавшей КСЕ согласно технологической карте.
- $T_{в1}, T_{в2}, T_{в3}, \dots$ – длительность работ по замене не отказавшей КСЕ согласно технологической карте.

Из схемы, представленной на рисунке 1, видно, что величина времени восстановления определится из следующего выражения:

$$\tau_{ik} = \sum_{r=0}^R p_r \left\{ \prod_{k=0}^{r-1} q_k \sum_{j=0}^r T_{вj} \right\} \quad (10)$$

где R – количество ошибочных выявлений отказавшей КСЕ, когда вероятность правильного выявления отказавшей КСЕ становится равной единице.

Формула (10) дает возможность вычислить время восстановления работоспособности СКК в случае отказа i -ой КСЕ с учетом функционирования системы диагностики.

Здесь следует обратить внимание на то, что если $T_{в0}$ привязана к определенной КСЕ с временем восстановления $T_{в0}$, то все последующие времена восстановлений не определены и поэтому не известно какие КСЕ будут ошибочно выявляться системой диагностики и какие значения подставлять в формулу (10). Для устранения этой неопределённости необходимо обратиться к методу имитационного моделирования, который позволяет определить времена восстановления при ошибках системы диагностики. В первом приближении можно положить, что вероятность ошибочного определения распределена равномерно для каждой не отказавшей КСЕ и отказать может только одна КСЕ. Моделирование

производится по следующему алгоритму:

1. Берется отрезок равный единице и делится на две части. Первая часть численно равна вероятности правильного определения отказавшей КСЕ с точностью до одной КСЕ (0,X), а вторая часть численно равна вероятности ошибочного определения отказавшей КСЕ (X,1). В ЭВМ генерируется случайное число от нуля до единицы. Если оно попадает в первый интервал, то считается, что система диагностики сработала правильно;

2. Если происходит попадание в другую часть отрезка, то считается, что система диагностики сработала ошибочно и тогда необходимо определить, какую КСЕ она определила в качестве отказавшей. Тогда опять берется отрезок равный единице и делится на число отрезков q-1 (число все КСЕ за вычетом реально отказавшей). На отрезок случайным образом бросается точка, и попадание ее в соответствующий часть отрезка определит ту КСЕ, которую система диагностики ошибочно выявила в качестве отказавшей. Дополнительное время восстановления будет равно времени восстановления работоспособности согласно технологической карте выявленной КСЕ;

3. Повторяется пункт 1, но при этом отрезок равный единице делится на отрезок, численно равный вероятности правильного выявления отказавшей КСЕ с точностью до двух единиц и т.д.

Таким образом, с помощью имитационного моделирования и формулы (10) определяется время восстановления работоспособности каждой КСЕ τ_{i_k} , которое подставляется в формулу (4). Затем после вычисления всех значений $T_{в_i}$ производится их подстановка в формулу (3) и вычисляется значение времени восстановления $T_{в}$, а затем – коэффициент готовности $K_{г}$.

Важным показателем надежности дежурства является точность определения значения показателя $K_{г}$. Таким показателем является среднее квадратическое отклонение (СКО) $\sigma_{K_{г}}$. Этот показатель определяется на основе следующей математической зависимости [2]:

$$\sigma_{K_{г}} = \sqrt{\sum_{i=1}^L \left(\frac{\partial H}{\partial x_i}\right)^2 \sigma_{x_i}^2} \quad (11)$$

Если подставить в правую часть формулы (11) выражение в правой части формулы (3), и продифференцировать полученное выражение по $T_{в}$, получим формулу для вычисления $\sigma_{K_{г}}$:

$$\sigma_{K_{г}} = \frac{\sigma_{T_{в}}}{T_{г}}, \quad (12)$$

На этапе проектирования эта задача может быть решена путем имитационного моделирования процесса эксплуатации с моделированием отказов КСЕ и восстановлений с применением формулы (10) и имитации функционирования системы диагностики. В этом случае СКО определится на основе следующей математической зависимости:

$$\sigma_{\tau_B} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\bar{\tau}_B - \tau_{B_i})^2}{N - 1}}, \quad (13)$$

где τ_{B_i} – реализация времени восстановления в цикле моделирования;

$$\bar{\tau}_B = \sum_{i=1}^L \tau_{B_i} / N. \quad (14)$$

В ходе экспериментальной отработки СКК по мере накопления статистической информации о восстановлениях работоспособности СКК, в формулы (13) и (14) подставляются экспериментальные значения времен восстановления.

Таким образом, математические зависимости (1)-(14) и примененные способы имитационного моделирования позволяют оценить готовность СКК на ранних этапах его создания – этапах проектирования и экспериментальной отработки. Исходными данными для расчетов являются характеристики надежности его элементов, проектные значения характеристик системы диагностики отказов и проектные значения времен восстановления работоспособности путем замены КСЕ.

Литература

1. Феллер В. Введение в теорию вероятностей и ее приложения. т. 1. М.: Мир, 1967.
2. Меньшиков В.А., Рудаков В.Б., Сычев В.Н. Контроль качества космических аппаратов при отработке и производстве. М. Машиностроение, 2009.
3. ГОСТ 27.003-2016. Надежность в технике. Состав и общие правила задания требований по надежности.
4. ГОСТ Р 27.14-2019 (МЭК 62347:2006). Надежность в технике. Управление надежностью. Руководство по заданию требований к надежности систем.
5. ГОСТ 27.301. Надежность в технике. Расчет надежности. Основные положения.

УДК 004.932

Оценка качества цифровой обработки изображений, полученных при аэрофотосъемке беспилотными летательными аппаратами

Д.С. Аршев, директор детского технопарка,
Государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования Московской области
«Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза,
летчика-космонавта А.А. Леонова», г. Королев, Московская область

Аэрофотосъемка и воздушная фотограмметрия с использованием беспилотных летательных аппаратов обеспечивают качество фотографий, не уступающее качеству, достигаемому при наземной фотосъемке, вместе с тем, использование беспилотных летательных аппаратов предоставляет более широкие возможности для формирования трехмерных изображений различных объектов, по сравнению с наземной фотосъемкой. Цифровая обработка видеoinформации, полученной при помощи фотокамеры, установленной на беспилотном летательном аппарате, требует проведения большого объема вычислений, поэтому актуальной задачей является оценка качества получаемого изображения для оптимизации алгоритмов обработки.

БПЛА, беспилотный летательный аппарат, бортовая система фото/видео фиксации, цифровая обработка изображений.

Quality assessment of digital processing of images obtained by aerial photography with unmanned aerial vehicles

D.S. Areshev, Director of children's technopark,
State Budgetary Educational Institution of Higher Education of the Moscow Region
«Technological University named after twice Hero of the Soviet Union,
pilot-cosmonaut A.A. Leonov», Korolev, Moscow region

Aerial photography and aerial photogrammetry with unmanned aerial vehicles provides photo quality not worse than the quality of ground photography, however unmanned aerial vehicles provides more potential for getting 3D images of various objects than ground photography. Digital processing of video information obtained with a camera mounted on an unmanned aerial vehicle requires a great amount of calculations therefore quality assessment of the resulting images is an actual task to optimize processing algorithms.

UAV, unmanned aerial vehicle, onboard photo/video fixing system, digital image processing.

Одним из современных трендов научно-технического прогресса является

внедрение автоматизированных машин и механизмов в промышленности, сфере услуг, медицине, образовании и других областях как гражданского, так и военного назначения. Важнейшей составляющей этого процесса является развитие программно-аппаратных средств обработки и интерпретирования видеоинформации, от совершенства которых во многом зависит эффективность применения автоматизированных технических систем.

Достигнутый в последние годы прогресс в промышленном производстве миниатюрных и, при этом, достаточно мощных и надежных электродвигателей, сервоприводов, повышение технических характеристик фотокамер с одновременным уменьшением их размеров, доступность технологий глобального позиционирования (GPS/ГЛОНАСС), взрывной рост технических возможностей оборудования для беспроводной передачи данных, открыли двери для широкого применения беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в гражданской сфере. Массовое производство ведет к снижению себестоимости, поэтому беспилотные летательные аппараты превратились из дорогих игрушек для энтузиастов в инструмент для повышения эффективности бизнеса. Одной из ниш, которая активно осваивается с применением БПЛА, является воздушная фотограмметрия – получение изображений объектов высокого качества на основе аэрофотосъемки, осуществляемой камерой, установленной на беспилотном летательном аппарате.

При выполнении задачи аэрофотосъемки беспилотный летательный аппарат движется по заданной траектории, а установленная на нем камера непрерывно фотографирует заданный объект, в результате формируется массив фотографий, из которого в ходе последующей обработки формируется трехмерное изображение объекта. Таким объектом может быть ортофотоплан участка местности, модель рельефа местности, или модель какого-либо сооружения и многое другое. Качество получаемых в результате фотосъемки изображений, зависит от технических параметров фотокамеры, установленной на беспилотном летательном аппарате, применяемых систем стабилизации камеры – поскольку летательный аппарат постоянно находится под воздействием нисходящих, восходящих или боковых воздушных потоков и атмосферных вихрей, он совершает разнонаправленные колебания в пространстве, не меньшее значение имеют технические характеристики самого БПЛА – дальность и продолжительность полета, грузоподъемность, возможность выполнения полета в полностью автономном режиме. Также необходимо правильно сформировать маршрут полета: выбрать высоту, скорость – исходя из возможностей объектива фотокамеры и условий освещенности объекта, смоделировать траекторию движения беспилотного летательного аппарата для получения снимков с заданной степенью продольного и поперечного перекрытия. О степени перекрытия стоит сказать отдельно. Перекрывающиеся области на последовательных снимках необходимы для фотографирования объекта с разных ракурсов и с разной степенью освещенности. Исходя из имеющегося опыта известно, что перекрытие менее 60 процентов недостаточно для формирования качественного изображения. Однако, следует отметить, что увеличение степени перекрытия вызывает удлинение маршрута полета. Перекрытие больше 80 процентов не целесообразно, т.к. дальнейшее увеличение объема данных является избыточным и не ведет к дополнительному улучшению получаемого

го изображения. Благодаря установленному на БПЛА GPS/ГЛОНАСС приемнику каждому фотоснимку присваивается навигационная отметка и при последующей обработке с помощью специального программного обеспечения фотоснимки взаимно ориентируются и совмещаются для получения трехмерного изображения заданного объекта.

Таким образом типовая задача состоит в том, что необходимо получить изображение некоего объекта заданного уровня качества при помощи компактной фотокамеры, установленной на беспилотном летательном аппарате, при этом длительность полета, стоимость БПЛА, фотокамеры и систем стабилизации являются ограничениями. Качество получаемых в итоге цифровых изображений становится результатом компромисса, обусловленного вышеперечисленными факторами. Имеющиеся на фотографиях артефакты, искажающие и/или тем или иным образом мешающие интерпретировать изображение, принято называть шумом. В настоящей статье мы не будем останавливаться на природе возникновения шумов на изображении, а посмотрим, каким образом мы можем оценить качество итогового изображения, выведя формулу для параметра, позволяющего получить численную оценку расхождения между цифровым негативом (далее будем называть исходным изображением) и итоговым изображением после цифровой обработки. Под итоговым изображением мы понимаем изображение, подготовленное для восприятия пользователем – человеком, либо, предназначенное для интерпретации системой управления летательным аппаратом для генерирования соответствующих управляющих воздействий.

Для решения какой бы задачи не использовался беспилотный летательный аппарат, критически важным фактором, от которого зависит эффективность применения БПЛА, является скорость фиксации, записи и передачи данных: будь это данные для оператора, дистанционно управляющего летательным аппаратом, или данные для распознавания бортовым компьютером БПЛА, осуществляющего полет в автономном режиме, или данные аэрофотосъемки. Скорость фиксации и обработки информации бортовыми системами беспилотного летательного аппарата зависят от объема необходимых для этого вычислений, объем вычислений, в свою очередь, зависит от объема исходных данных. Помимо вышеперечисленных соображений, необходимо иметь в виду, что вся важная информация должна поместиться на карте памяти, установленной на летательном аппарате. Поэтому под цифровой обработкой видеоинформации мы будем понимать всю совокупность операций по формированию цифрового изображения, включая сжатие и распаковку данных. Соответственно, необходимо оценить качество цифровой обработки изображений в бортовых системах беспилотных летательных аппаратов по завершении полного цикла, включающего сжатие и последующую распаковку видеоинформации.

В процессе цифровой обработки изображение представляется в виде конечного множества элементов, каждый из которых имеет свои координаты в плоскости x, y , этот процесс называется дискретизация. Каждому элементу необходимо присвоить уникальный признак, отличающий его от других элементов, таким признаком чаще всего является амплитудная характеристика, например, яркость. Для этого непрерывный диапазон яркостей также разбивается на конеч-

ное множество элементов, данная операция называется квантование. Очевидно, что на точность операции квантования влияет такой параметр, как шум, при этом влияние шума, в свою очередь, зависит от шага дискретизации (чем меньше шаг дискретизации, тем меньше отличия в степени яркости двух соседних точек).

Параметр, используемый для оценки качества программы, осуществляющей сжатие и распаковку видеoinформации (далее, для краткости будем называть ее кодек изображений), называется «Пиковое отношение сигнал/шум» – *PSNR – peak signal to noise ratio* (англ).

Выведем формулу для вычисления параметра *PSNR*. Для этого сначала выпишем формулу среднеквадратичной ошибки – *MSE – mean square error* (англ). Предположим, что исходное изображение $z(x, y)$ сначала сжато нашим кодеком в изображение $z_1(x, y)$, а затем, изображение $z_1(x, y)$ распаковано в изображение $z_2(x, y)$, где

$$0 \leq x \leq X - 1, \quad 0 \leq y \leq Y - 1.$$

Тогда мы можем обозначить $z_3(x, y)$ изображение, которое представляет собой разность исходного и распакованного изображений, и записать его в виде:

$$z_3(x, y) = z(x, y) - z_2(x, y).$$

Теперь мы можем выписать выражение среднеквадратичной ошибки: ее значение будет вычисляться по следующей формуле:

$$MSE = \frac{1}{XY} \sum_{x=0}^{x=X-1} \sum_{y=0}^{y=Y-1} (z(x, y) - z_2(x, y))^2. \quad (1)$$

Выразим *RMSE* как квадратный корень из среднеквадратичной ошибки, т.е. представим *RMSE* в виде:

$$RMSE = \sqrt{MSE}, \quad (2)$$

После совершения вышеприведенных выкладок, мы можем выписать формулу для вычисления *PSNR*:

$$PSNR = 20 \lg \frac{\max_{x,y} z(x,y)}{RMSE}. \quad (3)$$

Вычисляя параметр *PSNR* по формуле (3), мы получаем в результате безразмерную величину. Однако, исторически, параметру *PSNR* принято присваивать размерность децибелов (дБ).

Будет не лишним отметить, что введение в формулу (3) коэффициента 20 и выбор в качестве основания логарифма числа 10, обусловлены соображениями удобства вычислений и традицией.

Если мы рассматриваем бинарное изображение, то величина

$$\max_{x,y} z(x, y) \quad (4)$$

в формуле (3) будет равняться 1, а в случае если рассматривается полутоновое монохроматическое изображение, где каждый пиксель кодируется 8 битами, величина

$$\max_{x,y} z(x, y) = 255.$$

Из теории числовых неравенств Колмогорова следует, что справедливо неравенство:

$$\frac{\max_{x,y} z(x,y)}{RMSE} \geq 1,$$

Чем меньше распакованное изображение $z_2(x,y)$ отличается от исходного изображения $z(x,y)$, тем меньше значение параметра $RMSE$ в знаменателе формулы (3), соответственно выше значение параметра $PSNR$. Таким образом, мы получили формулу, позволяющую количественно оценить качество изображения после цифровой обработки: чем больше значение $PSNR$, тем теоретически ближе итоговое изображение $z_2(x,y)$ к исходному. Однако даже при высоких значениях $PSNR$ человеческий глаз может зафиксировать визуальные отличия между исходным и итоговым изображениями. Как правило, на практике, значение параметра $PSNR$ заключено в пределах от 20 дБ до 40 дБ.

Заменив в формуле (3) выражение (4) на следующее:

$$\sqrt{\frac{1}{XY} \sum_{x=0}^{X-1} \sum_{y=0}^{Y-1} z(x,y)^2} \quad (5)$$

мы получим формулу:

$$SNR = 20 \lg \frac{\sqrt{\frac{1}{XY} \sum_{x=0}^{X-1} \sum_{y=0}^{Y-1} z(x,y)^2}}{RMSE}, \quad (6)$$

где SNR – *signal to noise ratio* (англ) – «Отношение сигнал/шум».

Для оценки влияния квантования на качество сигнала введем показатель «Отношение сигнал/шум при квантовании» – $SQNR$ – *signal to quantization noise ratio* (англ), представляющий собой дискретный вариант параметра $PSNR$. Этот параметр вычисляется по формуле:

$$SQNR = 20 \lg \frac{\text{мощность сигнала}}{\text{ошибка квантования}}, \quad (7)$$

где знаменатель дроби равен модулю разности между исходным и квантованным сигналом.

Практическое применение беспилотных летательных аппаратов неразрывно связано с необходимостью фиксации, хранения, интерпретации и передачи больших массивов видеoinформации. Важнейшим параметром, определяющим эффективность применения БПЛА, является скорость фиксации и обработки видеoinформации. Реализация алгоритмов цифровой обработки видеoinформации требует значительного объема вычислений. Вместе с тем, усложнение алгоритмов и соответствующее увеличение объема необходимых вычислений, приводит к ощутимому улучшению качества итогового изображения лишь до определенного предела, по достижении которого, дальнейшее усложнение алгоритма обработки не дает сколько-нибудь значащего улучшения качества изображения, но ведет к увеличению времени, необходимого для обработки видеoinформации, а также увеличивает энергозатраты на такую обработку – не следует забывать, что источником энергии для всех систем БПЛА является аккумуляторная батарея и запасы энергии на борту не безграничны. Для того, чтобы исключить избыточные вычисления и оптимизировать алгоритм цифровой обработки видеoinформации

мации, оценка качества работы кодека изображений представляется важной и актуальной задачей. Полученные формулы для количественной оценки и сравнения качества кодеков позволяют определить необходимые требования к программному обеспечению для цифровой обработки видеoinформации, исходя из имеющихся параметров камеры и заданных нами параметров полета БПЛА или, наоборот, исходя из имеющихся характеристик программного обеспечения, выбрать платформу (летательный аппарат в комплексе с оптической системой) для эффективной реализации поставленной задачи.

Вышеприведенный математический аппарат позволяет проводить оценку качества получаемого цифрового изображения и может быть использован при реализации алгоритмов сжатия и распаковки изображений в бортовых системах фото и видео фиксации беспилотных летательных аппаратов.

Литература

1. Бухалёв В.А., Скрынников А.А., Болдинов В.А. Алгоритмическая помехозащита беспилотных летательных аппаратов. Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2018 г. 192 стр.
2. Вудс Р., Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений. Москва: Техносфера, 2012 г. 1104 стр.
3. Горбатенко С.А. Беспилотные летательные аппараты. Основы механики управляемого полёта. Москва: Вузовская книга, 2017 г. 140 стр.
4. Михайлов А.П., Чибуничев А.Г. Фотограмметрия. Учебник для вузов / Под общей редакцией А.Г. Чибуничева. Москва: МИИГАиК, 2016 г. 294 стр.
5. Каргашин П.Е. Основы цифровой картографии. Москва: Дашков и К., 2020 г. 107 стр.
6. Под ред. Вербы В.С., Татарского Б.Г. Комплексы с беспилотными летательными аппаратами. Принципы построения и особенности применения комплексов с БЛА. Москва: Радиотехника, 2017 г. 512 стр.
7. Удалова Н.В. Методы и алгоритмы обработки цифровых изображений в комплексных системах наблюдения летательных аппаратов. Москва: МАИ, 2014 г. 144 стр.
8. Арешев Д.С., Самаров Е.К. Анализ бортовых систем фото/видео фиксации в беспилотных летательных аппаратах // Королёв МО: Сборник материалов VII Международной научно-практической интернет-конференции «Инновационные технологии в современном образовании». 2019 г. стр. 25-29.

УДК 004.891

**Применение методов кластеризации и машинного обучения
для построения рекомендательной системы
для определения актуальности научных публикаций**

О.П. Мосалов, кандидат физико-математических наук, заведующий учебно-научной лабораторией интеллектуальных систем управления,
Государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования Московской области

«Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза,
летчика-космонавта А.А. Леонова», г. Королев, Московская область,

И.А. Иванов, бакалавр по специальности «Прикладная информатика»,
разработчик программного обеспечения,

Публичное акционерное общество «Сбербанк России», г. Москва,

М.А. Першин, бакалавр по специальности «Прикладная информатика»,
студент группы ИО-17,

Государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования Московской области

«Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза,
летчика-космонавта А.А. Леонова», г. Королев, Московская область

В статье представлено решение задачи построения рекомендательной системы для определения актуальности научных публикаций. Рассматривается алгоритм определения актуальностей, а также применяемые методы машинного обучения для обработки текстовой информации. Рассмотрено и обосновано применение векторных представлений слов и кластеризации.

Рекомендательная система, векторные представления слов, ключевые слова, кластеризация, определение актуальности.

**Application of clustering and machine learning for building
of a recommendation system for determining of scientific articles relevance**

O.P. Mosalov, Ph.D., head of the educational and scientific laboratory
of intellectual control systems,

State Budgetary Educational Institution of Higher Education of the Moscow Region
«Technological University named after twice Hero of the Soviet Union,
pilot-cosmonaut A.A. Leonov», Korolev, Moscow region,

I.A. Ivanov, bachelor in applied informatics, software developer,
Public Joint-Stock Company Sberbank of Russia, Moscow,

M.A. Pershin, bachelor in applied informatics, student of a group IO-17,
State Budgetary Educational Institution of Higher Education of the Moscow Region
«Technological University named after twice Hero of the Soviet Union,
pilot-cosmonaut A.A. Leonov», Korolev, Moscow region

In the article a solution of a task of developing a recommendation system for determining of scientific article relevance is presented. An algorithm for calculation of relevance and applied methods of machine learning for text data processing are considered. Usage of word embeddings and clustering are justified.

Recommendation system, word embeddings, key words, clustering, relevance determining.

Введение. Обработка текстовой информации с применением методов машинного обучения является одной из крупнейших областей в сфере искусственного интеллекта. На основе современных, постоянно совершенствующихся инструментов для решения подобного рода задач создаются различные решения. Одним из немаловажных направлений разработки таких решений является создание рекомендательных систем [6].

Одной из самых молодых и активно развивающихся областей разработок является использование рекомендательных систем в сфере образования [8], например, такие сервисы, как MathGarden [20]. Данные сервисы направлены на персонализированное обучение пользователей.

Важно отметить, что в данной области существует большая потребность в анализе текстовой информации для определения её качества и актуальности.

В данной статье рассматриваются методы машинного обучения, а также технологии, применяемые для построения рекомендательной системы, позволяющей оценивать актуальность текстов научных публикаций.

Основная цель разработки данной рекомендательной системы заключается в том, чтобы получить решение, которое способно не только дать экспертную оценку актуальности текущему состоянию текста публикации на основе его статистических характеристик, но и сформировать рекомендации по увеличению этого показателя. Другая цель – за счёт внедрения данной системы дать пользователям возможность сократить время на анализ и редактирование их статей.

Назначение разрабатываемой системы, основные термины и решения. Есть основания полагать, что на основе текста научной статьи можно определить ее актуальность, для этого необходимо проанализировать текст и выделить ключевые слова и фразы, векторизовать и изучить их расположение в векторном пространстве.

Главная задача разрабатываемой информационной системы заключается в том, чтобы, получив от пользователя публикацию, определить величину актуальности и дать рекомендации по изменению содержания статьи с целью повышения этого показателя.

Для работы основного алгоритма необходимо обработать и сформировать набор тем состоящий из ключевых слов, полученных из Yet Another Keyword Extractor [13]. Данная задача была решена с помощью кластеризации и векторных представлений библиотеки Navec [22].

Также необходимо пояснить, что для анализа расположения точек в векторном пространстве в нем заранее выделяются центры областей (классов), соот-

ветствующих общепринятым темам научных публикаций. Эти центры строятся с помощью рубрикации множества ключевых слов, вручную извлечённых из массива научных статей.

Основной алгоритм работы системы.

1. На вход поступает публикация с выделенными в ней ключевыми словами. Важно учитывать, что статьи должны включать разделы:

- Ключевые слова;
- Основной текст.

2. После загрузки статьи через интерфейс, происходит подготовка её текста к отправке в API Yet Another Keyword Extractor, развёрнутому в Docker Container-е. Данная процедура помогает нам определить предполагаемые ключевые слова, на основе текста статьи. На сервере данная обработка начинается с этапа фильтрации текста за счёт использования инструмента языка Java для программной обработки документов Microsoft, носящего название Apache POI [11]. Также, если на вход поступает публикация в формате файла PDF, будет использоваться такой инструмент, как IText [17], позволяющий получить текст публикации из файла формата PDF. После выгрузки текста из файла, он проходит несколько этапов обработки:

a. Замена всех переносов параграфов в тексте на «.» для лучшего распознавания текста Yet Another Keyword Extractor-ом;

b. Удаление англоязычных блоков текста;

c. Составление из найденных частей готового к анализу текста научной публикации, который будет содержать только необходимые нам блоки текста, загруженной научной публикации, что в свою очередь позволит нам, используя Yet Another Keyword Extractor, более точно определить ключевые слова анализируемой публикации.

3. На основании ключевых слов определяется принадлежность публикации к классам.

4. Сохраняется выборка значений актуальности по классам.

5. Формируются рекомендации на основании полученных значений актуальности.

Цифровые представления слов. Для получения цифровых представлений использовался упомянутый выше инструмент Navec. Данный инструмент применяется в отдельном модуле системы, направленном на проведение в нём всех математических расчётов. Для построения этого модуля применялись следующие инструменты:

1. Navec;
2. Keras [14];
3. NumPy [23];
4. PyPlot [16];
5. Sklearn [24];
6. Pymorphy2 [18].

Navec. Библиотека Navec – часть проекта Natasha [21], коллекция предобученных векторных представлений слов для русского языка. В процессе анализа было выяснено, что около 80-90% веса модели занимает таблица векторных

представлений. Небольшой размер – это преимущественное отличие Navес от других библиотек. Работа с компактными моделями очень удобно, так как размер модели векторных представлений небольшой, соответственно потребление объема памяти значительно снижается, в то время как скорость работы повышается, чем выгодно отличает Navес.

Для наглядности векторные представления Navес сравнены с другими аналогами (RusVectores) [19].

Таблица 1 – Сравнение характеристик векторных представлений

	Качество	Размер модели, МБ	Размер словаря, x103
Navес	0,719	50,6	500
RusVectores	0,638-0,726	220,6-290,7	189-249

Из таблицы 1 очевидно, что размер архива Navес в 5-6 раз меньше, чем у RusVectores, в то время как размер словаря больше в 2-3 раза (500 тысяч слов).

Для оценки качества векторных представлений слов была рассмотрена семантическая близость на шести датасетах (SimLex965, LRWC, HJ, RT, AE, AE2). Модель, использующая векторные представления Navес, показала наилучшие результаты сред рассмотренных вариантов.

Для разрабатываемого сервиса был выбран архив hudlit_12B_500K_300d_100q, обученный на 145 ГБ художественной литературе. Данный архив позволяет формировать векторные представления слов длиной 300.

Разработанные модули системы. Разрабатываемая система имеет следующую структуру компонентов (Рисунок 1):

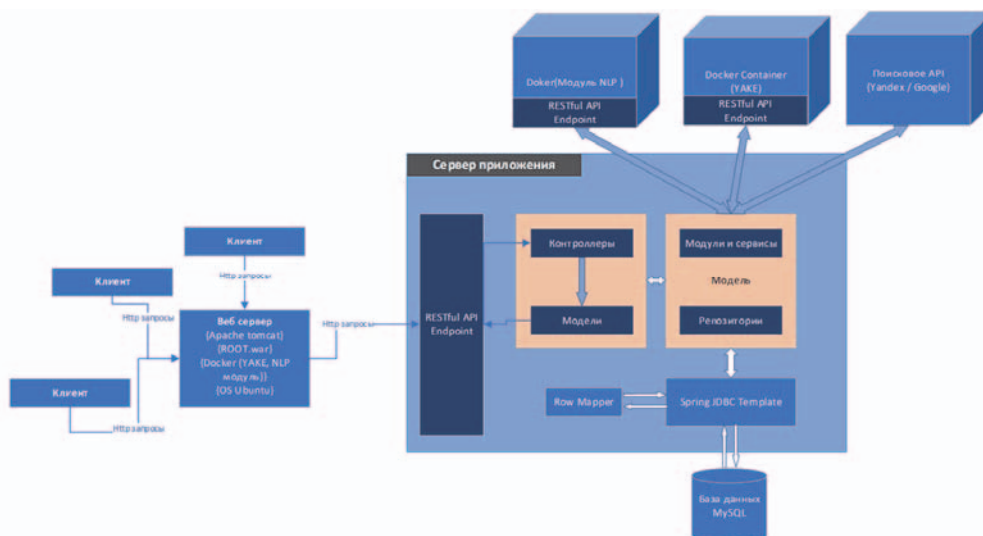


Рисунок 1 – Диаграмма развёртывания

1. Ядро системы – содержит основные алгоритмы и базу данных MySQL.
2. Yet Another Keyword Extractor – используется для анализа текста статьи и выделения из неё ключевых словосочетаний и слов.
3. Модуль NLP – содержит нейросетевой фильтр [2, 3, 15] для фильтрации не пригодных для дальнейшей обработки ключевых слов полученных из Yet Another Keyword Extractor, а также функционал для различных операций над цифровым представлением текстовой информации таких как:
 - a. Вычисления расстояний между кластерами и ключевыми словами
 - b. Формирование векторных представлений слов.

Подробное описание устройства и вычислительных экспериментов с модулем NLP приведены в работе [5].

Алгоритмы кластеризации. Для задачи рубрикации ключевых слов были выбраны и реализованы алгоритмы жесткой кластеризации k-means и нечеткой fuzzy c-means [1, 4, 9, 10]. При выполнении кластеризации были использованы методы оценки качества кластеризации: метод силуэта и инерции [7].

В качестве множества объектов для кластеризации были использованы векторные представления около тысячи ключевых слов, извлечённых из около трёхсот научных статей.

Для определения того, что называется величиной актуальности – вводится понятие «классы». «Классы» формируются на основе, полученных при кластеризации кластерах. Это набор отдельных тем, к которым с некоторой степенью принадлежности A – можно отнести ключевые слова, извлечённые из Yet Another Keyword Extractor. Данный набор классов необходимо представлять отдельными точками в многомерном пространстве для обеспечения возможности вычисления степени принадлежности классов к ключевым словам.

Алгоритм k-means. Один из самых надёжных и наиболее часто используемых алгоритмов кластеризации – это k-means. Этот алгоритм часто применяется как базовый вариант для сравнения и оценки эффективности работы других, более сложных алгоритмов.

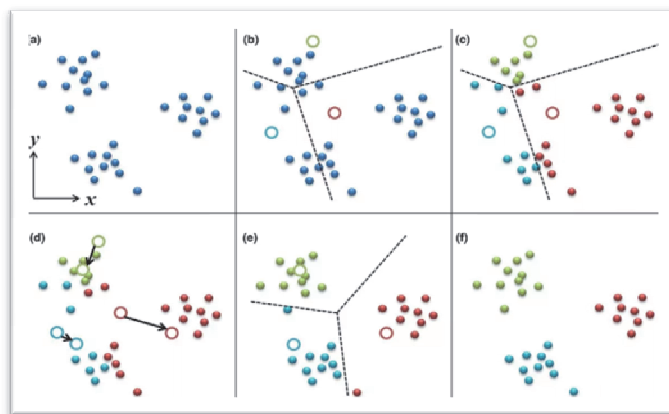


Рисунок 2 – Общий алгоритм работы k-means

В начале случайным образом в пространстве кластеризуемых объектов выбирается k точек, которые являются начальным приближением к центрам будущих кластеров и называются центроидами. Далее для каждого объекта определяется ближайший к нему центроид и, таким образом, формируется первая версия кластеров. Затем для получившихся кластеров с использованием выбранной меры близости вычисляются новые центроиды. Далее эти два шага – распределение объектов по кластерам и обновление центроидов – повторяются до тех пор, пока изменение центроидов не станет пренебрежимо малым. Также возможны и другие критерии остановки алгоритма, например – заранее заданное количество итераций обновления центроидов и т.п. Визуально этот процесс показан на рисунке 2.

В алгоритме k-means можно использовать широкий спектр мер близости при вычислении ближайшего центроида. В данной работе была выбрана самая популярная мера близости – евклидово расстояние.

Для определения количества кластеров были применены методы оценки качества кластеризации. На рисунке 3 представлен график коэффициента силуэта для кластеризации данным методом.

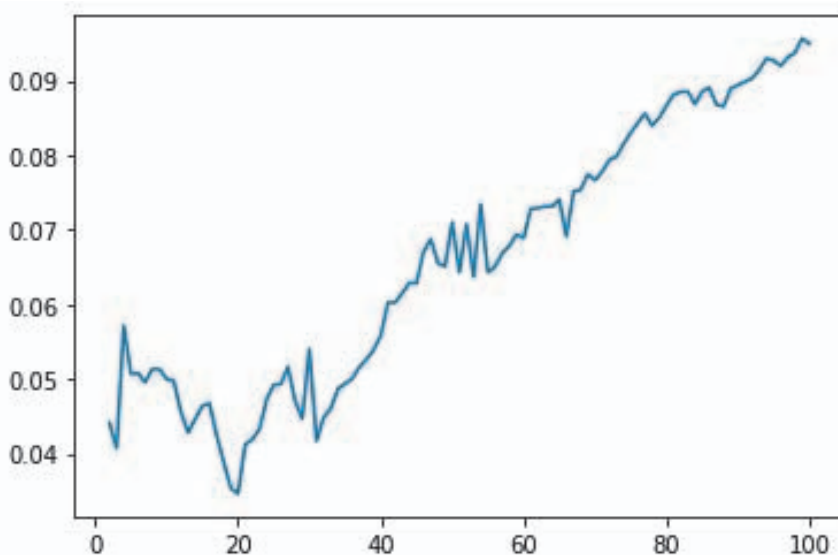


Рисунок 3 – Коэффициент силуэта для k-means в зависимости от количества кластеров

Также были рассчитаны значения коэффициента инерции, график которого представлен на рисунке 4.

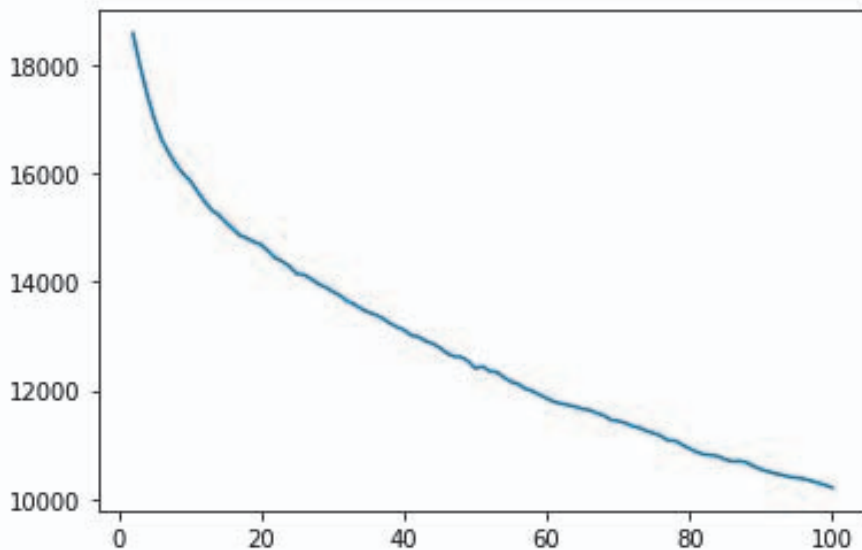


Рисунок 4 – Коэффициент инерции для k-means в зависимости от количества кластеров

После анализа полученных графиков оценки кластеризации было определено количество кластеров – 13, и были кластеризованы векторные представления ключевых слов. Результаты кластеризации методом k-means представлены на рисунке 5.

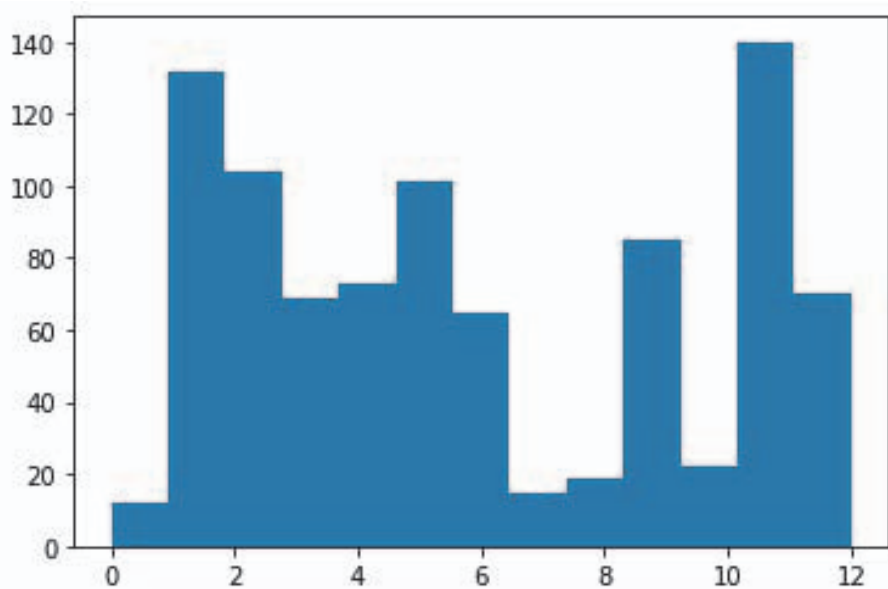


Рисунок 5 – Результаты кластеризации: количество ключевых слов, попавших в каждый кластер

Метод нечеткого fuzzy c-means. Одной из главных проблем предыдущего алгоритма кластеризации (k-means), является его жесткость, что снижает эффективность рубрикации. K-means относит ключевую фразу лишь к одному кластеру, что не всегда интуитивно корректно, поэтому было принято решение использовать алгоритм нечеткой кластеризации fuzzy c-means.

Не всегда возможно однозначно распределить точки по кластерам, особенно в сложных наборах данных, где, в соответствии с предметной областью, кластеры перекрываются. Для эффективного выполнения кластеризации в таких случаях вместо отнесения точек к кластерам говорят о наборе вероятностей вхождения каждой точки в каждый кластер.

Алгоритм fuzzy c-means требует больше системных ресурсов, однако, особенности нечеткой кластеризации, дают более правильные и легче интерпретируемые результаты кластеризации.

Так же, как и для алгоритма k-means, была проведена оценка количества кластеров методом силуэта. Результаты представлены на рисунке 6.

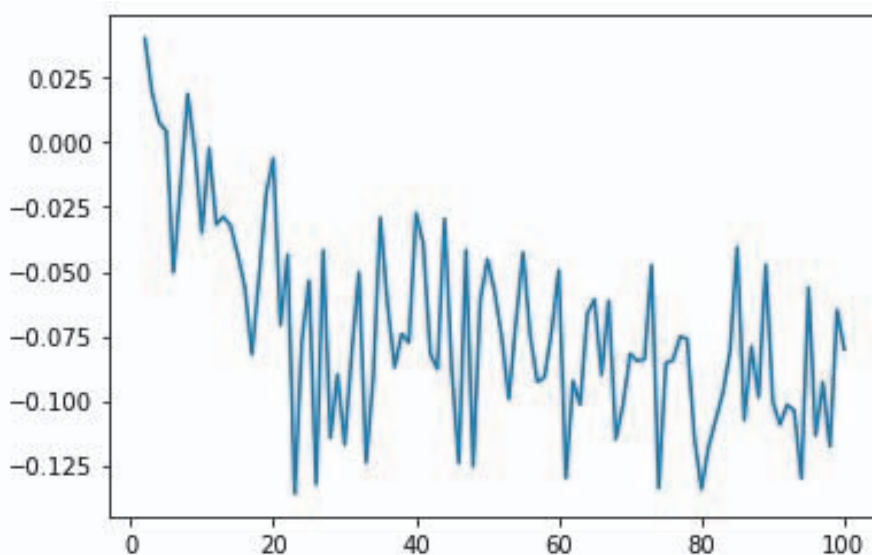


Рисунок 6 – Коэффициент силуэта для fuzzy c-means в зависимости от количества кластеров

Видно, что коэффициент силуэта не применим как критерий выбора количества кластеров в случае нечёткой кластеризации, поэтому дополнительно были использованы коэффициенты разделения и энтропии разделения [12], результаты представлены на рисунках 7 и 8.

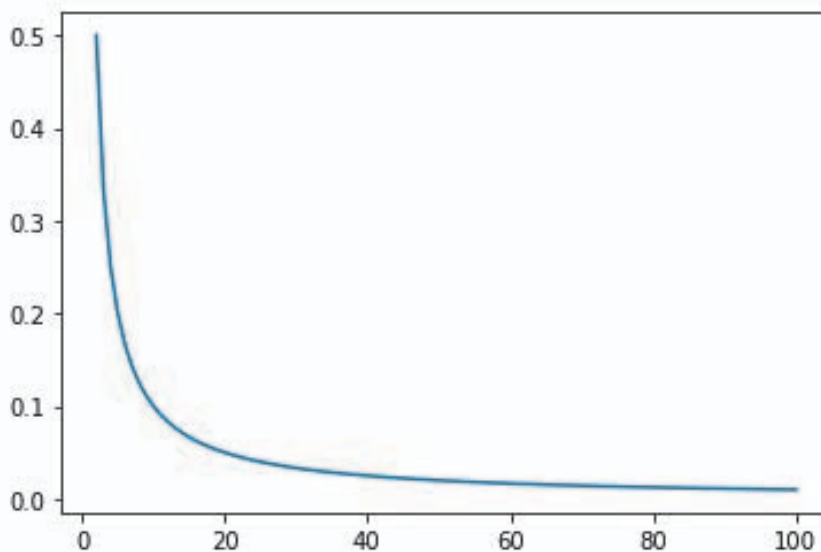


Рисунок 7 – Коэффициент разделения в зависимости от количества кластеров

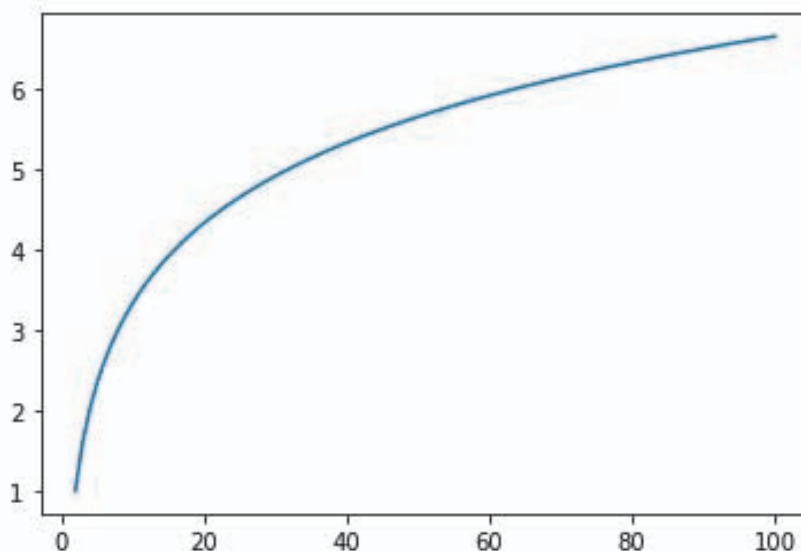


Рисунок 8 – Коэффициент энтропии разделения в зависимости от количества кластеров

Результаты нечеткой кластеризации не имеет смысла интерпретировать в виде диаграммы, аналогичной рисунку 5, так как каждый объект относится ко всем кластерам с некоторой вероятностью.

После анализа полученных данных, в качестве количества кластеров для алгоритма fuzzy c-means было выбрано значение 20.

Таким образом, была построена рубрикация ключевых слов и, как след-

стве некоторая разметка пространства векторных представлений для дальнейшего использования при вычислении актуальностей.

Алгоритм вычисления актуальности ключевого слова или фразы. На вход алгоритма подаётся набор классов C_i , где $i = 1, \dots, N$, для каждого из которых путём запроса в поисковой API определена актуальность A_i , а также собственно список ключевых слов w_i , где $i = 1, \dots, K$, для которых необходимо определить значения актуальности.

Отметим, что значения актуальности классов A_i никак не ограничены, однако в процессе вычисления актуальностей ключевых слов производится приведение этих значений к отрезку $[0,1]$.

Для определения актуальности набора ключевых слов w_i , где $i = 1, \dots, K$, применяется следующий алгоритм:

1. Актуальности классов A_i нормируются, с использованием функции softmax:

$$\hat{A}_i = \frac{e^{A_i}}{\sum_j e^{A_j}} \quad (1)$$

2. Для каждого ключевого слова w_i вычисляются расстояния от него до каждого из классов:

$$d_{ij} = \rho(w_i, C_j) \quad (2)$$

3. Нормируются расстояния для каждого ключевого слова w_i :

$$\hat{d}_{ij} = \frac{e^{d_{ij}}}{\sum_k e^{d_{ik}}} \quad (3)$$

4. Актуальность ключевого слова w_i вычисляется следующим образом:

$$a_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \hat{A}_j (1 - \hat{d}_{ij}) \quad (4)$$

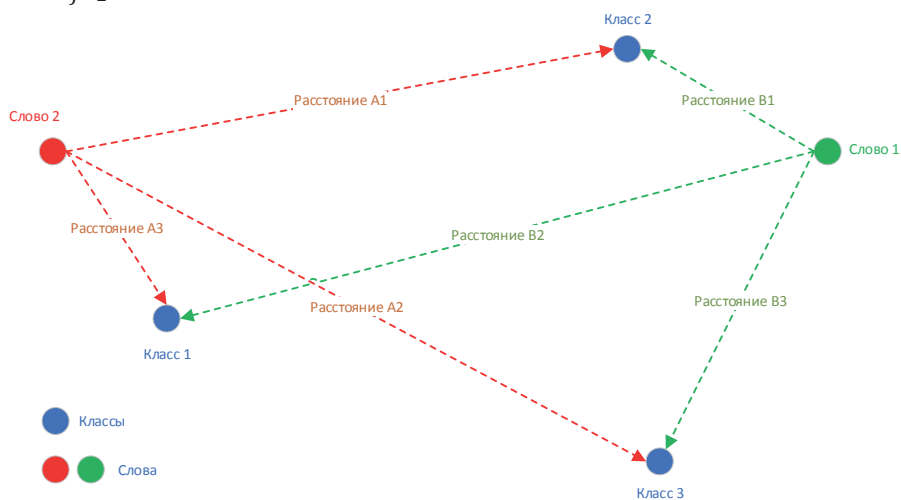


Рисунок 9 – Визуализация степеней отношения отдельных слов к классам

Итого, значения нормированных актуальностей классов принадлежат отрезку $[0,1]$, значения нормированных расстояний до классов для каждого ключевого слова – аналогично.

Так как суммы нормированных значений равны 1, их можно трактовать как вероятности.

Актуальности ключевых слов также принадлежат отрезку $[0,1]$, они больше, если больше актуальности классов, расстояние до которых меньше.

При этом классы и ключевые слова являются объектами одного и того же пространства (300-мерных векторных представлений). На рисунке 9 показан пример взаимного расположения классов и ключевых слов.

Алгоритм вычисления актуальности статьи. Для определения общей величины актуальности всей статьи используется ранее полученная информация об актуальности ключевых слов, извлечённых из текста статьи.

Вычисление общей актуальности статьи осуществляется по следующей формуле:

$$a = \sum_{i=1}^{\|\{w\}\|} a_i \quad (5)$$

где $\{w\}$ – множество всех ключевых слов, а a_i – актуальность ключевого слова w_i , определённая по формуле (4).

Таким образом, общая актуальность текста статьи считается суммой актуальностей отдельных ключевых слов.

Эксперименты с трендами классов. В ходе проведённых экспериментов отслеживания трендов актуальностей, установлено, что в зависимости от текущего значения величины актуальности на текущий момент времени меняется величина актуальности текста статьи после анализа.

Данная зависимость видна на рисунках (рис. 10-12). Где на рисунке (рис. 10) приведён график изменения актуальностей, а на рисунках (рис. 11 и 12) – можно увидеть рост итогового процента актуальности у одной и той же статьи.

Был рассмотрен временной промежуток с 03.05.2021 по 04.05.2021.

На графике видно, что в данный период наблюдался рост актуальности у класса «Планирование».



Рисунок 10 – График изменения трендов актуальности



Актуальность: 17.637%		
	Публикация	[Диплом.docx] - Дата загрузки: 09-05-2021 Пользователь: Иванов Илья Александрович
	Сертификат	[226_MGOTU_CERT.pdf] - Дата выдачи: 09-05-2021 Пользователь: Иванов Илья Александрович

Рисунок 11 – Актуальность публикации 17,6%



Актуальность: 25.149%		
	Публикация	[Диплом.docx] - Дата загрузки: 09-05-2021 Пользователь: Иванов Илья Александрович
	Сертификат	[123_MGOTU_CERT.pdf] - Дата выдачи: 09-05-2021 Пользователь: Иванов Илья Александрович

Рисунок 12 – Актуальность публикации 25,1%

Выводы. Информационная система, описанная в рамках данной работы, относится к классу рекомендательных систем и является готовым инструментом для статистического анализа текста публикаций, определения актуальности текста и формирования рекомендаций для повышения актуальности. Данные рекомендации способны помочь пользователям на их основе принимать необходимые решения по редактированию содержания их публикаций.

При проектировании и разработки системы применён широкий спектр методов машинного обучения, а также более классические математические методы.

Полученные результаты будут применены как при доработке описанной системы, так и при реализации других систем, использующих аналогичные логические блоки, а также представляют академический интерес.

В дальнейшем планируется провести анализ трендов актуальностей классов для предсказания актуальностей на долгосрочный период и использование этих предсказаний для прогноза значения цитируемости статей. Также планируется применять получаемую от пользователей обратную связь для дальнейшей оптимизации отдельных блоков и системы в целом.

Литература

1. Воронцов К.В. Алгоритмы кластеризации и многомерного шкалирования. Курс лекций // МГУ. 2007.
2. Воронцов К.В. Машинное обучение (курс лекций), «Линейный классификатор и стохастический градиент» [Электронный ресурс]. Режим доступа: [www.machinelearning.ru/wiki/index.php?title=Машинное_обучение_\(курс_лекций%2C_К.В.Воронцов\)](http://www.machinelearning.ru/wiki/index.php?title=Машинное_обучение_(курс_лекций%2C_К.В.Воронцов)) (дата обращения: 03.11.2020).
3. Дударов С.П. История возникновения нейронных сетей [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://neuronus.com/history/5-istoriya-nejronnykh-setej.html> (дата обращения: 23.03.2021).
4. Заде Л.А. Кластеризация и кластер // Л.А. Заде, С. Рао и др. Москва: Мир. 1980. 383 с.
5. Мосалов О.П., Иванов И.А. Использование автокодировщика для фильтрации

- в задаче извлечения ключевых слов из текста // XXIII Международная научно-техническая конференция «Нейроинформатика-2021». М.: МИФИ. 2021 (в печати).
6. Рекомендательные системы: как помочь пользователю найти то, что ему нужно? [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://vc.ru/marketing/152926-rekomendatelnye-sistemy-kak-pomoch-polzovatelyu-nayti-to-chto-emu-nuzhno> (дата обращения: 21.11.2020).
 7. Руссеу П.Дж. Силуэты: графическое средство для интерпретации и проверки кластерного анализа // Вычислительная и прикладная математика. 20. 1987. С. 53-65.
 8. Статистика российского образования [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://stat.edu.ru/stat/vis.shtml> (дата обращения: 12.06.2020).
 9. Часовских А. Обзор алгоритмов кластеризации данных [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://habr.com/ru/post/101338/> (дата обращения: 20.04.21).
 10. Чубукова И.А. Курс лекций «Data Mining Методы кластерного анализа // Интернет-университет информационных технологий [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.intuit.ru/studies/courses/6/6/lecture/182?page=2/> (дата обращения: 05.05.21).
 11. Apache Software Foundation, Apache POI - the Java API for Microsoft Documents [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://poi.apache.org> (дата обращения: 09.07.2020).
 12. Askerova B.G. Optimum entropy clustering in information systems // International research and practice journal «Software & Systems». № 4. 2017. pp. 643-646.
 13. Campos R., Mangaravite V., Pasquali A., Jatowt A., Jorge A., Nunes C., Jatowt A. YAKE! Keyword Extraction from Single Documents using Multiple Local Features // In Information Sciences Journal. Elsevier. Vol. 509. 2020. pp. 257-289.
 14. Deep learning for humans. Keras [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://keras.io/> (дата обращения: 14.01.2021).
 15. GoProg.ru Нейронные сети: правило Хебба [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://gorprog.ru/posts/nn-hebb> (дата обращения: 09.10.2020).
 16. Hunter J. D. Matplotlib: A 2D Graphics Environment // Computing in Science & Engineering. Vol. 9. No. 3. 2007. pp. 90-95.
 17. IText, iText 7 core [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://itextpdf.com/ru/products/itext-7/itext-7-core> (дата обращения: 21.07.2020).
 18. Korobov M. Morphological Analyzer and Generator for Russian and Ukrainian Languages // Analysis of Images. Social Networks and Texts. 2015. pp. 320-332.
 19. Kutuzov A., Kuzmenko E. WebVectors: A Toolkit for Building Web Interfaces for Vector Semantic Models // In: Ignatov D. et al. (eds) Analysis of Images. Social Networks and Texts. AIST 2016. Communications in Computer and Information Science. Vol. 661, 2017.
 20. MathGarden [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://play.google.com/store/apps/details?id=com.nummolt.kinder.garden.math_serialized&hl=en_US&gl=US (дата обращения: 20.12.2020).
 21. Natasha, Tools for Russian NLP: segmentation, embeddings, morphology, lemmatization, syntax, NER, fact extraction [Электронный ресурс]. Режим

- доступа: <https://github.com/natasha/natasha> (дата обращения: 27.11.2021).
22. Navec, Compact high quality word embeddings for Russian language [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://habr.com/ru/post/516098/#navec> (дата обращения: 17.01.2021).
23. NumPy, The fundamental package for scientific computing with Python [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://numpy.org/> (дата обращения: 19.01.2021).
24. Pedregosa F., Varoquaux G., Gramfort A., Michel V., Thirion B., Grisel O., Blondel M., Prettenhofer P., Weiss R., Dubourg V., Vanderplas J., Passos A., Cournapeau D., Brucher M., Perrot M., Duchesnay E. Scikit-learn: Machine Learning in Python // JMLR 12. 2011. pp. 2825-2830.

УДК 681.5.08

Методика построения статической регрессионной многофакторной модели по данным эксперимента с факторным планированием волоконно-оптического гироскопа

В.С. Скворцов, инженер,
АО «НПО ИТ», г. Королев, Московская область,
студент магистратуры,
Государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования Московской области
«Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза,
летчика-космонавта А.А. Леонова», г. Королев, Московская область,
О.И. Лазаренко, инженер 2 категории,
АО «НПО ИТ», г. Королев, Московская область

В статье обосновывается использование полного факторного эксперимента, как основного для исследования волоконно-оптического гироскопа. Показаны этапы построения регрессионных многофакторных моделей, полученных на основе результатов активного эксперимента. Также на основе модели волоконно-оптического гироскопа, построенной в вычислительно среде Matlab/Simulink, проведен анализ выбора основных характеристик, которые могут выступать как факторы необходимые для проведения полного факторного эксперимента и получения адекватной математической модели.

Статическая регрессионная многофакторная модель, волоконно-оптический гироскоп, планирование эксперимента.

Methodology for constructing a static regression multifactor model from experimental data with factor scheduling of a fiber optic gyroscope

V.S. Skvortsov, engineer SC «SP AME»,
master's degree student,
State Budgetary Educational Institution of Higher Education of the Moscow Region
«Technological University named after twice Hero of the Soviet Union,
pilot-cosmonaut A.A. Leonov», Korolev, Moscow region,
O.I. Lazarenko, engineer of the 2nd category,
SC «SP AME», Korolev, Moscow region

The article substantiates the use of a full factorial experiment as the main one for the study of fiber-optic gyroscopes. The stages of constructing regression multifactor models obtained based on an active experiment are shown. Also, based on the fiber-optic gyroscope model built in the Matlab/Simulink computing environment, the analysis of the selection of the main characteristics that can act as factors necessary

for conducting a complete factor experiment and obtaining an adequate mathematical model is carried out.

Static regression multivariate model, fiber-optic gyroscope, experiment planning.

Введение

Работоспособность современных космических аппаратов основана на передовых навигационных системах. Для точного определения положения в пространстве используется целый ряд датчиков, позволяющих прокладывать траектории движения. Полноценную независимую навигационную систему для космоса можно построить только на основе инерциальных датчиков. Самым передовым из таких датчиков является волоконно-оптический гироскоп (ВОГ).

В ходе разработки новых видов ВОГ и их экспериментальной отработки при запуске в серию одним из ключевых вопросов является создание математических моделей прибора, в которой содержится алгоритмическое описание взаимного влияния входных параметров друг на друга на выходной сигнал прибора. Наличие такой модели обеспечивает условия для более быстрого инженерного конструирования ВОГ и позволяет проводить глубокий анализ протекающих процессов при работе прибора.

1. Выбор математической модели для волоконно-оптического гироскопа

В настоящее время широко используются математические методы планирования экспериментов. Самыми точными из которых являются активные эксперименты. Для построения матрицы планирования необходимо выбрать порядок проведения активного эксперимента, порой эмпирически определяя направление изготовления лабораторных установок и количество факторов, учитывая, что в случае неверного выбора существует возможность возврата на исходные позиции и признания эксперимента неудачным. Итогом же проведения эксперимента по полученной матрице планирования должна стать адекватная модель объекта, представленная в виде математических зависимостей.

При анализе устройства ВОГ, для вычленения необходимых для исследований факторов, необходимо начать с эффекта Саньяка. Существует множество подходов физического объяснения этого эффекта. Если исходить из описания классической физики, то можно описать так: по замкнутому оптическому пути, благодаря расщепителю луча свет распространяется в двух противоположных направлениях. Если при этом система находится в покое относительно инерциального пространства, оба световых луча распространяются встречно по оптическому пути одинаковой длины. Поэтому при сложении лучей в расщепителе по завершении пути нет фазового сдвига. Однако, когда оптическая система вращается в инерциальном пространстве с угловой скоростью Ω , между световыми волнами возникает разность фаз. Это явление и называется эффектом Саньяка [5].

Основным уравнением теории волоконно-оптического гироскопа является определение разности фаз:

$$\Delta\varphi_c = \frac{8 \cdot \pi \cdot S}{\lambda \cdot c} \cdot \Omega, \quad (1)$$

где S – площадь, окаймленная оптическим путем;

λ – длина световой волны;

c – скорость света в вакууме;

Ω – угловая скорость вращения системы, в которой распространяется луч света.

Для реализации ВОГ без обратной связи выходной сигнал $U_{\text{вог}}$ измерительного тракта прибора будет пропорционален синусу измеряемой угловой скорости Ω :

$$U_{\text{вог}} = K_{\text{эб}} \cdot J_1(M) \cdot \sin(T_{\text{вог}} \cdot \Omega) \quad (2)$$

$$T_{\text{вог}} = \frac{8\pi \cdot S}{\lambda \cdot c} \quad (3)$$

где $K_{\text{эб}}$ – коэффициент передачи электронного блока ВОГ;

J_1 – функция Бесселя первого порядка;

M – индекс модуляции.

Для обеспечения однозначности значений выходного сигнала ВОГ в рабочем диапазоне угловой скорости необходимо обеспечить следующее соотношение:

$$T_{\text{вог}} \cdot \Omega_{\text{max}} < \frac{\pi}{2} \quad (4)$$

Для формирования требования к длине оптического волокна в оптическом контуре ВОГ в выражение (4) подставим формулу (3) и раскроем выражение для ВОГ эллиптической формы:

$$\frac{8 \cdot \pi \cdot L \cdot a \cdot b}{C \cdot \lambda \cdot \sqrt{2 \cdot (a^2 + b^2)}} \cdot \Omega_{\text{max}} < \frac{\pi}{2} \quad (5)$$

где L – длина волоконного контура ВОГ;

a, b – полуоси эллипса катушки ВОГ.

После преобразования выражения (5) формула для расчета длины волоконного контура ВОГ L примет вид:

$$L < \frac{C \cdot \lambda \cdot \sqrt{2(a^2 + b^2)}}{16 \cdot a \cdot b \cdot \Omega_{\text{max}}} \quad (6)$$

При следующих значениях параметров: $C=3 \cdot 10^8$ м/с; $\lambda=0,82 \cdot 10^{-6}$ м, $a=0,36$ м; $b=0,24$ м; $\Omega_{\text{max}}=6,1$ рад/с длина волоконного контура не должна превышать $L_{\text{max}}=165$ м. При данном значении длины волокна величина параметра $T_{\text{вог}}$ составит $T_{\text{вог}}=0,238$ с.

Для обеспечения максимальной величины информационного сигнала и минимальной чувствительности масштабного коэффициента ВОГ к изменению индекса модуляции необходимо реализовать его значение $M=1,84$. Как следует из выражения (7) для вычисления индекса модуляции M применяется следующее соотношение:

$$P_{\Sigma} = 0,5 \cdot P \cdot (1 + \cos(\Delta\varphi_c + M \cdot \cos(2\pi f_m t))) \quad (7)$$

$$M = 2 \cdot \varphi_{m0} \cdot \cos(\pi f_m \tau) \quad (8)$$

$$t = (n \cdot L) / C \quad (9)$$

где φ_{m0} , f_m – амплитуда и частота фазовой модуляции;

τ – время прохождения лучом света волоконного контура длиной L с коэффициентом преломления n ;

n – коэффициент преломления оптического волокна/

При следующих значениях параметров из выражения (3.2.4) $C=3 \cdot 10^8$ м/с; $n=1,45$, $f_m = 75$ кГц; $L=165$ м; $M=1,84$ значение амплитуды фазовой модуляции составит $\varphi_{m0} = 0,936$ рад.

В ВОГ используется пьезокерамический фазовый модулятор. Амплитуда фазы модулирующего сигнала рассчитывается по следующему соотношению:

$$j_{m0} = (2\pi \cdot n \cdot N_{\text{мод}} \cdot V_{m0} \cdot d_{33}) / l \quad (10)$$

где $N_{\text{мод}}$ – число витков на модуляторе;

V_{m0} – амплитуда электрического напряжения на модуляторе;

d_{33} – пьезоэлектрический коэффициент.

Формула (10) позволяет оценить необходимую величину амплитуды напряжения для создания модулирующего сигнала с необходимой амплитудой по фазе:

$$V_{m0} = (j_{m0} \cdot l) / (2\pi \cdot n \cdot N_{\text{мод}} \cdot d_{33}) \quad (11)$$

При следующих значениях параметров из выражения (3.2.6) $\varphi_{m0}=0,936$ рад; $n=1,45$, $f_m = 75$ кГц; $N_{\text{мод}} = 20$ витков; $d_{33}=300 \cdot 10^{-10}$ кл/Н значение амплитуды напряжения составляет 0,282 В. Выполним оценку возможной величины масштабного коэффициента ВОГ:

$$K_{\text{ВОГ}} = \frac{U_{\text{ВОГ}}}{\Omega_{\text{ИЗМ}}} \quad (12)$$

где $U_{\text{ВОГ}}$ – выходной сигнал волоконно-оптического гироскопа;

$\Omega_{\text{ИЗМ}}$ – измеряемая ВОГ угловая скорость;

$K_{\text{ВОГ}}$ – масштабный коэффициент ВОГ.

В соответствии с выражением (3.2.1) расчетное соотношение для масштабного коэффициента ВОГ имеет вид:

$$K_{\text{вог}} = K_{\text{эб}} \cdot J_1(M) \cdot T_{\text{вог}} \quad (13)$$

Принимая во внимание блок–схему электронного блока ВОГ (см. рис. 3.3), можно развернуть формулу для расчета коэффициента преобразования электронного блока ВОГ $K_{\text{эб}}$:

$$K_{\text{эб}} = P_{\text{фд}} \cdot C_{\text{фд}} \cdot K_{\text{фy}} \cdot K_{\text{ny}} \cdot K_{\text{cd}} \cdot K_{\text{фнч}} \quad (14)$$

где $P_{\text{фд}}$ – оптическая мощность луча, регистрируемая фотодиодом;

$C_{\text{фд}}$ – коэффициент преобразования фотодиода;

$K_{\text{фy}}$, K_{ny} , K_{cd} , $K_{\text{фнч}}$ – коэффициенты усиления фотоусилителя, предвари-

тельного усилителя по переменному току, синхронного детектора и фильтра низких частот.

Значения параметров $C_{фд}$, $K_{ф\omega}$, $K_{пу}$, $K_{сд}$ из выражения (14) выбираются исходя из применяемого фотодиода, обеспечения необходимых частотных характеристик, опыта реализации электронного блока гироскопа и применяемого режима второй модуляции. Следовательно, используя совместно формулы (13), (14), позволит определить требование к параметру $K_{фнч}$:

$$K_{фнч} < \frac{U_{вог}^{max}}{2 \cdot \Omega_{изм}^{max} \cdot P_{фд} \cdot C_{фд} \cdot K_{ф\omega} \cdot K_{пу} \cdot K_{сд} \cdot J_1(M) \cdot T_{вог}} \quad (15)$$

где $\Omega_{изм}^{max}$ – максимально допустимая измеряемая угловая скорость;

$U_{вог}^{max}$ – максимально допустимое значение выходного сигнала ВОГ по напряжению.

Расчетное значение коэффициента $K_{фнч}$ составляет $\sim 1,25$ В/В при принятых значениях $P_{фд}=0,38 \cdot 10^{-6}$ Вт, $C_{фд} = 0,4$ А/Вт, $K_{ф\omega} = 0,6$ Мом, $K_{пу} = 10$ В/В, $K_{сд} = 0,64$ В/В, $J_1(1,84) = 0,582$, $U_{вог}^{max} = 0,625$ В, $\Omega_{изм}^{max} = 350$ °/с, $T_{вог} = 0,238$ с

2. Анализ характеристик волоконно-оптического гироскопа, которые могут использоваться при проведении полного факторного эксперимента

Подбирая параметры, которые необходимо использовать, например, при проведении полного факторного эксперимента, стоит выделить основные зависимости, которые описывают преобразования сигнала в электрической схеме ВОГ. Нами было рассмотрено функциональное устройство ВОГ без обратной связи спроектированного с приведенными характеристиками, взятыми из открытых источников. Напряжение на выходе трансимпедансного усилителя такого ВОГ можно представить [2] в следующем виде (без учёта динамических запаздываний):

$$U = K \left\{ 1 + \cos \left[2M \sin \frac{\pi f}{2 f_{онм}} \cos \left(\omega t - \frac{\pi f}{2 f_{онм}} \right) + \Delta \varphi_c \right] \right\}, \quad (16)$$

где $K = K_{фд} \cdot R \cdot P$

$K_{ф\omega}$ – коэффициент усиления фотодатчика (0,8 [А / Вт]);

$P_{фд}$ – падающая на фотодиод мощность излучения [Вт],

R – резистор в цепи обратной связи предусилителя [Ом];

M – глубина (амплитуда) модуляции фазового модулятора;

f – частота модуляции фазового модулятора, ($75 \cdot 10^3$) [Гц];

$\omega = 2\pi f$ – круговая частота модуляции [Гц];

$$f_{онм} = \frac{1}{2\tau},$$

где $\tau = \frac{nL}{c}$ – запаздывание во времени хода луча в «катушке»,

n – коэффициент преломления кварцевого волокна ($\approx 1,46$);

L – длина волокна в контуре ВОГ (200, 400, 900 м);
 c – скорость света в вакууме, 299792458 [м/с];
 $\Delta\varphi_c$ – сдвиг по фазе Саньяка, [рад],

где λ – длина волны источника излучения $(\begin{matrix} 0,83 \cdot 10^{-6} \\ 1,38 \cdot 10^{-6} \end{matrix})$ [м];

S – площадь, окаймленная оптическим путем, расчет которой производится на основе формы ВОГ, для овального ВОГ:

$$S = N_{\text{ВИТ}} \cdot S_{1\text{ВИТ}} = \frac{L}{P_{\text{ВОГ}}} \cdot S_{1\text{ВИТ}} = \frac{L}{2d + 2\pi r} \cdot (\pi r^2 + 2rd) \quad (17)$$

L – длина оптического волокна [м],
 $N_{\text{ВИТ}}$ – количество витков,
 $S_{1\text{ВИТ}}$ – площадь, окаймленная 1 витка [м²],
 $P_{\text{ВОГ}}$ – длина периметра ВОГ [м],
 r и d – размеры ВОГ (0,018 и 0,025) [м],
 Ω – угловая скорость [°/с].

Введём дополнительное выражение, упрощающее уравнение (16), для последующего анализа:

$$m = 2M \sin \Delta\varphi - \text{индекс модуляции}$$

$$\Delta\varphi = \frac{\pi}{2} \frac{f}{f_{\text{omn}}} - \text{учитывает реальный сдвиг по фазе между сигналом на вы-$$

ходе усилителя и опорным генератором.

Математическую модель, описанную уравнениями (16) – (17) реализуем в вычислительной среде Matlab / Simulink, используя выражения [3]. Блок-схема данной модели представлена на рисунке 1.

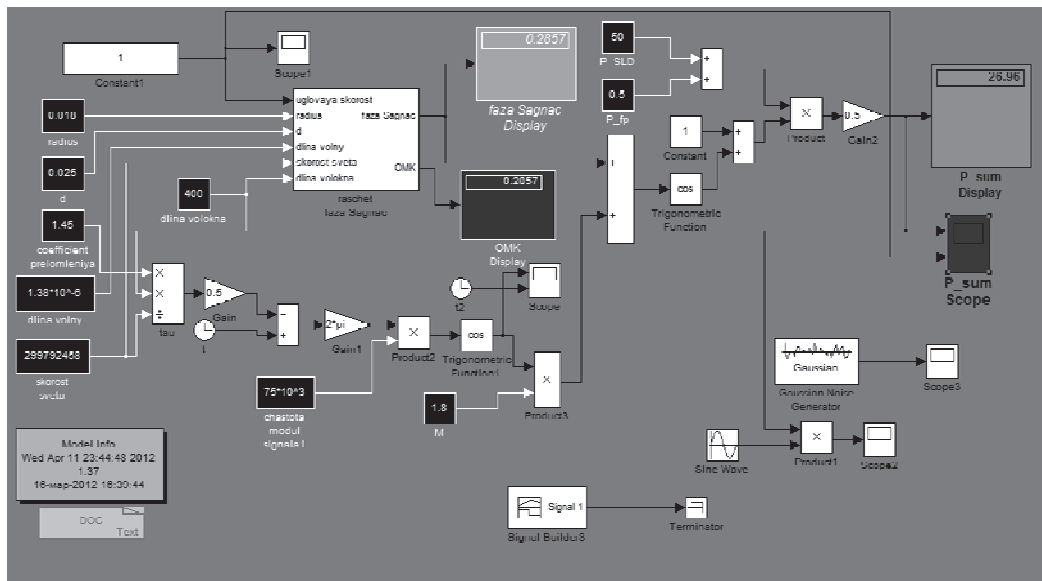


Рисунок 1 – Реализация модели цифрового ВОГ в среде Simulink

После анализа результатов моделирования стоит отметить основные выводы:

– принципиальное значение при реализации имеет выбор частоты модуляции f относительно $f_{\text{отт}}$.

– если $f = f_{\text{отт}}$, то нетрудно показать, что выражение (6) примет вид:

$$U = K \{1 + \cos[m \sin \omega t + \Psi]\} \quad (18)$$

при этом: сдвиг по фазе перестает влиять на показания прибора, и индекс модуляции достигает своего максимального значения ($m = 2M$).

В то же время увеличение длины волокна фактически приближает к оптимальному режиму. Исходя из данного факта, с точки зрения точности можно предположить, что увеличение длины волокна может работать более эффективно, нежели только увеличение размеров катушки ВОГ, что целесообразно учитывать при разработке новых ВОГ. Необходимо отметить, что поскольку в аналоговой схеме ВОГ применяется синхронный детектор, который работает как блок умножения двух сигналов и, следовательно, при наличии сдвига фаз между двумя его сигналами на входе может привести к выделению как постоянной составляющей на выходе, так и падению коэффициента передачи, то в данной схеме необходимо учитывать и компенсировать все накопленные сдвиги по фазе.

Данный вариант анализа характеристик волоконно-оптического гироскопа позволяет еще на этапе первоначального анализа характеристик отбросить малозначимые из них, а также наглядно структурировать их в виде блок-схем, и по сути является основой проведения предварительного эксперимента.

Выводы

1. Основным видом исследования волоконно-оптических приборов можно выделить проведение полного факторного активного эксперимента. В результате обработки данных такого эксперимента получается статистическая регрессионная многофакторная модель, представляющая из себя один или систему полиномов первого – второго порядка.

2. В ходе предварительного анализа характеристик волоконно-оптического гироскопа на основе известных зависимостей или поведения сигнала в его электрической схеме возможно определять значимые из них для проведения полного факторного эксперимента, уточняя при этом уровни варьирования факторов.

Литература

1. Бирюков А.Н. Нечеткая регрессионная прогнозная многофакторная модель для решения экономической прикладной задачи // Управление экономическими системами: электронный научный журнал. 2010. № 2(22). № гос. рег. статьи 0421000034 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://uecs.mcsnp.ru>.
2. Кубланов М.С. Методика построения многомерных регрессионных математических моделей // Научный вестник МГТУ ГА. № 154. 2010. С. 149-151.
3. Лукин К.Г., Павлов Д.В. Имитационная модель волоконно-оптического гироскопа // Фотоника. № 3. 2014. С. 82-85.

4. Лукин К.Г., Павлов Д.В., Петров М.Н. Разработка динамической модели волоконно-оптического гироскопа // Вестник Новгородского государственного университета. № 75. Т.1. 2013. С. 85-87.
5. Волоконно-оптические датчики. Т. Окуси, К. Окамото, пер. с японского Л.: Энергоатомиздат, 1990 г.
6. Поляков Д.В., Лукин К.Г., Петров М.Н. Разработка модели волоконно-оптического гироскопа в среде Simulink // Вестник Новгородского государственного университета. № 68. 2012. С. 106-109.

УДК 004.931

Исследование применения нейросетевого подхода в решении задачи обнаружения лиц

И.А. Крысин, старший преподаватель
кафедры Информационные системы и сети,

К.А. Гаврилов, студент бакалавриата,

Калужский Филиал Московского Государственного Технического Университета
им. Н. Э. Баумана, КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Калуга

В статье приводится исследование применения сверточных нейронных сетей с разными структурами при решении задачи обнаружения лиц. Приводятся тесты и сравнение эффективности в сравнении с алгоритмом Viola-Jones по оценкам точности и скорости обработки. Проверяется точность при обнаружении лиц с очками. Результаты доказали возможность применения нейросетевого подхода. В статье описываются возможные варианты применения нейронных сетей в гибриде с алгоритмом Viola-Jones для более эффективного решения.

Сверточная нейронная сеть, обнаружение лиц, компьютерное зрение, каскадный классификатор Viola-Jones.

Study of neural network approach application in face detection problem

I.A. Krysin, senior lecturer of the Information Systems and Networks Department,

K.A. Gavrilov, student of bachelor,

Kaluga Branch of Moscow State Technical University named after N.E. Bauman,
KB of BMSTU, Kaluga

The article brings study of convolutional neural network with various structures application in face detection problem. Tests and effectiveness comparison to Viola-Jones algorithm are carried out in terms of accuracy and speed of processing. Accuracy on face detection with glasses is tested. Results proved the ability of neural network approach application. The article describes possible options of using neural networks with Viola-Jones algorithm to improve performance on the solution.

Convolutional neural network, Face Detection, Computer Vision, Viola-Jones Cascade Classifier.

С помощью человеческого зрения люди могут распознавать и находить объекты на изображениях достаточно быстро, точно и легко. Хотя компьютерное зрение и похоже в достаточной мере на человеческое своими принципами, оно является сложным, не всегда эффективным и точным. В данной статье объясняются основные принципы обнаружения объектов на изображениях, их классификация и сравнение алгоритма Viola-Jones с нейросетевым подходом в решении

задачи обнаружении объектов.

И в алгоритме Viola-Jones, и в сверточных нейронных сетях применяется схожий подход. В обоих случаях явно или неявно выделяются особенности изображения, черты объекта, которые ему присущи, вычисляется некоторое его значение, по которому происходит классификация.

Алгоритм обнаружения объектов Viola Jones

Алгоритм Viola-Jones был разработан в целью быстрого обнаружения объектов в режиме реального времени без помощи нейронных сетей. Алгоритм использует 3 ключевых компонента: интегральное изображение, выбор Хагг-признаков при помощи AdaBoost и каскад. Интегральное отображение представляет собой матрица, каждый элемент которой является суммой значений пикселей площади левой и выше данного элемента [4, 5, 8]:

$$X_{i,j} = \sum_{k=1}^i \sum_{z=1}^j x_{k,z} \quad (1)$$

Однако данный расчет можно упростить, используя ранее вычисленные элементы:

$$X_{i,j} = X_{i-1,j} + X_{i,j-1} + X_{i,j} - X_{i-1,j-1} \quad (2)$$

Такое отображение помогает не вычислять каждый раз площадь некоторой области на изображении, а всего лишь необходимо вычислить интегральное отображение один раз и использовать в дальнейшем.

Хагг-подобные особенности – это шаблоны, по которым вычисляется значение для классификации. Выделяют основные 5 типов Хагг признаков, они изображены на рисунке 1. Данные признаки варьируются в размерах и расположении на изображении. Для вычисления значения признака на области изображения необходимо из площади более темной области вычесть площадь более светлой области изображения.

$$y = \sum_{i=1}^i \sum_{j=1}^j b_{i,j} - \sum_{i=1}^i \sum_{j=1}^j w_{i,j} \quad (3)$$

где $b_{i,j}$ – значение пикселя изображения в темной части признака, $w_{i,j}$ – значение пикселя изображения в светлой части признака.



Рисунок 1 – Типы Хагг-подобных признаков

При помощи интегрального отображения значение признака вычисляется как разность левого верхнего угла из правого нижнего угла для темной и светлой стороны, затем из полученного значения для темной стороны вычтется значение полученной для светлой стороны.

Каскадный классификатор представляет собой несколько этапов, каждый из которых состоит из сильного классификатора. Принцип работы такого классификатора заключается в том, что каждый классификатор обрабатывает входные данные, и, если классификатор не обнаружил объект на изображении, то изображении полностью отвергается и не обрабатывается следующими классификаторами [3, 7].

Подробнее про алгоритм Viola-Jones в [2, 4, 5, 6, 7, 8]. Данный алгоритм используется по сей день в различных устройствах, таких как видекамеры и фотоаппараты.

Нейронные сети

Задачи компьютерного зрения обычно решают при помощи сверточных нейронных сети. Нейронные сети считаются сложнее, чем алгоритм Viola-Jones, однако, работают по такому же принципу. На сверточных слоях нейросеть неявно выделяет признаки объекта во время обучения и в процессе работы сравнивает изображение с этими признаками [8]. Преимуществом нейронных сетей перед алгоритмом Viola-Jones является возможность применения более сложных и нелинейных признаков, т.е. нейросеть может обнаруживать более сложные начертания лица.

В качестве данных признаков выступают карты признаков, количества которых задаются параметрами для каждого слоя свертки.

Также благодаря нелинейности, у нейронных сетей больше возможностей в распознавании менее встречаемой особенности лица в датасете, например, отличный от других цвет кожи, шрамы и прочее. В данном случае, так как таких видов данных не так много в датасете, то изображение пройдет как можно дальше в каскаде Хаара, а соответственно время обработки будет максимальной, в то время как в нашей работе скорость обработки изображения нейронной сетью будет приближаться к среднему значению обработки алгоритмом Viola-Jones, что дает выигрыш по скорости в данном случае.

Настройка параметров

Для сравнительного анализа эффективности работы сверточной нейросети взят алгоритм Viola-Jones из [5], так как он является передовым и в нем заложено базовое обнаружение объектов с достаточно высокой скоростью и точностью обнаружения. Также при анализе будет учитываться основные рекомендуемые параметры детектора из [2, 6].

Для обучения нейросети были взяты изображения случайных объектов из датасета CIFAR-10, были взяты все окна размером 24x24 пикселей из нескольких случайных изображений и изображения фронтальных лиц, выровненные и переведенные в черно-белый формат (Grayscale), так как именно при таких условиях алгоритм Viola Jones может успешно функционировать.

Для обучения и оценки точности и эффективности данные были поделе-

ны на два датасета: для обучения и тестирования. Датасет для обучения состоит из 2750 изображений лиц людей и 13595 случайных изображений. Датасет для тестирования состоит из 9250 изображений: 250 – лица, 9000 – случайные.

Тесты и результаты

Определим архитектуры сетей для анализа. Нейросеть должна удовлетворять требованиям быстрой обработки изображения и высокой точности. Так как вариаций архитектур сверточных нейронных сетей для входных данных размером 24x24 пикселя в формате Grayscale не так много, то будет варьировать количество карт-признаков и количество слоев свертки.

Первая структура нейронной сети является достаточно простой, она ориентирована на быстрое обнаружение за счет всего 2 слоев свертки. Расчет был сделан на то, что двух слоев свертки будет достаточно для высокой результативности сети. Структура первой нейронной сети изображена на рисунке 2.

Вторая структура состоит из нескольких слоев свертки и нацелена больше на точность, чем на быстроту обработки. Нейросеть включает максимально возможное количество слоев свертки. Это означает, что, если нейросеть с такой структурой является успешной, то повышение ее результативности возможно только за счет повышения числа карт признаков на каждом слое. Структура второй нейронной сети изображена на рисунке 3.

Третья структура нейросети, которая будет испытываться в данной работе, отличается от первой наличием слоя субдискретизации между слоями свертки, что уменьшает количество информации и сокращает время свертки на слое после. По ожиданиям это должно сократить время обработки изображения при незначительных потерях точности. Структура третьей нейронной сети изображена на рисунке 4.

На скрытых слоях нейросети применяется функция активации ReLU, а на выходном слое – sigmoid, так как перед нами стоит задача бинарной классификации.

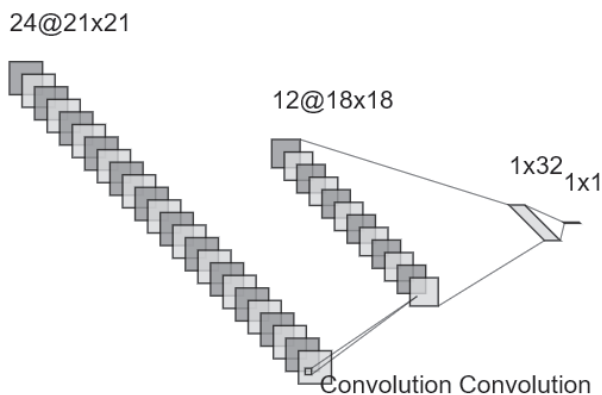


Рисунок 2 – Архитектура CNN-1

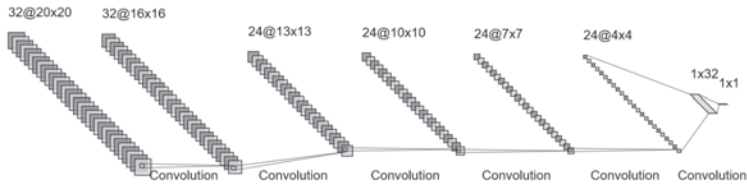


Рисунок 3 – Архитектура CNN-2

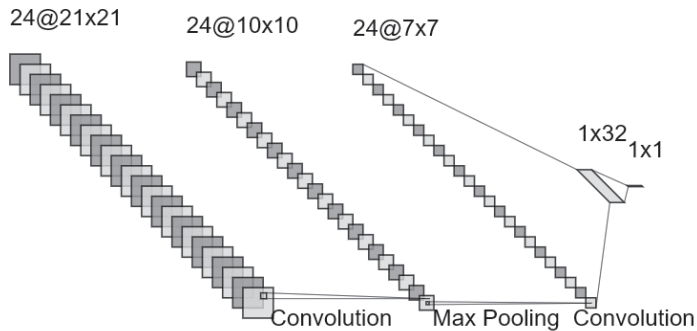


Рисунок 4 – Архитектура CNN-3

Примеры изображений выровненных лиц, используемые для обучения нейронной сети, изображены на рисунке 5.



Рисунок 5 – Изображения в датасете

Результаты обучения и тестов сведены в таблицу 1. Жирным шрифтом выделены лучшие показатели. Как видно из результатов CNN-2 обладает более высоким показателем Hit Rate при таком же показателе False Positive Rate, как и каскадный классификатор Viola-Jones. Однако, время обработки одного участка изображения занимает 3мс, что является достаточно долгим, так как для обработки большого изображения качеством Full HD понадобится слишком много времени. Наиболее оптимальной нейросетью является CNN-3. Время обработки участка изображения – 442мкс, что является высоким показателем скорости обработки для нейросети, так как время обработки изображения размером 384x288 занимает 0.067 секунды при помощи алгоритма Viola-Jones. Показатель обнару-

жения лиц Hit Rate несколько выше, чем у алгоритма Viola-Jones, а показатель ложных положительных обнаружений почти в 2 раза ниже.

Таблица 1 – Сравнительная таблица результатов

	Ошибка обучения	Точность обучения	Ошибка на тесте	Точность на тесте	Время обработки, мс	Hit Rate	False Positive Rate
CNN-1	0.0084	0.9977	0.0281	0.9894	1	0.896	0.008
CNN-2	0.0083	0.9974	0.0381	0.9870	3	0.984	0.013
CNN-3	0.0094	0.9972	0.0269	0.9891	0.442	0.944	0.009
Viola-Jones	–	–	–	–	–	0.929	0.017

Также были проведены теста обнаружения лиц людей, носящие либо солнцезащитные, либо оптические очки. Датасет для этого теста был взят из системы Kaggle. Датасет предназначен для бинарной классификации сгенерированных нейросетью лиц людей, носящих очки. Он включает в себя 5000 изображений лиц с очками и без них. Результаты тестов сведены в таблицу 2.

Таблица 2 – Тест на лицах с очками

Алгоритм	Hit Rate
CNN-1	0.5082
CNN-2	0.9166
CNN-3	0.3636
Viola-Jones	0.5860

Как видно из результатов тестов, нейросеть с наибольшим количеством слоев свертки единственная нейросеть, которая справилась с задачей лучше, чем алгоритм Viola-Jones. Сравнивая CNN-1 и CNN-3, которые отличаются лишь наличием слоя субдискретизации во второй, можно утверждать, что потеря информации сильно повлияло на зависимости между слоями нейронной сети, так как CNN-3 показало лучшие результаты на тестовом датасете, что говорит о важности сохранения информации при решении данной задачи.

Вывод

Подход использования нейронных сетей для решения задачи обнаружения лиц доказал, что является более точным, чем каскадный классификатор Viola-Jones. Однако, использование нейронных сетей является времязатратным процессом, так как на обработку одного участка изображения размером 24x24 пикселя уходит приблизительно 500мкс в лучшем случае, что несравнимо со скоростью обработки алгоритмом Viola-Jones. Нейросетевой подход может использоваться как второстепенный инструмент и проверять изображения, пройденные через классификатор Viola-Jones, состоящий из небольшого количества

этапов и содержащий небольшое количество карт признаков, так как классификатор, состоящий из 2 карт признаков, может достичь 100% Hit Rate и 50% False Positive Rate, который может отбросить большую часть изображений. После этого можно использовать нейросети вместо построения дальнейшего каскада Хаара, так как проблема распознавания лица на дальнейших этапах становится все сложнее для алгоритма Viola-Jones.

Литература

1. Гаврилов К.А., Лавренков Ю.Н. Исследование применения сверточных нейронных сетей для обработки изображений и распознавания объектов // Электронный журнал: наука, техника и образование. 2021. № 2(33). С. 25-30.
2. Egorov A.D., Shtanko A.N., Minin P.E. Selection of Viola-Jones Algorithm Parameters for Specific Conditions // Bulletin of the Lebedev Physics Institute. Vol. 42. No. 8. 2015. Pp. 244-248.
3. Zhu Ji, Hui Zou, Saharon Rosset, Trevor Hastie. Multi-class AdaBoost // Statistics and Its Interface. Vol. 2, 2009. Pp. 349-360.
4. Kaiqi Cen. Study of Viola-Jones Real Time Face Detector. CS231A: Computer Vision, From 3D Reconstruction to Recognition. Stanford University, California, USA. 2016.
5. Paul Viola, Michael Jones. Rapid Object Detection using a Boosted Cascade of Simple Features // Accepted Conference on Computer Vision and Pattern Recognition 2001. Kauai, HI. USA. Pp. 511-518.
6. Tanmoy Paul, Ummul Afia Shammi, Mosabber Uddin Ahmed, Rashedur Rahman, Syoji Kobashi, Md Atiqur Rahman Ahad. A Study on Face Detection Using Viola-Jones Algorithm in Various Backgrounds, Angles and Distances. // Biomedical Soft Computing and Human Sciences, Vol. 23. No. 1. 2018. Pp. 27-36.
7. Weize Zhang, Ruofeng Tong, Jinxiang Dong. Boosting 2-Thresholded Weak Classifiers over Scattered Rectangle Features for Object Detection. // Journal of Multimedia. Vol. 4. No. 6. 2009. Pp. 397-404.
8. Yi-Qing Wang. An Analysis of the Viola-Jones Face Detection Algorithm // IPOL Journal. Vol. 4. 2014. Pp. 128-148.

УДК 004.891

Моделирование процесса определения достоверности текстов с помощью методов обработки естественного языка

О.П. Мосалов, кандидат физико-математических наук,
заведующий учебно-научной лабораторией
интеллектуальных систем управления,
Государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования Московской области
«Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза,
летчика-космонавта А.А. Леонова», г. Королев, Московская область

В данной работе рассматривается проблема определения достоверности текстов и предлагается алгоритм для вычисления степени достоверности, использующий сам текст и его метаданные. Рассмотрены подходы к построению метрик производительности алгоритма. Приведены результаты вычислительных экспериментов, показывающие применимость существующих инструментов обработки естественного языка для выделения необходимых в алгоритме характеристик текста. Обсуждены дальнейшие шаги исследований и направления развития предложенного алгоритма.

Интеллектуальный анализ данных, обработка естественного языка, машинное обучение.

Modelling of the process to determine credibility of texts using methods of natural language processing

O.P. Mosalov, Ph.D., head of the educational and scientific laboratory
of intellectual control systems,
State Budgetary Educational Institution of Higher Education of the Moscow Region
«Technological University named after twice Hero of the Soviet Union,
pilot-cosmonaut A.A. Leonov», Korolev, Moscow region

In this paper the problem of determination of credibility of texts is considered, and an algorithm to calculate a degree of credibility, that uses the text and its metadata, is proposed. Approaches to build performance metrics for the algorithm are considered. Results of computational experiments that show applicability of existing NLP tools for data extracting that is needed by the algorithm are presented. Further research steps and ideas to improve the algorithm are discussed.

Data mining, natural language processing, machine learning.

В настоящее время скорость появления новой информации так высока, что практически невозможно обработать все новости, даже ограничившись рам-

ками какой-то выделенной тематики. Это приводит к тому, что создатели нового контента начинают искать новые пути для продвижения своего продукта, используя «громкие» заголовки, ссылки на мнения людей, являющихся или кажущихся экспертами в некоей области и тому подобное. С другой стороны, большие успехи достигнуты в области генерации информации, что приводит к необходимости уметь распознавать искусственно созданные и, зачастую, не соответствующие реальности тексты. Кроме того, активно распространяется практика намеренного искажения информации (так называемые «фейковые новости»).

В связи с этим актуальным является фильтрация входящего потока информации и выделение из него наиболее ценных частей, для их последующего применения для принятия ключевых решений, а также в целом для поддержания здорового информационного обмена в обществе.

В настоящий момент исследования, направленные на решение таких задач, находятся еще в начальной фазе [2,13]. Создаются сервисы для проверки фактов [3], разрабатываются новые подходы к представлению текстов [9], идёт работа над созданием единых подходов и требований (так называемых «baseline») к алгоритмам и математическим моделям, решающим перечисленные выше задачи [5,6,7,11].

В данной работе рассматривается алгоритм определения достоверности текста, использующий как результаты анализа самого текста, так и его метаданных. Данный алгоритм можно использовать как для оценки достоверности как больших наборов текстов для их фильтрации, так и для анализа отдельных текстов, например, научных статей, для приведения их к более строгому виду.

Предпосылки и существующие подходы. Признаком актуальности описанной выше проблемы является наличие инструкций по анализу текста для поиска в нём недостоверной информации. Например, Международная Федерация библиотечных ассоциаций и учреждений сформулировала следующие рекомендации для оценки того, что к рассматриваемому тексту следует отнести критически [10]:

1. Изучить информацию о площадке, на которой изначально появился текст, обращая внимание на заявленную миссию сайта и, при необходимости, на собственника. Например, развлекательное издание может опубликовать статью своего редактора, которая будет выглядеть, как научная, но при этом не проходила процедуру рецензирования и должна рассматриваться как развлекательная.
2. Внимательно прочитать весь текст статьи, не фокусируясь на заголовке, чтобы не упустить ту часть содержимого, которая никак не относится или вообще противоречит заголовку.
3. Изучить информацию об авторе, обращая внимание на то, насколько его мнению можно доверять в описываемой тематике. Убедиться, что автор действительно существует.
4. Проверить приведённые в тексте ссылки – действительно ли они подтверждают то, что написано в тексте?

5. Проверить даты информации, так как старые, уже неактуальные новости могут быть выданы за новые, особенно это касается изображений и видео.
6. Убедиться, что это не сатира, пародия или шутка другого типа.
7. Рассмотреть возможность, что предубеждения самого читателя влияют на анализ информации, так как люди склонны верить тому, что подтверждает уже сложившиеся у них мнения, а не доверять тому, что таким сложившимся мнениям противоречит.
8. Провести перекрёстную проверку полученной информации, либо обратившись к эксперту в рассматриваемой области, либо к специальным сервисам для проверки фактов.

Таким образом, задачу фильтрации текстов можно свести к задаче определения достоверности текста, то есть вычисления вероятности того, что текст является актуальным и точным. Обозначив событие того, что текст t не содержит недостоверной, нерелевантной и эмоциональной информации как T , а $p(T)$ – вероятность этого события, получим следующую запись алгоритма для решения задачи:

$$A: t \rightarrow p(T) \quad (1)$$

Следуя описанным выше рекомендациям, необходимо использовать не только сам текст статьи или новости и то, что может быть извлечено непосредственно из него, а также и другую информацию, в том числе о площадке (журнале, сайте и тому подобное), авторе и так далее.

Чтобы учесть эту дополнительную информацию, необходимо в качестве одного из шагов алгоритма применить обогащение данных:

$$A_1: t \rightarrow \{t\} \cup \tau \quad (2)$$

где τ – дополнительная информация, которая в данном случае имеет следующую структуру:

$$\tau = \{\tau_1, \tau_3, \tau_4, \tau_5, \tau_8\} \quad (3)$$

где индекс соответствует номеру рекомендации: τ_1 – информация о площадке размещения текста, τ_3 – информация об авторе текста, τ_4 – информация о ссылках и источниках, указанных в тексте, τ_5 – информация о дате текста и его составных частей (например, иллюстраций), τ_8 – информация из сервисов проверки фактов. При этом рекомендации 2 и 6 можно выполнять, анализируя текст t непосредственно, а выполнение рекомендации 7 остаётся за пределами данного исследования, так как требует моделирования самого читателя.

При анализе текста различные инструменты и методы могут применяться на различных уровнях детализации:

1. Весь текст – например, выделение ключевых слов или вычисление доли служебных слов или отдельных частей речи.
2. Абзац – например, анализ внутренней структуры отдельных абзацев или сравнение распределений отдельных слов в различных абзацах.
3. Предложение – например, поиск риторических конструкций.
4. Слово – например, оценка эмоциональной окраски отдельных слов или словосочетаний.

Соответственно, результатами такого анализа на каждом из уровней бу-

дут величины параметров, характеризующие именно этот уровень (весь текст, абзац, предложение или слово).

Описание алгоритма. Рассмотрим некоторый текст t , его метаданные (информация об авторе, месте публикации и тому подобное) τ и обозначим пространство всех текстов, которые не содержат недостоверной, нерелевантной или эмоциональной информации, как T . Тогда в общем виде алгоритм определения достоверности текста может быть записан следующим образом:

$$A: (t, \tau) \rightarrow p(t \in T) \quad (4)$$

При этом, специфика решаемой задачи такова, что не для всех текстов требуется вычисление точной вероятности $p(t \in T)$, так как для целей фильтрации качественного контента обычно задаётся некоторое допустимое пороговое значение достоверности $P_0 \in [0,1]$, и все тексты с достоверностью ниже этого порога не рассматриваются, то есть, например, значения достоверности 10% и 15% будут обрабатываться одинаково.

Соответственно, с учётом вышесказанного, алгоритм может быть записан так:

$$\tilde{A}: (t, \tau) \rightarrow \begin{cases} p(t \in T), & p(t \in T) > P_0 \\ P_0, & p(t \in T) \leq P_0 \end{cases} \quad (5)$$

или немного в другой форме:

$$\tilde{A}: (t, \tau) \rightarrow \max(p(t \in T), P_0) \quad (6)$$

Для вычисления $p(t \in T)$ в общем случае необходимо вычислить ряд вероятностей:

$$p_i = p(E_i) = f_i(t, \tau) \quad (7)$$

где отдельные функции f_i могут использоваться для вычисления достоверности событий E_i , как перечисленных выше (площадка является доверенной, уровень доверия автору высок и тому подобное), так и других событий, описывающих текст и его метаданные.

Отдельные вероятности p_i могут быть вычислены, например, с помощью аналитических формул, оценены с помощью статистических данных или рассчитаны с применением методов машинного обучения.

В случае наивного предположения о взаимной независимости событий E_i можно записать:

$$p(t \in T) = \prod_i p(E_i) \quad (8)$$

Однако в рассматриваемой задаче такое предположение является слишком сильным, так как в общем случае отдельные события могут быть вызваны одними и теми же причинами или друг другом. В таком случае необходимо учитывать условные вероятности событий, что приводит к следующему выражению:

$$p(t \in T) = p(E_1)p(E_2|E_1)p(E_3|E_1, E_2) \dots \quad (9)$$

Для того, чтобы не определять все возможные события E_i и их вероятности $p(E_i)$, мы можем выполнять уточнение искомой вероятности $p(t \in T)$ итерационно и использовать следующие критерии остановки алгоритма:

1. Если текущее значение $p(t \in T)$ меньше величины P_0 (5), считаем, что анализируемый текст недостоверен.

2. Если текущее значение $p(t \in T)$ больше величины P_1 , считаем, что анализируемый текст достоверен.

При этом P_0 и P_1 связаны условием: $0 \leq P_0 < P_1 \leq 1$.

Используя теорему Байеса [16], алгоритм (5) может быть записан следующим образом:

1. Выбрать событие E_1 , вероятность которого $p(E_1)$ рассчитать проще (быстрее, дешевле) всего.
2. Присвоить полученное значение текущей версии итоговой вероятности: $p(t \in T) = p(E_1)$.
3. Если текущее значение вероятности $p(t \in T)$ удовлетворяет одному из критериев остановки алгоритма, то останавливаем алгоритм с соответствующим результатом.
4. Если количество обработанных событий достигла заранее установленного значения N , то останавливаем алгоритм с результатом «достоверность текста t не определена».
5. Выбираем новое, ещё неиспользованное событие E_i , вычисляем его вероятность $p(E_i)$.
6. Вычисляем условную вероятность наступления события E_i при условии, что текст t является достоверным: $p(E_i|t \in T)$.
7. Обновляем текущее значение вероятности $p(t \in T)$ по формуле:
$$p(t \in T) \leftarrow p(t \in T|E_i) = (p(t \in T)p(E_i|t \in T))/p(E_i) \quad (10)$$
8. Переходим к шагу 3.

Таким образом, предлагаемый алгоритм позволяет учитывать не все возможные характеристики текста и его метаданных (и соответствующие им события), а только то их количество, которое требуется для достижения одного из критериев остановки. При этом сами характеристики и события могут зависеть друг от друга.

Для каждой используемой характеристики необходимо уметь вычислять её вероятность: безусловную и при условии, что текст является достоверным.

Гиперпараметрами данного алгоритма являются значения P_0 , P_1 , N , а также индекс, задающий порядок обработки событий E_i .

Также стоит отметить, что описанный алгоритм допускает применение на разных уровнях детализации: на всем тексте, на отдельных абзацах, предложениях и словах. При этом события для более крупных сущностей (например, абзацев) могут зависеть от статистических особенностей результатов работы алгоритма на менее крупных сущностях (например, словах).

Подходы к построению метрики производительности. Предложенный в данной работе подход, с формальной точки зрения, решает задачу классификации, так как по результатам отработки алгоритма любой текст t может быть отнесён к одному из трёх классов: C_1 – достоверные тексты, C_2 – недостоверные тексты, C_3 – тексты, достоверность которых не определена. Однако при этом не используются предварительно размеченные данные или оценки эксперта, поэтому тип алгоритма – классификация без учителя.

Как и в случае с большинством других алгоритмов обучения без учителя,

в рассматриваемом случае достаточно сложным является подобрать метрику производительности алгоритма, которая была бы достаточно точной, легко вычислимой и интерпретируемой. Ниже рассмотрено четыре подхода к построению такой метрики. Они могут использоваться как по отдельности, так и в комбинации друг с другом.

Первый подход – использование стандартных метрик, применяемых в задачах кластеризации, таких как коэффициент инерции или коэффициент силуэта. Для расчёта этих величин необходимо предварительно вычислить векторные представления текстов с помощью одного из существующих методов или их комбинации. Этот подход достаточно прост для реализации, однако его применимость ограничена в первую очередь сравнением результатов работы алгоритма для разных наборов гиперпараметров, интерпретировать же значения в рамках конкретного результата может быть затруднительно.

Второй подход предполагает использование существующих или появившихся в будущем независимых размеченных экспертами данных, с помощью которых можно будет оценить точность работы алгоритма с помощью F-меры [1].

Третий подход – использование состоящей из двух блоков архитектуры, аналогичной генеративно-состязательной сети [8], где один блок решает описанную выше задачу классификации, а второй – решает задачу генерации образцов текста, похожих на достоверные. Для обучения и использования такой архитектуры необходим набор эталонных текстов, взятых из заранее проверенных источников. При таком подходе эффективность блока классификации может быть также оценена с помощью F-меры при разделении эталонных и сгенерированных текстов.

Четвёртый подход подразумевает создание подсистемы для формирования набора недостоверных текстов из набора достоверных текстов и последующей настройка алгоритма по объединении этих наборов, то есть сведение задачи обучения без учителя к задаче самообучения.

Важно отметить, что третий и четвёртый подходы требуют создания вспомогательного алгоритма, который эффективно генерирует недостоверные тексты. Если удастся научиться решать эту задачу, то оригинальная задача определения достоверности станет гораздо проще.

Эксперименты и их результаты. В первой серии вычислительных экспериментов была исследована применимость ряда существующих инструментов обработки естественного языка для формулировки событий E_i и вычисления их вероятностей $p(E_i)$.

Были использованы следующие инструменты:

1. Сегментация предложений в тексте – библиотека Razdel [15].
2. Выделение ключевых фраз из текста – библиотека Yake [4].
3. Определение тональности предложений или фраз – библиотека Dostoevsky [14].
4. Вычисление векторных представлений предложений или фраз – библиотека Laser [12].

Все инструменты применялись на уровне текста, однако в процессе отдельных вычислений происходил переход на более детальный уровень – уровень предложений.

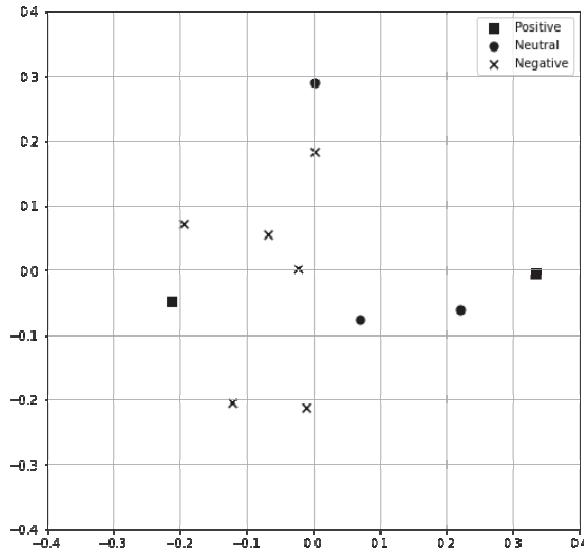


Рисунок 1 – Векторные представления и их тональность для 11 предложений текста

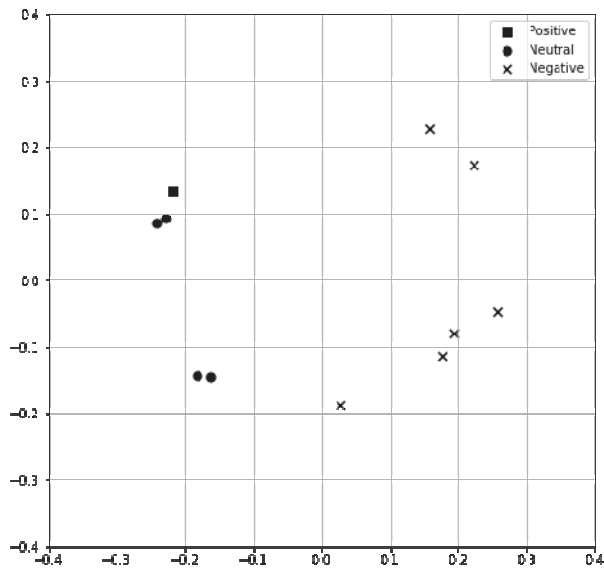


Рисунок 2 – Векторные представления и их тональность для 11 ключевых фраз текста

Логика применения перечисленных инструментов следующая:

1. Разбить текст на отдельные предложения:

$$F_1: t \rightarrow \{s_i\}, i = 1, \dots, N_S \quad (11)$$

2. Выделить из текста ключевые фразы:

$$F_2: t \rightarrow \{w_i\}, i = 1, \dots, N_W \quad (12)$$

3. Определить тональность для полученных предложений и ключевых фраз:

$$F_3: a \in \{s_i\} \cup \{w_i\} \rightarrow Y \quad (13)$$

где $Y = \{\text{'Positive'}, \text{'Neutral'}, \text{'Negative'}\}$

4. Вычислить векторные представления для полученных предложений и ключевых фраз:

$$F_4: a \in \{s_i\} \cup \{w_i\} \rightarrow x \in \mathbb{R}^{N_x} \quad (14)$$

Таким образом, получаются отображения исходного текста в два пространства: $Y^{N_S+N_W}$ и $\mathbb{R}^{N_x(N_S+N_W)}$, на которых уже достаточно просто можно задать бесконечное множество событий и вычислить их вероятности.

Также векторные представления могут быть использованы для визуализации полученных отображений. В качестве примера использован текст новости с сайта Технологического университета, состоящий из 11 предложений, из которого также было выделено 11 ключевых фраз. На рисунке 1 показаны распределение векторных представлений предложений и их тональность. На рисунке 2 показаны распределение векторных представлений ключевых фраз и их тональность.

Можно наблюдать, что распределения векторных представлений и их тональность значительно различаются и могут использоваться как независимо, так и совместно.

Выводы и направления дальнейшего развития. Для практического использования предложенного общего алгоритма анализа текста необходимо разработать фреймворк, который позволит выделять из текста характеристики, формулировать на их основе события и вычислять их вероятности. Разработка такого фреймворка является одной из важнейших целей дальнейшего развития данной работы.

Также внимания требует интерпретация полученных результатов. В идеале пользователю, который не является экспертом в области анализа текстов, должен быть понятен не только сам конечный результат, но и причины, по которым он достигнут.

Дополнительных исследований требуют также смежные задачи: построение сервисов проверки фактов и разработка системы генерации недостоверной информации, так как их наличие положительно повлияет и на эффективность работы основной системы, и на её интерпретируемость.

Литература

1. Баженов Д. Оценка классификатора (точность, полнота, F-мера) [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://bazhenov.me/blog/2012/07/21/classification-performance-evaluation.html> (дата обращения: 14.11.2021).
2. Alloghani M., Al-Jumeily D., Mustafina J., Hussain A., Aljaaf A.J. A Systematic Review on Supervised and Unsupervised Machine Learning Algorithms for Data Science // In: Berry M., Mohamed A., Yap B. (eds) Supervised and Unsupervised

- Learning for Data Science. Unsupervised and Semi-Supervised Learning. Springer. Cham. 2020.
3. Amazeen M.A. Revisiting the Epistemology of Fact-Checking, *Critical Review // A Journal of Politics and Society*. Vol. 27. 2015. pp. 1-22.
 4. Campos R., Mangaravite V., Pasquali A., Jatowt A., Jorge A., Nunes C., Jatowt A. YAKE! Keyword Extraction from Single Documents using Multiple Local Features // *Information Sciences Journal*. Elsevier. Vol. 509. 2020. pp. 257-289.
 5. Conroy N.K., Rubin V.L., Chen Y. Automatic deception detection: Methods for finding fake news // *Proc. Assoc. Info. Sci. Tech*. Vol. 52. 2015. pp. 1-4.
 6. Ereemeev M., Vorontsov K. Quantile-based approach of measuring cognitive complexity of text // *Computational linguistics and intellectual technologies*. 2020. N. 19(26). pp. 256-269.
 7. Feldman D., Sadekova T., Vorontsov K.V. Combining facts, semantic roles and sentiment lexicon in a generative model for opinion mining // *Computational linguistics and intellectual technologies*, 2020. N. 19(26). pp. 283-298.
 8. Goodfellow I., Pouget-Abadie J., Mirza M., Xu B., Warde-Farley D., Ozair S., Courville A., Bengio Y. Generative adversarial nets // *Advances In Neural Information Processing Systems 27 (NIPS 2014)*. 2014. pp. 2672-2680.
 9. Ibrishimova M.D., Li K.F. A Machine Learning Approach to Fake News Detection Using Knowledge Verification and Natural Language Processing // In: Barolli L., Nishino H., Miwa H. (eds) *Advances in Intelligent Networking and Collaborative Systems. INCoS 2019. Advances in Intelligent Systems and Computing*. Vol. 1035. Springer. Cham. 2020.
 10. International Federation of Library Associations and Institutions (IFLA). How To Spot Fake News [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://repository.ifla.org/handle/123456789/167> (дата обращения: 14.11.2021).
 11. Julio C.S., Correia R.A., Murai F., Veloso A., Benevenuto F. Explainable Machine Learning for Fake News Detection // *Proceedings of the 10th ACM Conference on Web Science*. Association for Computing Machinery, New York. NY. USA. 2019. pp. 17-26.
 12. LASER Language-Agnostic SEntence Representations [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://github.com/facebookresearch/LASER> (дата обращения: 14.11.2021).
 13. Manzoor S.I., Singla J., Nikita. Fake News Detection Using Machine Learning approaches: A systematic Review // *3rd International Conference on Trends in Electronics and Informatics (ICOEI)*. 2019. pp. 230-234.
 14. Rogers A., Romanov A., Rumshisky A., Volkova S., Gronas M., Gribov A. RuSentiment: An Enriched Sentiment Analysis Dataset for Social Media in Russian // *In Proceedings of the 27th International Conference on Computational Linguistics (COLING 2018)*. August. 2018. Santa Fe. NM. edited by E.M. Bender, L. Derczynski, P. Isabelle. pp. 755-763.
 15. Rule-based system for Russian sentence and word tokenization [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://github.com/natasha/razdel> (дата обращения: 14.11.2021).
 16. Yudkowsky E.S. An Intuitive Explanation of Bayes' Theorem [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.yudkowsky.net/rational/bayes> (дата обращения: 14.11.2021).

УДК 519.163

Средства имитационного моделирования для выбора подхода при решении многокритериальной задачи коммивояжёра

Н.Н. Светушков, кандидат технических наук, доцент,

К.А. Перепелица, магистрант,

Государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования Московской области

«Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза,
летчика-космонавта А.А. Леонова», г. Королев, Московская область

Развитие глобальной экономики приводит к возникновению различных логистических задач по оптимизации как маршрутов доставки, так и необходимости уложиться в заданные временные интервалы для каждого из клиентов. Полный перебор при большом количестве заказов, как известно, вызывает определённые проблемы даже на современной вычислительной базе. Поэтому методы решения классической задачи коммивояжёра остаются актуальными, тем более, что возникают специализированные программные среды, которые позволяют не только отобразить найденный маршрут, но и привязать его к реальной карте местности. Дополнительное преимущество, связанное с имитационным моделированием оптимизации процессов доставки, является возможность найти не один маршрут, а целый набор с различными, но близкими по значению критериями оптимальности, что может помочь глубже проанализировать текущую задачу в случае возникновения каких-либо непредвиденных ситуаций. В статье анализируются возможности программной среды имитационного моделирования AnyLogic и предлагается новый алгоритм перебора, основанный на выделении отдельных групп клиентов. Совмещение предлагаемого алгоритма с возможностями AnyLogic позволит создать законченное информационное приложение, которое можно использовать при практической работе в логистических компаниях.

Оптимизация на графах, многокритериальный перебор, задача коммивояжёра, программное обеспечение, имитационное моделирование, эвристические алгоритмы.

Simulation tools for approach selection when solving the multicriteria traveling salesman problem

N.N. Svetushkov, candidate of technical sciences, associate professor,

K.A. Perepelitsa, master's student,

State Budgetary Educational Institution of Higher Education of the Moscow Region
«Technological University named after twice Hero of the Soviet Union,
pilot-cosmonaut A.A. Leonov», Korolev, Moscow region

The development of the global economy leads to the emergence of various logistics tasks to optimize both delivery routes and the need to meet the specified time intervals for each of the customers. Completely full search with a large number of customers, as is known, might to cause certain problems even on a modern computing base. Therefore, methods for solving the classic traveling salesman problem remain relevant, especially since specialized software environments are emerging that allow not only displaying the found route, but also linking it to a real map of the area. An additional advantage associated with simulation modeling of the optimization of delivery processes is the ability to find not one route, but a whole set with different but similar optimality criteria, which can help to analyze the current task in depth in the event of any unforeseen situations. The article analyzes the capabilities of the software environment for simulation AnyLogic and proposes a new search algorithm based on the selection of individual groups of clients. Combining the proposed algorithm with the capabilities of AnyLogic will create a complete information application that can be used in practical work in logistics companies.

Optimization on graphs, multicriteria enumeration, traveling salesman problem, software, simulation, heuristic algorithms.

Введение

Классическая задача оптимизации на графах (задача коммивояжёра), в которой коммивояжёру необходимо посетить заданное количество пунктов за минимальное время, в настоящее время также обладает достаточной актуальностью в связи с развивающимися сервисами курьерской доставки интернет-магазинов, особенно в крупных компаниях, таких, как Ozon и Aliexpress. Дополнительной сложностью её решения в современных условиях является необходимость выполнения заданных временных ограничений, когда по требованию заказчика доставка должна быть осуществлена в определённый временной промежуток. Кроме этого, необходимо также учитывать возможности доставки – наличие свободных курьеров и транспорта и др. При этом, постановка задачи оптимизации может существенным образом меняться в течение дня – при возникновении форсмажорных обстоятельств (например, поломка транспорта у курьера, пробка на дороге и др.), так и необходимости выполнить в кратчайшие сроки особо важный заказ.

Все эти особенности должны быть учтены при разработке специализированного программного обеспечения, которое могло бы помочь курьерам уменьшить общее время и уложиться в заданные ограничения при доставке разнообразных товаров.

В настоящей статье предлагается использовать известную программную среду имитационного моделирования AnyLogic, созданную российской компанией и имеющей офисы в различных странах, для верификации предлагаемых эвристических подходов и отображении получаемых результатов. Достаточно широкие возможности данной среды позволяют создавать отдельные пользовательские приложения, включающие трёхмерную визуализацию задаваемой информа-

ции, привязку объектов к карте местности, применение возможностей объектно-ориентированного программирования, проведение облачных расчетов, разработку собственного программного кода и др.

В статье кратко описан новый эвристический подход к решению задачи коммивояжера применительно к банковской сфере, основанный на группировке большого количества отдельных пользователей в соответствии с определёнными алгоритмами и полным переборе вариантов между группами.

Общие подходы к решению задачи многокритериальной оптимизации на графах

Как уже упоминалось ранее, программная среда AnyLogic, в которой предполагается провести расчёты и выполнить моделирование многокритериальной задачи коммивояжера, является мощным инструментом разработки различных бизнес процессов с целью проведения статистического анализа их эффективности. Это в полной мере относится и к возможностям решения задачи коммивояжера применительно к банковской сфере. Анализ результатов моделирования и отладка программного обеспечения при разработке алгоритмической модели значительно упрощаются, если есть возможность на каждом шаге работы программы наглядно отобразить получаемые результаты. С этой целью в среде AnyLogic предусмотрен специальный графический блок, позволяющий показать текущее состояние системы, текущие значения параметров и переменных, представить результаты в виде различного рода графиков, а также отдельные средства трёхмерной визуализации. С точки зрения решения задачи коммивояжера программа позволяет не только стохастически сгенерировать сеть пунктов назначения – набор точек, соединённых отрезками, как было сделано в работе [5], но и привязать реальную карту местности расположения пунктов доставки с указанием средств перемещения между пунктами – наземный транспорт, метро, пешеходные дорожки и др. Несмотря на то, что излишняя детализация не является необходимой, она в значительной степени повышает пользовательскую привлекательность разрабатываемого приложения.

Как известно [1,2], наиболее часто используемыми алгоритмами решения задачи коммивояжера являются следующие (за исключением полного перебора всех вариантов): муравьиный алгоритм (алгоритм оптимизации муравьиной колонии), алгоритм имитации отжига, а также генетический алгоритм. Каждый из этих алгоритмов имеет свои преимущества и недостатки.

Муравьиный алгоритм [2] нахождения оптимального маршрута основан на имитации поведения муравьиной колонии в процессе поиска еды. Предполагается, что каждый из муравьёв двигается по графу стохастически и, проходя последовательно вершины графа вычисляется цена пройденного маршрута. Новый маршрут для движения муравья преимущественно использует маршрут или часть маршрута, которая имеет минимальную цену (минимальное значение критерия оптимизации). Значимость маршрута определяется длиной (ценой) маршрута и количеством агентов-муравьёв, которые по нему прошли с начала поиска.

В алгоритме имитации отжига [1, 4] в качестве эвристического алгоритма выбран процесс кристаллизации вещества, заключающий в постепенном пони-

жении температуры образца, в процессе которого происходит гомогенизация материала, металла или сплава исследуемого объекта. В процессе медленного остывания или отжига отдельные молекулы объединяются в кристаллы с наиболее выгодным энергетическим состоянием. В ходе «метода отжига» при определении оптимального маршрута задаётся первоначальный вариант, и задаётся начальная температура – вероятность перехода вершины из текущего состояния в энергетически более выгодное или наоборот, более высокое энергетическое состояние. Другими словами происходит перебор вариантов, начиная некоторого начального, при котором вершины могут меняться местами и локально ухудшать исходный маршрут, что в конечном итоге может улучшить конечный результат. При постепенном уменьшении температуры вероятность такой замены сводится к минимуму.

И, наконец, генетический алгоритм [1, 8] основан на использовании механизма, в некоторой степени сравнимым с механизмом эволюции, когда более приспособленные к внешним условиям особи имеют больше шансов для выживания и размножения. При переходе от одного поколения к другому передаётся «генетическая» информация о накопленных положительных изменениях и закрепляется при дальнейшем развитии системы.

Результаты моделирования тестовых схем, приведённые в работе [5] показывают, что при небольшом количестве вершин – до ~100 преимуществом в определении оптимального пути с точки зрения временных затрат относится к муравьиному методу. Вычислительное время в этом случае составляет несколько секунд, что вполне приемлемо с практической точки зрения.

Особенности задачи коммивояжёра в банковской сфере заключаются в необходимости не только минимизации пройденного пути, но и, желательно, в заданные временные интервалы, оговорённые клиентами банка. С точки зрения клиентов, конечно, время доставки должно строго соблюдаться, но на практике не всегда возможно точно доставить в срок и курьерам приходится договаривать на другие временные отрезки. Для целей функционирования бизнес-процессов с точки зрения банка целевой функцией является обслуживание максимального количества клиентов, а с точки зрения курьеров – по возможности минимальные временные затраты. Таким образом, применение известных подходов для минимизации расстояния (или заданной целевой функции, включающей время и затраты на транспорт) могут быть применимы с определёнными оговорками. Дополнительной целью данной работы является исследование возможностей по разработке программного обеспечения с удобным пользователю интерфейсом, позволяющая в течение рабочего дня оперативно изменять (пересчитывать) оптимальные маршруты в связи с изменившимися условиями (транспортные проблемы, проблемы с клиентами, проблемы с курьерами и др.).

Программная среда, в которой выполнялось моделирование, предоставляет специальные возможности для создания цифровой модели бизнес-процессов, что позволяет описать работу банковского офиса с максимальной степенью детализации, включая входящие потоки из телефонных запросов, и кончая работой курьеров. На рисунке 1 представлена в качестве образца типич-

ная диаграмма обслуживания клиентов банковского офиса.

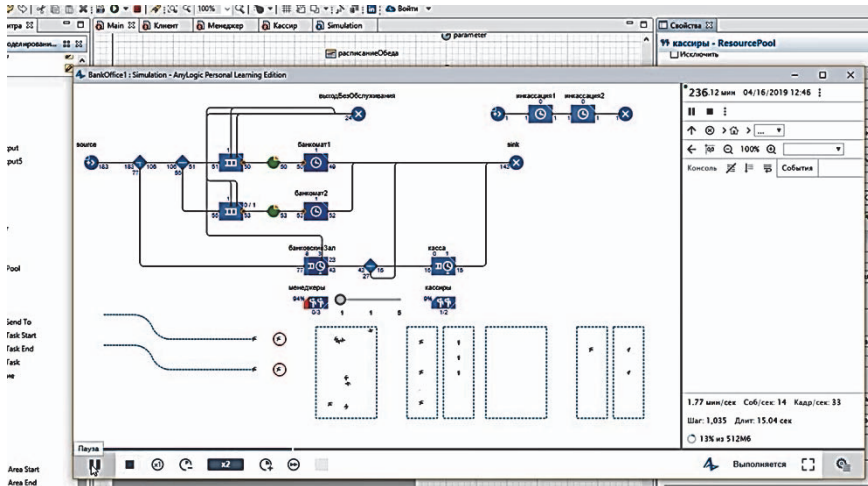


Рисунок 1 – Пример построения бизнес-диаграмм в среде AnyLogic

Одной из целей создания среды AnyLogic являлось наглядное представление полученных результатов моделирования разного рода процессов. С точки зрения решения задачи коммивояжёра у разработчика программного обеспечения имеется возможность отобразить реальную карту местности (например, взятую из GoogleMap) и показать на ней целевые адреса клиентов в виде трёхмерных объектов. Ниже на рисунке 2 показан пример такой карты.

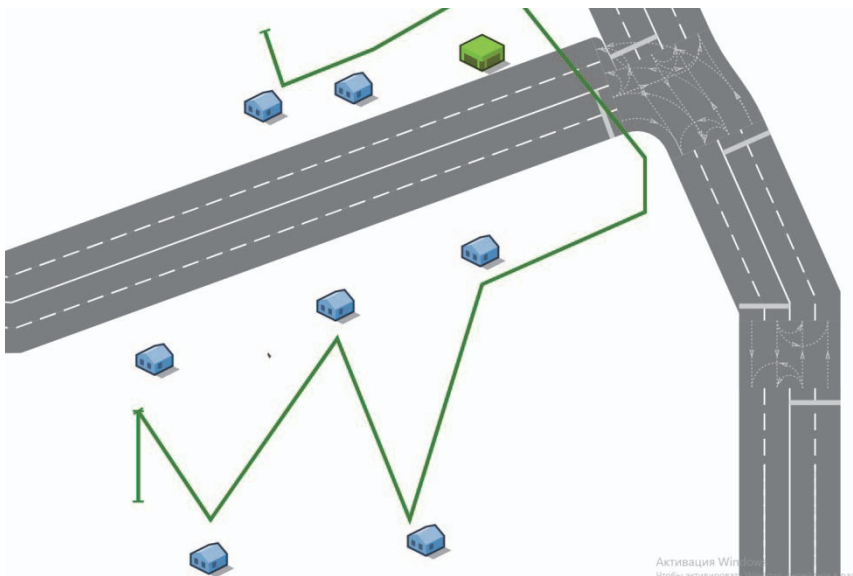


Рисунок 2 – Пример маршрута движение курьера по заданным адресам в среде AnyLogic

Таким образом, результаты работы программы – нахождение оптимального маршрута движения могут быть наглядно представлены пользователю программного обеспечения, что может быть полезно, в том числе, и с точки зрения отладочных действий при тестировании различных алгоритмических процедур.

Эвристический алгоритм перебора вершин, основанный на формировании отдельных групп клиентов

Для того чтобы сократить объем вычислений при переборе вариантов предлагается использовать метод глобальной группировки клиентов-адресатов в соответствии с критерием оптимальности. В простейшем случае, когда требуется оптимизировать длину пути, метод группировки означает выделение из общего количества клиентов компактно расположенные группы, причем пользователь может указать количество таких групп в пользовательском программном приложении.

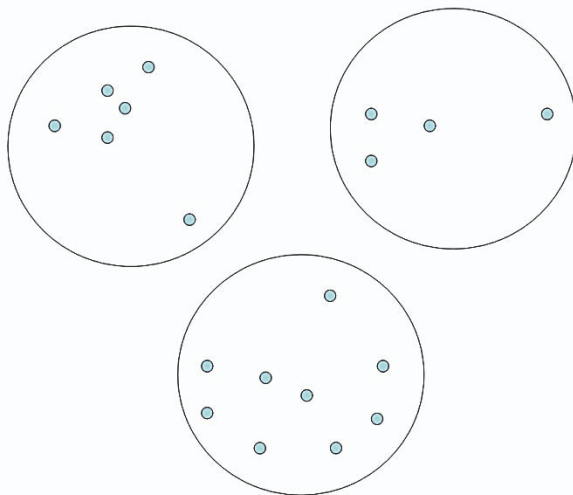


Рисунок 3 – Пример распределения общего количества клиентов по группам в соответствии с целевой функцией (критерием оптимальности)

При выделении отдельных групп из общего множества могут быть достигнуты сразу три цели:

- уменьшается длина пути, которую необходимо оптимизировать, т.к. поиск оптимальной длины происходит в пределах одной группы
- поиск оптимального пути для каждой группы можно выполнять на отдельном процессоре или отдельном вычислительном потоке, т.е. можно эффективно использовать параллельные вычисления, что немаловажно при большом количестве адресатов.
- отдельные близко расположенные группы можно «отдать» одному курьеру из общего числа доступных курьеров.

Ниже на рисунке показана упрощённая схема алгоритма нахождения оп-

тимального пути, основанного на принципе глобального выделения отдельных групп:

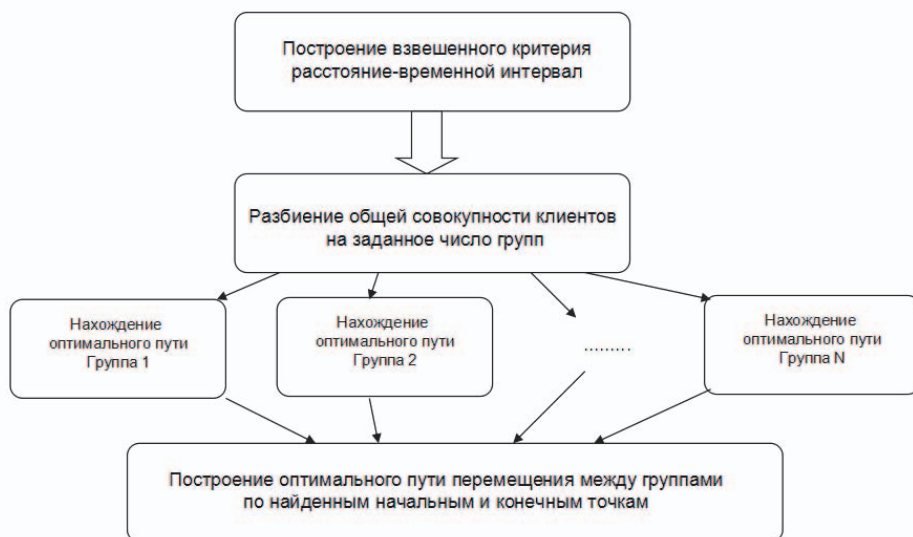


Рисунок 4 – Упрощённая блок-схеме алгоритма определения оптимального маршрута путём выделения групп

Предлагаемый подход интуитивно понятен, т.к. очевидно, что оптимальным будет подход, при котором есть возможность обойти клиентов, которые расположены рядом друг с другом. Обобщение этого подхода на случай заданных временных интервалов, в которые необходимо уложиться при доставке товара для каждого из адресатов, осуществляется заменой расстояния между адресатами на обобщенный критерий, учитывающий взвешенные коэффициенты для временных интервалов.

Метод поиска оптимального пути в группе, основанный на анализе вариантов с заданной глубиной перебора

Для построения оптимального пути в пределах одной группы предлагается использовать поисковый алгоритм, основанный на принципе просчёта ходов в шахматах. Другими словами, для каждого текущего адресата задаётся глубина поиска, например, 3, и перебираются все маршруты с заданной глубиной. Оптимальным выбирается тот, у которого минимальная длина. После этого переходим к следующему адресату, и алгоритм повторяется до тех пор, пока не будут исчерпаны все адресаты. Ниже на рисунке показан результат работы шахматного алгоритма:

Заключительным этапом оптимизации является построение оптимального маршрута обхода выделенных групп. В силу того, что количество групп значительно меньше общего количества адресатов, здесь можно использовать полный

перебор всех вариантов. Ниже на рисунке 6 показан найденный оптимальный маршрут в соответствии с описанным двухэтапным эвристическим алгоритмом:

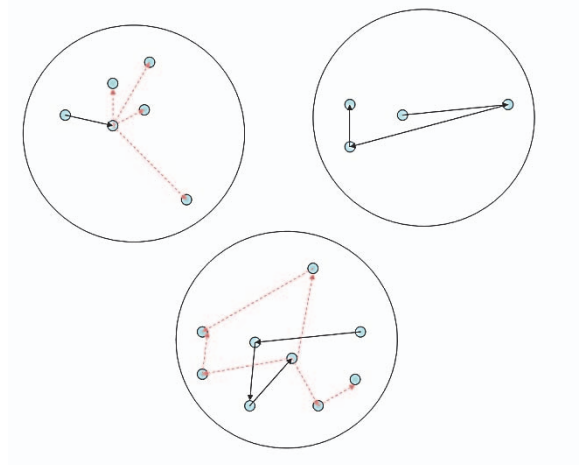


Рисунок 5 – Оптимизация маршрутов в каждой группе клиентов-адресатов

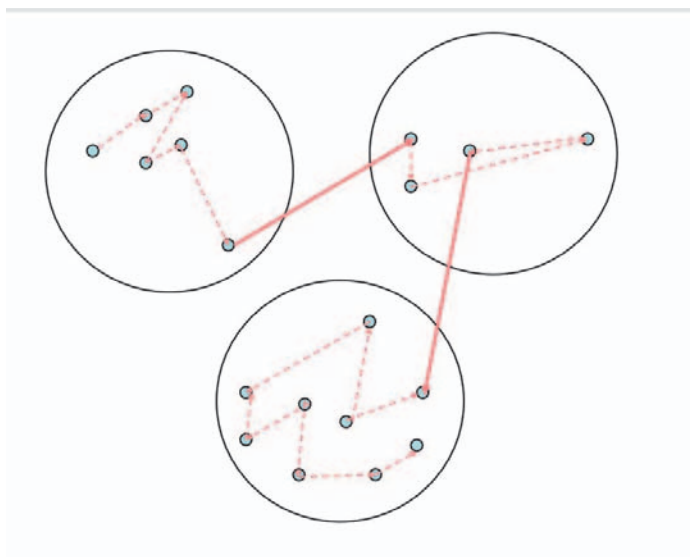


Рисунок 6 – Пример окончательного оптимального маршрута в соответствии с методом разбиения на группы

Описанный метод поиска оптимального пути предназначен не только для одного курьера, но может быть использован для распределения заявок между несколькими курьерами, достаточно отнести определённое количество групп отдельному курьеру. В этом случае можно оценить время работы этого курьера и всех курьеров в целом, а также требуемое количество курьеров для обслуживания заданных адресатов.

Отметим, что для практического применения может быть полезно, построить не один оптимальный маршрут, а несколько, чтобы пользователь мог выбрать тот, который может быть более удобен, несмотря на небольшой проигрыш в оптимальности. Другими словами, можно оценить в определённом смысле устойчивость оптимального пути – как меняются затраты, если движение по оптимальному маршруту нарушилось (например, вышел из строя автомобиль или автобус) и каким образом можно с наименьшими потерями построить новый маршрут.

Заключение

Программная реализация подобного алгоритмического подхода позволит создать удобное для пользователя программное обеспечение в среде AnyLogic, которое можно использовать при практической работе с клиентами банка. Достаточная гибкость алгоритма позволяет пользователю оперативно варьировать количество групп, на которые можно разбить клиентов, изменять взвешенную целевую функцию, отдавая приоритет или сроку доставки или минимизации пройденного пути или максимизации количества обслуженных клиентов.

Предлагаемый алгоритм может быть применён и для построения логистических цепочек в других сферах производственной или другой деятельности, например при распределении товаров по пунктам выдачи в крупных интернет-магазинах (например, Ozon).

Литература

1. Рейндогль Э., Део Н. Комбинаторные алгоритмы решения задачи коммивояжера. Теория и практика. М.: Мир, 2000. 480 с.
2. Курейчик В.М., Кажаров А.А. О некоторых модификациях муравьиного алгоритма // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2008. № 4. С. 7-12.
3. Курейчик В.М., Кажаров А.А. Использование роевого интеллекта в решении NP-трудных задач // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2011. № 7. С. 30-35.
4. Савин А.Н., Тимофеева Н.Е. Применение алгоритма оптимизации методом имитации отжига на системах параллельных и распределённых вычислений // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Математика. Механика. Информатика. 2012. № 1. С. 110-116.
5. Семенов С.С., Педан А.В., Воловиков В.С., Климов И.С. Анализ трудоёмкости различных алгоритмических подходов для решения задачи коммивояжера // Системы управления, связи и безопасности 2017. № 1. С. 116-131.
6. Анашкина Н.В., Шурупов А.Н. Экспериментальное сравнение алгоритмов Балаша и имитации отжига в задаче решения систем линейных неравенств // Прикладная дискретная математика. Приложение. 2014. № 7. С. 151-153.
7. Курейчик В.М. Генетические алгоритмы // Известия Южного федерального округа. Технические науки. 1998. № 2. С. 5-12.

8. Луценко В.Н. Генетический алгоритм для решения транспортной задачи // Известия Южного федерального округа. Технические науки. 1996. № 1. С. 49-53.
9. Семенов С.С., Ткачев Д.Ф., Педан А.В., Алисевич Е.А., Попов А.В., Воронцов О.С., Киселев Д.В., Климов И.С. Программа для решения задачи коммивояжера с помощью генетического алгоритма // Хроники объединённого фонда электронных ресурсов Наука и образование. 2016. № 6. С. 32.
10. Семенов С.С., Ткачев Д.Ф., Педан А.В., Алисевич Е.А., Попов А.В., Воронцов О.С., Киселев Д.В., Климов И.С. Программа для решения задачи коммивояжера с помощью муравьиного алгоритма // Хроники объединённого фонда электронных ресурсов Наука и образование. 2016. № 6. С. 31.
11. Семенов С.С., Воловиков В.С., Ткачев Д.Ф., Педан А.В., Киселев Д.В., Котляров Д.Ю., Вишняков Н.И. Имитационная модель ведения технической разведки техники связи и АСУ с применением средств роботизации // Хроники объединённого фонда электронных ресурсов Наука и образование. 2016. № 2. С. 15.
12. Семенов С.С., Ткачев Д.Ф., Педан А.В., Щукин А.В., Ануфренко А.В., Корень М.Ю., Вишняков Н.И. Программа для расчёта оптимального маршрута движения групп технической разведки техники связи и автоматизации // Хроники объединённого фонда электронных ресурсов Наука и образование. 2016. № 9. С. 6.

УДК 67.03

**Перспективы применения композиционных
огнезащитных материалов в условиях лесных пожаров**

В.В. Абразумов, доктор технических наук, профессор кафедры
механики и инженерной графики,

С.В. Фролов, кандидат физико-математических наук, заведующий кафедрой
механики и инженерной графики,

О.В. Токарева, доцент кафедры механики и инженерной графики,
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Академия государственной
противопожарной службы МЧС России», (АГПС) г. Москва

В статье представлен обзор существующих огнезащитных материалов и покрытий для целей противопожарной защиты конструкций и личного состава пожарных формирований. Рассмотрены механизмы действия компонентов огнезащитных покрытий в условиях действия конвективных потоков тепловой энергии. Выполнен обзор современных огнестойких экранов для защиты пожарных при тушении техногенных пожаров. Предложены пути разработки огнестойких материалов для создания защитных укрытий при тушении лесных пожаров в экстремальных условиях.

Композиционный огнестойкий материал, огнезащитное покрытие, инеркалированный графит, терморасширенный, пенококс, конвективный поток, инфракрасное излучение.

**Prospects for the use of composite flame-retardant materials
for fire-fighting purposes**

V.V. Abrazumov, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department
of Mechanics and Engineering Graphics,

S.V. Frolov, Candidate of Physical and Mathematical Sciences,
Head of the Department of Mechanics and Engineering Graphics,

O.V. Tokareva, Associate Professor of the Department
of Mechanics and Engineering Graphics,

Federal State Budgetary Educational Institution Higher education
«Academy of GPS of the Ministry of Emergency Situations of Russia», Moscow

The article presents an overview of existing fire-retardant materials and coatings for the purposes of fire protection of structures and personnel of fire brigades. The mechanisms of action of the components of flame-retardant coatings under the action of convective heat energy flows are considered. A review of modern fire-resistant screens for the protection of firefighters in extinguishing man-made fires has been carried out. The ways of developing fire-resistant materials for creating protec-

tive shelters for extinguishing forest fires are proposed in extreme conditions.

Composite fire-resistant material, fire-resistant coating, inertial graphite, thermal expansion, foam, convective.

Площади лесных массивов в Российской Федерации занимают около половины всей площади страны и составляют более 800 млн. га. В последние десятилетия большим бедствием для лесного фонда стали лесные пожары. Ежегодно регистрируется от 10 до 35 тыс. лесных пожаров, охватывающих площади от 0,5 до 2,5 млн. га. Огнем уничтожаются целые населенные пункты, погибают не только птицы и животные, но и люди.

Главной причиной гибели людей и пожарной техники при тушении лесных пожаров является окружение их кромкой огня пожара, которое происходит в результате резкого усиления ветра и изменения его направления.

Самыми опасными для личного состава пожарных формирований являются так называемые верховые пожары, которые сопровождаются выделением большого количества теплоты. При этом нагретый воздух и продукты горения создают восходящие потоки.

Наибольшей скоростью тепловыделения обладает огненный вихревой шторм (пожарный вихрь), представляющий собой мощное вращательное движение продуктов сгорания и имеющий высокую скорость движения таких потоков.

Самой главной задачей при тушении таких пожаров является обеспечение безопасности техники и личного состава.

Согласно нормативам, пожарные формирования оснащаются индивидуальными средствами защиты и теплозащитными экранами с водяным орошением, которые рассчитаны главным образом на борьбу с техногенными пожарами. Орошаемые теплозащитные экраны, многократно ослабляющие тепловое излучение пламени, показали себя как эффективное средство для защиты спасателей и пожарных от теплового воздействия. Но, к сожалению, они не могут быть использованы при тушении лесных пожаров по некоторым технологическим причинам.

Поэтому для защиты людей в экстремальных условиях лесных пожаров очень важное значение имеет проводимый комплекс работ по созданию и исследованию специальных коллективных и индивидуальных средств спасения пожарных.

Ярким примером неэффективности индивидуальных средств защиты является случай гибели 19 пожарных в штате Аризона (США в 2013 году при окружении их внезапно возникшим верховым пожаром).

Основными параметрами лесного пожара являются скорость распространения на всем фронте горения (м/с), температура пламени и интенсивность падающего теплового потока (Вт/м^2). Средняя температура горения многих лесных горючих материалов составляет 500...9000°C, а температура горения (тления) торфа – 5000°C [1]. При этом средняя мощность тепловыделения при массовых

пожарах $q = 104 \text{ Вт/м}^2$, а при огненном шторме – $q = 2,5 \cdot 10^5 \text{ Вт/м}^2$.

С одного погонного метра кромки пожара выделяется более 220 кВт тепловой энергии [2].

Огнезащитные покрытия и материалы

Основную группу огнезащитных материалов составляют негорючие и самозатухающие материалы. К ним относятся материалы, которые выдерживают огонь и не воспламеняются. Они содержат специальные добавки, которые противодействуют горению.

Основная причина гибели людей на пожарах – это отравление ядовитыми газами, образующимися при разложении компонентов полимера. Поэтому усилия ученых были направлены на разработку класса огнезащитных терморасширяющихся материалов (ОТМ), которые во многом решают задачу повышения токсической безопасности.

Терморасширяющиеся материалы при интенсивном воздействии высоких температур претерпевают физико-химические превращения, в результате которых образуются новые структуры, приводящие к многократному увеличению объема и обладающие низкой теплопроводностью. Образовавшиеся структуры представляют собой высокопористый пенный кокс, который препятствует процессу возгорания горючих материалов (древесина, полимеры и т.п.) и увеличивает время нагрева негорючих (например, сталь) до предельных температур, при которых утрачивается конструкционная прочность защищаемого материала.

ОТМ представляет собой многокомпонентную систему, каждый ингредиент которой выполняют свою определенную функцию. Под воздействием повышенных температур выделяются различные продукты распада компонентов: жидкости, препятствующие горению, газы, увеличивающие пористость коксового слоя и выполняющие роль охладителя, а также препятствующие проникновению кислорода к защищаемой поверхности.

В конечном итоге, огнезащитное покрытие, защищает поверхности конструкций от быстрого прогревания.

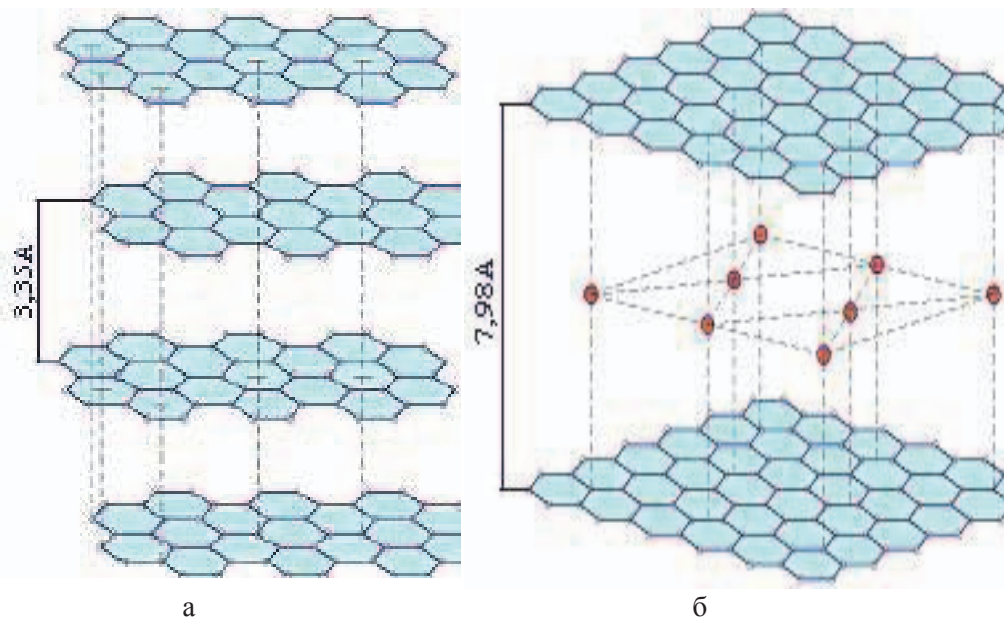
Изучению элементного состава огнезащитных покрытий с момента их открытия и механизмов действия отдельных компонентов всегда уделялось большое внимание. На сегодняшний день четко обозначилась наиболее распространенная рецептура этих покрытий на основе органики и на водной основе. В состав данных покрытий входят такие компоненты, как растворитель, хлорированный парафин, полифосфат аммония, меламин, пентаэритрит, диоксид титана и прочие добавки. Некоторые уточнения механизмов действия происходят по результатам анализа данных, полученных в результате экспериментальных исследований с использованием современной инструментальной базы.

Для интенсивного пенообразование в вспенивающихся композициях широко используются различные фосфаты. Наиболее широко используемым является полифосфат аммония.

Полифосфат аммония – один из основных компонентов фосфорной кислоты, которая обладает свойствами замедлителя горения. Замедлители горения

в процессе разложения полимера способствуют образованию кокса. Авторы [3] отметили, что в процессе нагрева полифосфата аммония в интервале от 0...1000 °С продуктами разложения являются аммиак и вода.

Меламин, который является хорошим газообразователем, выделяет при разложении большое количество негорючих газов, которые способствуют образованию вспененного слоя.



**Рисунок 1 – Схема кристаллической решетки графита:
а – гексагонального; б – интеркалированного**

В процессе быстрого нагрева интеркалированного графита происходит мгновенное испарение интеркалата, вследствие чего под действием давления паров слои атомов начинают сильно расширяться. Увеличение объема слоев происходит в основном путём изменения высоты графитовой частицы.

В результате терморасширения образуются частицы «червеобразной» формы, представляющие собой углеродные пеноструктуры. Такой графит называют терморасширенный графит (ТРГ) или пенографит. Строение отдельных частиц ТРГ представлено на рисунке 2.

Аналогичную функцию выполняет пентаэритрит, который в условиях высокотемпературного пиролиза также способствует формированию коксового каркаса.

Различные виды наполнителей (например, неорганических), также разлагаясь под действием теплового потока, образуют негорючие газы и поглощают теплоту. Представителем этого класса ингибиторов является тригидрат оксида алюминия.

Таким образом, в процессе химического и физического разложения компонентов огнезащитной композиции происходит трансформация исходной структуры с образованием вспененного кокса и многократное увеличение объема теплозащитного покрытия. При этом кокс выполняет функцию физического барьера для распространения теплоты в защищаемую поверхность. От его теплофизических характеристик зависит скорость распространения фронта теплового потока и период огнестойкости материала.

Вопросам изучения свойств образующегося кокса и улучшения их с помощью каких-либо ингредиентов уделяется большое внимание исследователей. Речь идет о повышении кратности вспучивания, химической стойкости, долговечности покрытия и т.д.

Особая роль в формировании огнестойкого покрытия отводится высокоуглеродистым наполнителям, обладающих эффектом терморасширения под воздействием температуры. Основным представителем таких специфических наполнителей является интеркалированный графит.

Графит – это чистый углерод, который горит с образованием углекислого газа и из-за этого плохо поддерживает горение. Кроме того, графит обладает слоистой структурой. Каждый слой атомов представляет собой массив шестиугольников и располагается один над другим. Связь между атомами в слое ковалентная, а между слоями действуют слабые Ван-дер-Ваальсовы силы, чем обусловлена анизотропия свойств графита и склонность к охрупчиванию [4,5].

Между слоями углерода можно легко поместить атомы или молекулы другого компонента (интеркалата), в качестве которого могут быть использованы как чистые химические элементы, так и их соединения. Процесс интеркалирования осуществляется внедрением в кристаллическую решетку графита молекул и ионов серной кислоты в присутствии окислителя (рис. 1).

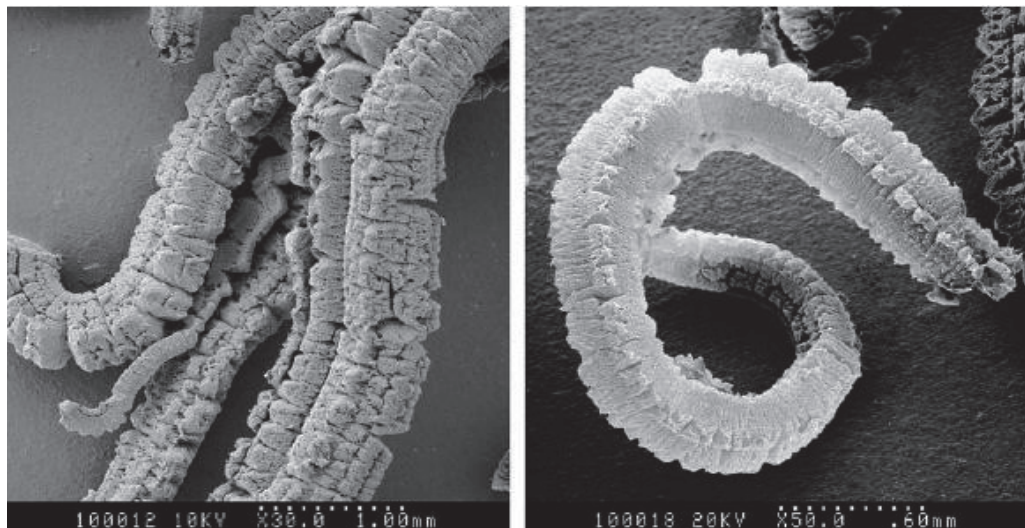


Рисунок 2 – Строение отдельных частиц ТРГ

Микроструктура частиц ТРГ представляет собой нерегулярную ячеистую графитовую сеть (рис. 3).

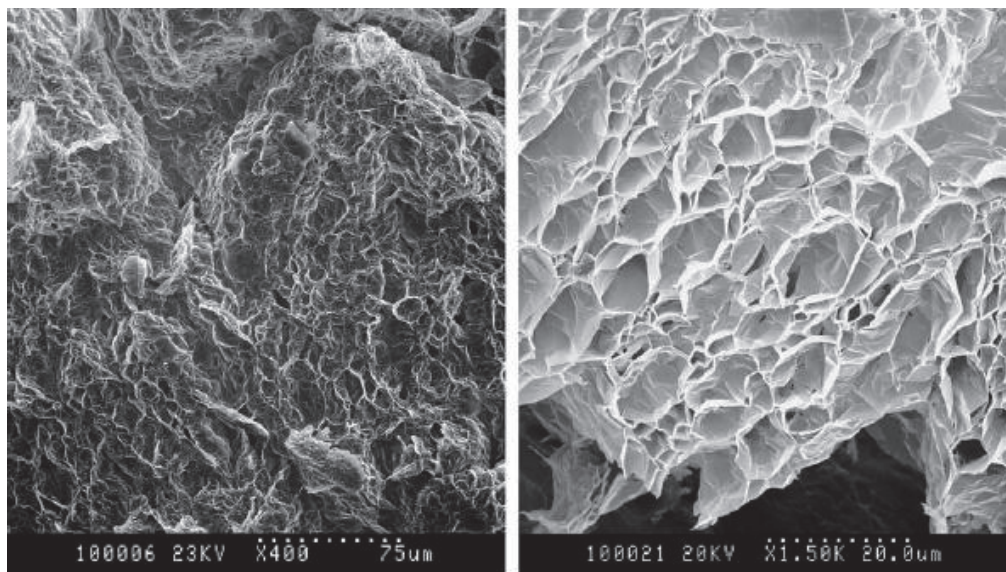


Рисунок 3 – Микроструктура частиц ТРГ (СЭМ)

Пенографит обладает свойствами, которые идеально подходят для огнезащитных покрытий: он химически инертен и плохо поддерживает горение; у него высокая пористость и хорошие теплоизоляционные свойства благодаря заключенным в порах газам. Под действием огня он образует медленно тлеющую пену и надежно защищает поверхность от пламени и температуры в течение длительного периода времени.

Интеркалированный графит совместим с другими терморасширяющимся наполнителями, такими как вермикулит. Вермикулит усиливает процесс вспучивания покрытия при более высоких температурах по сравнению с графитом. Вермикулит при нагреве негорюч, термостоек, не выделяет токсичных продуктов. Однако у него есть недостаток: начало вспенивания происходит при высокой температуре.

Современные противопожарные защитные устройства

Все виды техногенных и природных пожаров сопровождаются высокой интенсивностью тепловых потоков, действие которых приводит не только к уничтожению зданий, сооружений, техники, но и создает трудности в обеспечении безопасности пожарной техники и личного состава пожарных подразделений. Для защиты от теплового излучения объектов различного назначения применяются теплозащитные экраны, которые различаются между собой по принципу действия и конструктивными решениями.

По принципу действия экраны разделяются на отражательные и поглощательные.

Отражательные экраны из металлических листов или фольги, могут в зависимости от вида материала и длины волны отражать более 80% тепловых лу-

чей. Так, алюминиевая фольга способна отражать инфракрасное излучение с длиной волны 12 мкм и обеспечивать максимальный эффект отражения инфракрасных лучей до 97%.

В основе принципа действия поглощательных экранов лежит способность материалов оказывать высокое сопротивление тепловым потокам при пожаре и сохранять свои теплофизические характеристики в течение определенного периода времени.

Наибольшее рассеяние инфракрасного излучения тепловой энергии происходит на пленке воды, поэтому экраны такого типа нашли самое широкое практическое применение [6].

В России ООО «СпецПожТех» производит уникальные, не имеющие мировых аналогов теплозащитные экраны и противопожарные преграды «Согда», которые успешно применяются при тушении пожаров на объектах нефтегазового комплекса.

Преграды состоят из сетчатых панелей, которые располагаются параллельно друг другу, и между которыми специальными форсунками распыляется вода или жидкость со специальными добавками (в зависимости от климатических условий).

Такие защитные устройства обеспечивают локализацию огня с температурой до 1800 °С, выдерживают тепловые потоки свыше 220 кВт/м² и снижают их более чем в 50 раз [7].

Компания производит переносные, передвижные и стационарные модели экранов.



Рисунок 4 – Переносной защитный экран «Согда 1В»

Переносной складной защитный экран (рис. 4) предназначен для индивидуальной защиты пожарного от теплового потока, выполняющего боевые действия с ручным пожарным стволом. Он позволяет локализовать огонь температурой до 1200 °С. Небольшой вес, а так же компактность экрана дают возможность использовать его при тушении пожаров в многоэтажных зданиях и сооружениях, а также на открытой местности.

На основе принципа действия теплозащитных преград компанией было разработано устройство для рассеивания газового облака, которое образуется при утечке тяжелых пожароопасных газов из наземных емкостей.

Сейчас в области пожарной безопасности для защиты конструкций активно развивается перспективное направление пассивных огнезащитных материалов. В основе их действия лежит свойство огнезащитных материалов претерпевать структурные превращения при нагреве, в результате которых образуются новые структуры, обладающие высокими теплозащитными свойствами. Эти экраны, как правило, используются для предотвращения распространения огня в помещениях здания в случае возникновения пожара и применяются достаточно часто на промышленных объектах. Кроме того, аналогичные защитные устройства могут выполнять дымозаградительную функцию.

Конструктивное исполнение подобных защитных устройств в виде перегородок, огнестойких штор и т.п. [8] зависит от ряда условий, главными из которых являются тип конструкции, подлежащей защите, ее прочностные характеристики и предел огнестойкости, период огнестойкости материала самого защитного экрана.

Теплозащитную функцию в этих устройствах выполняют огнезащитные композиционные материалы на полимерной или минеральной основе, огнестойкие покрытия в виде красок, эмалей, паст и герметиков. Огнестойкие покрытия являются одновременно защитным слоем поверхности материала, а при нагревании поглощают тепло и применяются для огнезащиты металлических, деревянных и других строительных конструкций.

При нанесении покрытия толщиной от десятых долей миллиметра до нескольких миллиметров дает эффективную теплозащиту от пожаров.

Полимерные, деревянные и металлические материалы обладают достаточно хорошей адгезией с данными покрытиями. Они обладают высокой водостойкостью и долговечностью.

В настоящее время в России возобновлено производство одного из первых российских огнезащитных покрытий – пасты огнезащитной водоэмульсионной ВПМ-2. Этот материал, который был разработан в начале 80-х годов [9], и сегодня является востребованным на российском рынке.

Огнезащитную водоэмульсионную пасту ВПМ-2 наносят на металлические конструкции сооружений. Это соответствует 5-й группе огнезащитной эффективности при толщине сухого слоя 3 мм. Основным преимуществом этого материала являются низкая цена и наличие российской сырьевой базы.

Широкое применение нашли российские огнезащитные покрытия торговой марки ОГРАКС производства НПО «УНИХИМТЕК», которые выпускаются на основе высокомолекулярного полифосфата аммония и интеркалированных

графитов [10]. Покрытие толщиной всего 1 мм обеспечивает четвертую группу пожарной эффективности, т.е. время до достижения предельной температуры более 500 °С составляет 60 мин. Коэффициент вспучивания колеблется от 5 до 200 и зависит от условий нагревания покрытия, максимальной температуры и интенсивности теплового потока.

В области лесного пожаротушения актуальность использования огнезащитных экранов для быстрой локализации низовых лесных пожаров возрастает при большой скорости распространения огня (беглый низовой пожар).

Разработка таких огнезащитных средств вызывает определенные технические трудности, которые обусловлены сложностью развертывания их в условиях лесного ландшафта. При этом экран должен удовлетворять ряду требований: малый вес, повышенная огнестойкость, простота развертывания, возможность многократного применения.

Такой рулонный негорючий огнезащитный экран был разработан ФБУ СПБНИИЛХ и проведены его испытания. Он является альтернативой быстроотвердевающей минеральной пене и эффективен при высоте пламени до полутора метров.

В качестве огнезащитного материала была апробирована базальтоволонистая ткань из непрерывных базальтовых и штапельных базальтовых волокон толщиной 0,11...0,34 мм.

Рулонное огнезащитное полотно длиной 50 м и шириной 1,2 м, имея низкие показатели плотности (100 г/м²) и коэффициента теплопроводности 0,042 Вт/(м·К), обеспечивает защиту от распространения фронта пламени с температурой более 1100 °С.

Индивидуальная защита личного состава пожарных формирований при тушении лесных пожаров обеспечивается штатными средствами, которые используются при тушении пожаров техногенного характера. При этом возможность применения огнезащитных экранов практически невозможна. Для защиты пожарных от огня в экстремальных ситуациях были разработаны специальные огнезащитные средства коллективного пользования в виде несгораемых укрытий и индивидуальные в виде накидок, так называемые «пожарные одеяла»

Так, было разработано пожарное одеяло «Fire Blanket», представляющее собой плащ-палатку (рис. 5), выполненную из керамоволокна и имеющую поверхность с высокой отражательной способностью [11]. Такой тент имеет вес всего 3,2 килограмма и способен противостоять температуре 1648 градусов по шкале Цельсия. Как заверяет производитель, это значительно больше, чем средняя температура в эпицентре лесного пожара – она составляет 1315 градусов Цельсия.

Основой для создания новых тентов послужил материал, который использовался НАСА для защиты космических аппаратов при входе их в плотные слои атмосферы при возвращении на Землю. Принципиальное отличие такого материала от ранее используемых пожарными заключается в эффективной защите не только от лучистого, но и от конвективного тепла.

Команда ученых из NASA и Кейсовского университета (штат Огайо), полагает, что специальные противопожарные «одеяла» можно применить и для за-

щиты от огня строений. Для этого предлагается разворачивать теплозащитные экраны, а также использовать технику оборачивания специальными огнеупорными тканями. При этом основная трудность возникает с реализацией протокола разворачивания защитных конструкций.



Рисунок 5 – Огнезащитная плащ-палатка

Успехи, достигнутые российскими учеными в области создания огнестойких теплозащитных материалов для космических аппаратов, позволяют успешно решить задачу по разработке коллективных и индивидуальных средств спасения пожарных при тушении лесных пожаров. К этим средствам защиты предъявляется ряд комплексных требований: высокие огнестойкость и теплозащитные свойства; малый вес; хорошая химическая стойкость при высоких и низких температурах; пониженная гигроскопическая стойкость; низкий показатель дымообразования; малая продолжительность и легкость разворачивания средств в экстремальных условиях

Для решения задачи по отводу лучистого теплового потока наружная и внутренняя поверхность защитных средств должны иметь металлизированные светоотражающие покрытия на основе жаропрочных материалов. Огнестойкость наружных поверхностей может быть обеспечена на основе применения тугоплавких оксидных волокон. Для этих целей могут быть использованы волокна на основе аморфного диоксида кремния, карбида кремния, оксидов алюминия и циркония, имеющие высокие показатели по огнестойкости. Кремнеземное волокно может применяться при нагреве до 1150 °С, волокно из карбида кремния – 1350 °С, а волокна на основе оксида алюминия и оксида циркония более 1600 °С. Наибольшую перспективу применения имеют материалы на основе волокон оксида алюминия, которые используются при температурах до 1750 °С.

В последние годы в ВИАМ разработаны технологии получения непре-

рывных волокон на основе системы $Al_2O_3-SiO_2$, что позволяет изготовить высокотемпературные теплозащитные ткани с их использованием [12,13].

Для снижения конвективного теплового потока материалы должны обладать высокими теплоизоляционными свойствами. Для решения этой задачи могут быть использованы высокопористые теплозащитные покрытия на основе оксида алюминия. Повышение теплозащитных свойств этого материала может быть достигнуто в результате использования дополнительного наполнителя в виде интеркалированного графита, который обладает свойством терморасширения и пенообразования под воздействием интенсивного теплового потока.

Техническое решение задачи по созданию эффективного теплозащитного укрытия для личного состава пожарных подразделений в условиях лесных пожаров требует проведения дальнейших комплексных исследований.

Литература

1. Копылов Н.П., Хасанов И.Р. Лесоторфяные пожары и их влияние на окружающую среду // Пожарная безопасность. 2013. № 2. С. 95-103.
2. Пожарная техника: учеб. / под ред. М.Д. Безбородько. М.: Академия ГПС МЧС России, 2004. 550 с.
3. Левчик Г.Ф., Селевич А.Ф., Левчик С.В., Леснискович А.И. Тепловое поведение смесей полифосфата аммония с неорганическими соединениями. Часть I: Тальк // *Thermochimica Acta*. 1994. С.41-49.
4. Фиалков А.С. Углерод, межслоевые соединения и композиты на его основе. М.: Аспект-пресс, 1997. 717 с.
5. Ненахов С.А. Влияние наполнителей на структуры пенококса на основе полифосфата аммония / Пименова В.П., Натейкина Л.И. // Пожаровзрывобезопасность. 2009. № 7.
6. Рекомендации по применению теплозащитных экранов. М.: ВНИИПО, 2012. 29 с.
7. Экраны «Согда» / Н.Н. Брушлинский, Н.П. Копылов, М.Х. Усманов, В.Ю. Шимко // Пожарное дело. 2009. Вып. 11. С. 34-35.
8. Федеральный закон «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности». М.: ВНИИПО, 2012. 148 с.
9. ГОСТ 25131-82 «Покрытие по стали вспучивающееся огнезащитное ВПМ-2».
10. ТУ 5728-001-75250588-14.
11. Официальный сайт N+1: научные статьи, новости, открытия [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://nplus1.ru/>.
12. Каблов Е.Н. Тенденции и ориентиры инновационного развития России: Сб. научно-информационных материалов. М.: ВИАМ, 2013. 543 с.
13. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. № 8. С. 7-17.

УДК 621.762.222

Механическая активация циркония совместно с деструктурируемым полимером в различных атмосферах

В.А. Титова, аспирант,
В.П. Рева, кандидат технических наук, доцент,
Дальневосточный федеральный университет (ДФУ), г. Владивосток

В статье рассмотрены механохимические процессы, реализуемые в результате механоактивации циркония совместно с деструктурируемым полимером при использовании различных рабочих атмосфер. Рассмотрен фазовый состав порошковых материалов.

Полиметилметакрилат, механохимический синтез, карбид циркония.

Mechanical activation of zirconium with a degradable polymer in various atmospheres

V.A. Titova, post-graduate student,
V.P. Reva, Ph.D (Tech), assistant professor,
Far Eastern Federal University (FEFU), Vladivostok

The article discusses the mechanochemical processes realized as a result of mechanical activation of zirconium with a degradable polymer using different working atmospheres. The phase composition of powder materials is considered.

Polymethylmethacrylate, mechanochemical synthesis, zirconium carbide.

Диспергирование металлов в присутствии высокомолекулярных соединений, подвергаемым в процессе обработки механодеструкции, сопровождается реализацией энергетически более выгодного процесса дезинтеграции металла, чем при использовании низкомолекулярных поверхностно-активных веществ [1]. В аналогичных обстоятельствах скорость развития трещины достаточно сильно зависит от темпов механохимических процессов и явлений, где происходит концентрирование объектов термо- и механокрекинга, что формируются в непосредственной близости к трещине [2].

Механическая обработка показала любопытные результаты реализации механокрекинга при генерации водорода и других газообразных компонентов [3,4]. Это позволяет рассматривать механохимические явления при непосредственном влиянии циркония совместно с высокомолекулярными соединениями [5,6].

Ключевая задача нашего исследования заключается в тщательном исследовании влияния атмосферы на процессы механохимического характера, при условии активного использования циркония совместно с полимером деструктурируемого характера.

Для проведения исследования решено использовать цирконий порошкового состояния марки ПЦрК-1, произведенный кальцийтермическим восстановлением двуокси циркония. Для того чтобы провести в соответствующих условиях эксперимент, произвели нагрев циркония до 150 °С. Временной интервал составляет 3 часа воздействия высоких температур в сушильном шкафу. Для осуществления процесса соединения решено использовать эмульсионный полиметилметакрилат (ПММА). При этом, ключевым процессом влияния на химическое вещество стало вибрационное воздействие [7]. При осуществлении процесса в подобных условиях наблюдается характерное снижение уровня кислорода, при этом энергия активации составляет всего лишь 60 ккал/моль, что является низким уровнем процесса термодеструкции. За счет того, что выбран способ вибрационной обработки удалось существенно снизить потенциальные энергетические затраты, включая и снижение уровня влияния процесса на окружающую среду.

Вся вибрационная обработка проводилась в герметичном контейнере, что стабильно работал в формате вибрмельницы с частотой 750 мин⁻¹. При этом амплитуда всегда должна быть стабильной и составляет 90 мм. Чтобы провести необходимый эксперимент, механореактор решено поместить в сушильный шкаф, где на протяжении одного часа происходила выдержка при +28 °С.

Процесс механоактивации рассматриваемой комбинации «Zr + ПММА» для корректности получения результатов сначала осуществлялся в нормальной рабочей атмосфере. После фиксации необходимых результатов, эксперимент проводился в присутствии газообразных продуктов. В роли рабочей атмосферы применялись кислород, азот и аргон. Шары из стали ШХ15 выступили в качестве размалывающих тел.

Нам удалось провести анализ процесса механической активации на фазовый состав. При этом решено использовать рентген, как основополагающий метод получения информации о состоянии продукта. Особенностью использованного рентгеновского режима является немного увеличенное Ка-излучение при остальных нормах, что находятся в пределах допустимых значений. Для проведения подобного анализа оптимальным является использование дифрактометра немецкой фирмы «Bruker». Установление соединений, что присутствуют в образцах, проводилось при использовании автоматического режима EVA с использованием банка порошковых данных PDF-2.

На первоначальном этапе экспериментов механоактивация металл-полимерной композиции проводилась в воздушной атмосфере.

Ниже представлено изменение температуры механореактора от времени механоактивации композиции «Zr + 5 вес. % ПММА» (рис. 1).

Как видно (рис. 1а), через семь секунд механоактивации композиции «Zr + 5 вес. % ПММА» появляется неравномерное повышения температуры механореактора ($t_{\text{мр}} 1 - t_{\text{мр}} 2$) за счет реализации механохимических реакций с экзотермическим эффектом. Если продолжить обработку композиции «Zr + 5 вес. % ПММА» вплоть до 40 мин, то её термограмма будет иметь вид, представленный на рисунке 1б.

Наиболее интенсивно температура механореактора увеличивалась в течение начальных 15 мин, достигая 80 °С.

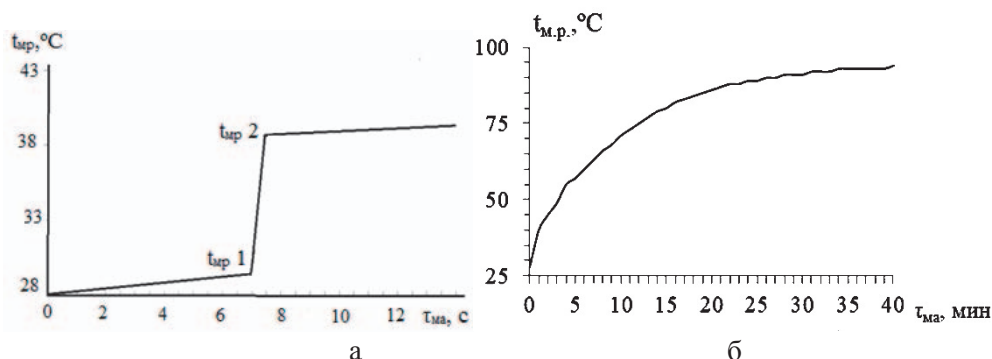


Рисунок 1 – Изменение температуры механореактора в зависимости от времени механоактивации композиции «Zr + 5 вес. % ПММА»: а – 0÷14с; б – 0÷40мин

Представлен фазовый состав порошковых продуктов, полученных после механоактивации композиции «Zr + 5 вес. % ПММА» в течение 9 сек (0,15 мин) с фиксацией экзотермического эффекта (рис. 2). Как видно, в исследуемом порошке наблюдается чистый цирконий, оксид, нитрид и карбид циркония. Очевидно, что экзотермический эффект обусловлен реакцией окисления циркония кислородом воздушной атмосферы, находящейся в рабочем объеме механореактора, а также частичной реализацией синтеза карбида циркония (за счет взаимодействия циркония с продуктами термодеструкции полимера) и нитрида циркония (за счет взаимодействия циркония с азотом воздушной атмосферы).

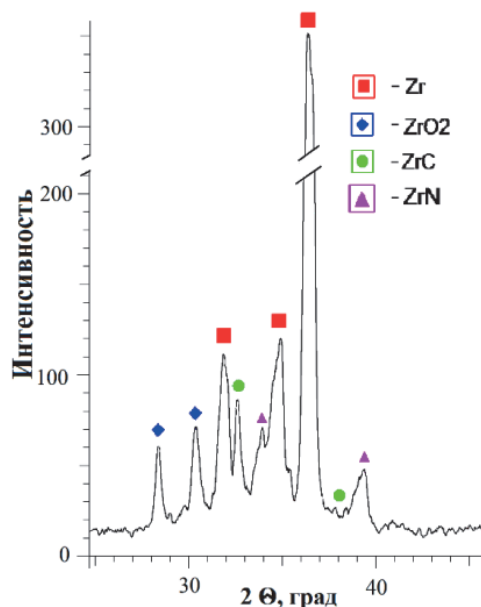


Рисунок 2 – Фазовый состав композиции «Zr + 5 вес. % ПММА» после механоактивации в течение 0,15 мин в воздушной атмосфере

Увеличение времени механоактивации до 25 мин (рис. 3а) приводит к увеличению содержания карбида ZrC (за счет взаимодействия циркония с продуктами механодеструкции полимера) и нитрида ZrN (за счет вовлечения азота воздушной атмосферы в реализуемые механохимические процессы). Содержание оксида ZrO₂ остается практически неизменным, так как основной объем кислорода воздушной атмосферы уже участвовал в реакции окисления циркония на первых секундах обработки. Регистрация рефлексов железа свидетельствует об абразивном истирании стальных размольных тел в процессе вибрационной обработки, вследствие значительного содержания ZrC в объеме порошкового композита.

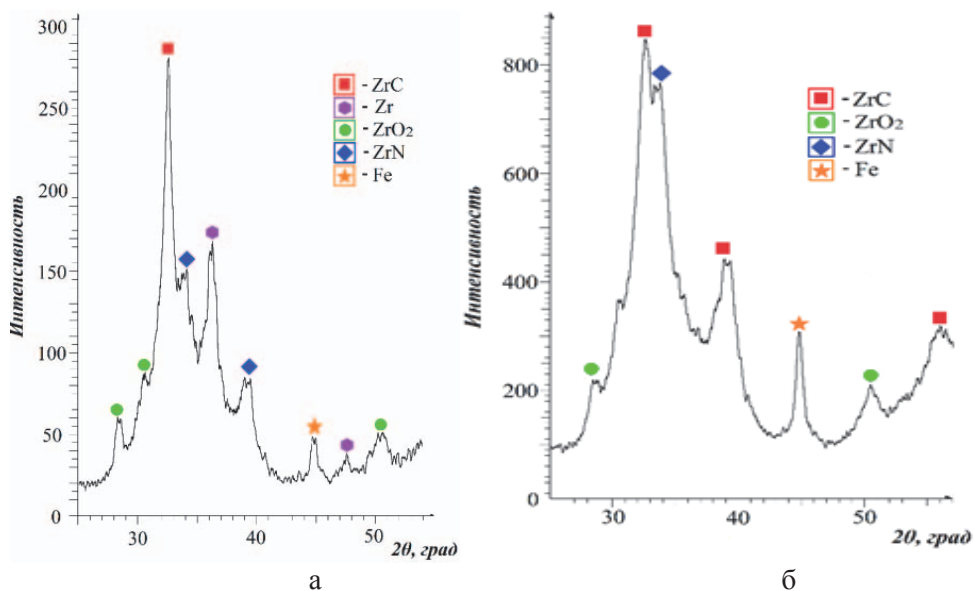


Рисунок 3 – Рентгенофазовый анализ композиции «Zr + ПММА».
Время механоактивации: а – 25 мин., б – 40 мин

Дальнейшее увеличение времени обработки способствует исчезновению рефлексов циркония за счет увеличения содержания карбида и нитрида циркония, а также увеличению содержания железа (рис. 3б).

Для уточнения влияния рабочей атмосферы механореактора на реализацию механохимических процессов при механоактивации композиции «Zr + 5 вес. % ПММА», была проведена виброобработка последней в течение 25 мин в атмосфере аргона. Скачкообразного повышения температуры механореактора не было выявлено в течение всего времени обработки исследуемой композиции.

Представлен (рис. 4) фазовый состав порошковых продуктов, полученных после механоактивации композиции «Zr + 5 вес. % ПММА» в течение 25 мин в атмосфере аргона.

Отсутствие кислорода в рабочей атмосфере механореактора, а значит и

отсутствие реакции окисления циркония, стимулирующей термо- и механодеструкцию полимера, приводит к препятствованию реализации механохимического синтеза карбида циркония. Если в случае механоактивации композиции «Zr + 5 вес. % ПММА» в воздушной атмосфере через 25 мин обработки превалирует ZrC (рис.3а), то при обработке исследуемой композиции в среде аргона механохимический синтез карбида и нитрида циркония не реализуется. Отсутствие карбида и нитрида циркония в обрабатываемом порошковом материале отразилось на минимальном содержании в нем железа за счет истирания размоленных тел. Наличие рефлексов оксида циркония, очевидно, связано с окислением циркония во время разгерметизации и разгрузки механореактора.

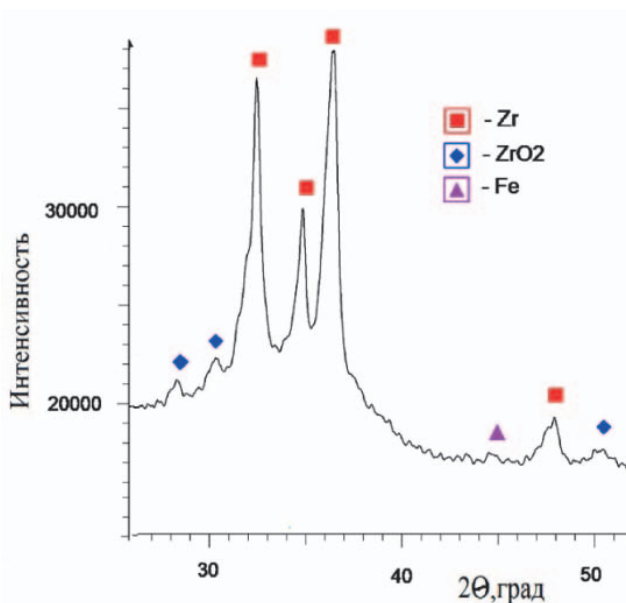


Рисунок 4 – Фазовый состав композиции «Zr + 5 вес. % ПММА» после механоактивации в течение 25 мин в атмосфере аргона

Если в качестве рабочей атмосферы при механоактивации композиции «Zr + 5 вес. % ПММА» использовать не воздух, а чистый кислород, то скачкообразное повышение температуры механореактора происходит через 2 секунды обработки, при этом прирост температуры составляет 17 °С. На дифрактограмме данного порошкового продукта фиксируются рефлексы циркония, карбида и оксида циркония.

Увеличение времени механоактивации до 25 мин приводит к полному исчезновению рефлексов циркония и дополнительному появлению рефлексов гидрида циркония (рис. 5) и железа. Очевидно, что гидрид циркония образовался за счет взаимодействия циркония с продуктами термо- и механодеструкции ПММА.

В процессе механоактивации композиции «Zr + 5 вес. % ПММА» в атмо-

сфере азота скачкообразного повышения температуры механореактора не было выявлено в течение всего времени обработки.

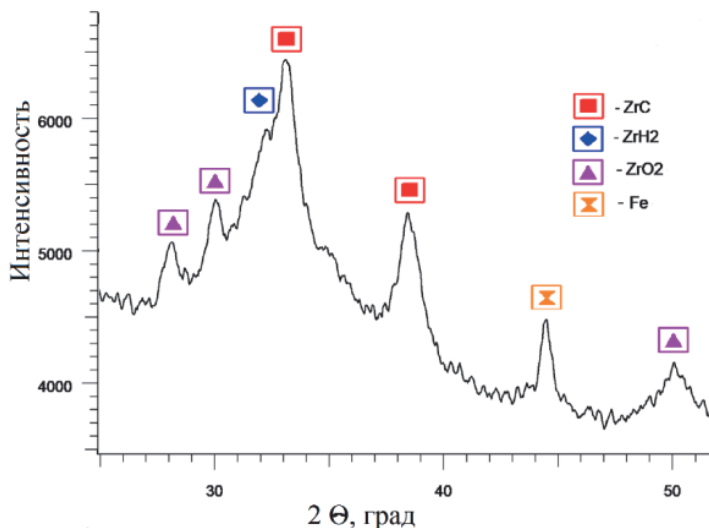


Рисунок 5 – Фазовый состав композиции «Zr + 5 вес. % ПММА» после механоактивации в течение 25 мин в атмосфере кислорода

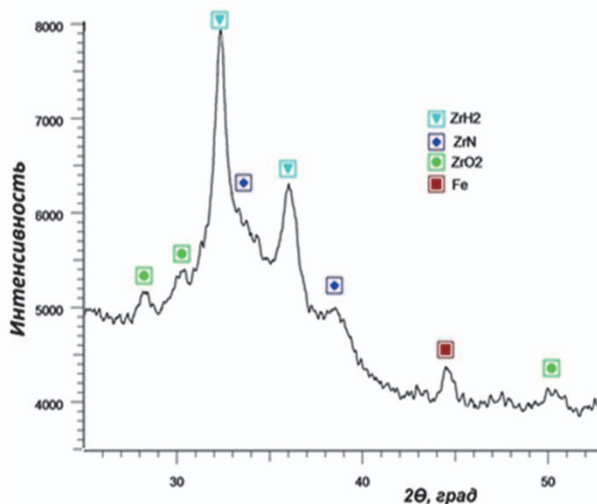


Рисунок 6 – Фазовый состав композиции «Zr + 5% ПММА» после механоактивации в течение 25 мин в атмосфере N₂

На рисунке 6 изображен фазовый состав порошка по завершении механоактивации композиции «Zr + 5% ПММА» общей продолжительностью 25 мин в атмосфере N₂. Как видно, в анализируемом порошке наблюдается гидрид, нитрид и оксид циркония, а также железо. Очевидно, что отсутствие экзотермического

эффекта за счет реакции окисления циркония в начальный период обработки не позволяет создать приемлемые энергетические условия для реализации механохимического синтеза карбида циркония. Наличие свободного водорода в продуктах механодеструкции ПММА и уровень подводимой механической энергии способствовали синтезу гидрида циркония, при этом присутствуют рефлекссы железа, обусловленные намолотом размоленных тел.

Известно, что гидриды циркония очень хрупки и легко поддаются измельчению [8]. Очевидно, что намолот размоленных тел обусловлен наличием в порошковом материале нитрида циркония.

В итоге, механоактивация порошковой композиции «Zr + 5 вес. % ПММА» способствует механохимическому синтезу порошкового композитного материала, состоящего из карбида, оксида циркония, нитрида и железа. Композитный материал обладает оптимальным химическим составом для производства огнеупорных и абразивных материалов, а также для применения в порошковой и традиционной металлургии. Инициатором механохимических процессов при механоактивации композиции «Zr + ПММА» в воздушной атмосфере является реакция окисления циркония, способствующая реализации термодеструкции полимера, с вовлечением продуктов крекинга полимера в синтез карбида циркония. В качестве рабочей атмосферы при механоактивации композиции «Zr + ПММА» целесообразно применять воздушную атмосферу.

Литература

1. Гороховский Г.А., Чернышев В.Г., Рева В.П. Получение металлических порошков методом измельчения стружкоотходов // Порошковая металлургия. 1988. № 12. С. 1-8.
2. Reva V.P. The Mechanism of Metal Dispersion in the Presence of a Solid-Phase High Molecular Compound // Chemical and Petroleum Engineering. 2016. № 5. P. 1-5.
3. Гороховский Г.А., Дмитриева Т.В., Граевская Л.М. Встречные процессы механодеструкции и механополимеризации, сопровождающие механообработку системы ПММА-А и ММА-А // Укр.хим.журн. 1979. № 6. С.618-621.
4. Гороховский Г.А., Граевская Л.М. К вопросу о циклической прочности металлопластов // Докл. АН УРСР. Сер. Б. 1980. № 3. С.34-36.
5. Фундаментальные основы механической активации, механосинтеза и механохимических технологий / отв. ред. Е.Г. Аввакумов // Новосибирск: Издательство СО РАН. 2009. 343 с.
6. Болдырев В.В. Механохимия и механическая активация твердых веществ // Успехи химии. 2006. № 3. С. 203-216.
7. Кабанов В.А. Энциклопедия полимеров // М.: Советская энциклопедия. 1974. 1030 с.
8. Химия и технология редких и рассеянных элементов, ч. II / под ред. К. А. Большакова: учебное пособие для вузов // М.: Высшая школа. 1976. 360 с.

УДК 620.172,178

Анализ оценки неопределенности и погрешности результатов при измерении физико-механических параметров материалов

С.В. Фролов, кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой механики и инженерной графики, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Академия ГПС МЧС России», г. Москва

В статье изложен анализ оценки результатов измерений физико-механических параметров металлопродукции (прямые однократные измерения твердости и косвенные однократные измерения предела прочности) на основе расчетов границ погрешности и расширенной неопределенности в соответствии с требованиями национальных и международных стандартов. Приведены количественные расчеты степени увеличения границ расширенной неопределенности результата косвенных измерений предела прочности при учете коэффициентов чувствительности, что важно при оценке соответствия продукции установленным требованиям.

Физико-механические параметры, стандартная неопределенность, расширенная неопределенность, погрешность, коэффициенты чувствительности.

Analysis of uncertainty and error of results in measurement of physical and mechanical parameters of materials

S.V. Frolov, candidate. phys.-mat. of Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Mechanics and Engineering Graphics, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Academy of State Emergency Situations of Russia», Moscow

The article presents the analysis of the measurement results of physical and mechanical parameters of metal products (direct single hardness measurements and indirect single strength measurements) based on calculations of error limits and extended uncertainty in accordance with the requirements of national and international standards. Quantitative calculations of the extent of increased limits of extended uncertainty of the result of indirect measurements of ultimate strength are given taking into account sensitivity factors, which is important when assessing product compliance with established requirements.

Physical and mechanical parameters, standard uncertainty, extended uncertainty, error, sensitivity factors.

Совокупность физико-механических свойств металлопродукции определяет области ее применения в соответствии с предъявляемыми требованиями.

Эти свойства характеризуются такими параметрами как предел прочности, предел текучести, относительное удлинение, твердость и т.п. Измеренные значения подобных показателей включаются в декларацию производителя.

Часто возникающие спорные ситуации о соответствии (и дальнейшей применимости) металлопродукции установленным техническим требованиям заставляют особенно внимательно подходить к вопросам определения погрешности или неопределенности результатов измерения таких характеристик материала. Если результат измерения величины находится вблизи области допустимых значений, то без корректно рассчитанного значения интервала погрешности (неопределенности) невозможно делать выводы о дальнейшей применимости данного вида продукта. Это положение сформулировано в стандарте [1] и рекомендации этого стандарта позволяют свести к минимуму риск принятия ошибочного решения при оценке соответствия или несоответствия исследуемой продукции предъявляемым к ней требованиям.

При этом результат измерения, содержащий рассчитанную погрешность (неопределенность), необходимо сопровождать детальной схемой расчета этих значений с указанием конкретной экспериментальной выборки. Такие рекомендации содержатся в Руководстве по выражению неопределенности результатов измерений [2], а расчет расширенной неопределенности в соответствии с процедурами, изложенными в [2], проводят исходя из классификации неопределенности на две группы: типа «А» и типа «В».

Указанный подход позволяет снять многие спорные вопросы, возникающие у противоположной заинтересованной стороны, и дает возможность самостоятельно провести всю цепь расчетов с применением соответствующей нормативной документации.

Поскольку большая часть нормативной документации РФ ориентирована на применение подходов, основанных на понятии «погрешность», то представляется крайне полезным рассмотрение примеров анализа точностных характеристик результатов измерений с применением двух концепций – «погрешность» и «неопределенность». Разъяснения по поводу конкретики применения и использования терминов «погрешность измерения» и «неопределенность измерения» детально даны в Рекомендациях [3].

В настоящее время существует достаточно обширный материал нормативной документации по расчету неопределенности (погрешности), детализированный применительно к прямым или косвенным измерениям, к измерениям с многократными или однократными наблюдениями и т.д. Такая нормативная документация порой содержит приближенные схемы расчета погрешности (неопределенности) для конкретного вида измерений, но представляет всю последовательность необходимых процедур. Именно следование рекомендациям конкретного нормативного документа, и представляя изначальную экспериментальную выборку, можно аргументировано обсуждать значения погрешности полученного результата.

В следующих двух примерах рассматривается сравнительный анализ оценки расширенной неопределенности и суммарной погрешности результата измерения твердости по Супер-Роквеллу жести белой при значимой величине

неопределенности типа «В» – пример 1 и анализ оценки расширенной неопределенности с учетом влияния коэффициентов чувствительности при незначимой величине неопределенности типа «В» в случае определения предела прочности сплава технического алюминия – пример 2.

Пример 1.

Заказчику требуется определить твердость по Супер – Роквеллу (ГОСТ 13345-85) образца жести белой и указать суммарную погрешность или расширенную неопределенность полученного результата для вероятности 0,95.

Для определения твердости по Супер-Роквеллу (ГОСТ 13345-85) использовался прибор твердости ТПС 5009 с алмазной контактной поверхностью [6].

Результаты определения твердости представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты определения твердости по Супер-Роквеллу

Место замера	Число твердости HR30TA	Среднее значение HR30TA по образцу	Стандартная неопределенность (стандартное отклонение, СКО, S(X))
край	69,0; 67,0; 68,0	67,2	1,1
середина	66,0; 67,0; 66,0		

Измерения твердости относятся к измерениям прямым с однократными наблюдениями и расчет погрешности и неопределенности результата проводят согласно Рекомендаций [4].

Вычисленное стандартное отклонение $S(X)$ результата измерения по представленной выборке равно $S(X)=1,1$ единиц твердости (таблица 1). Далее, для расчета суммарной погрешности (и расширенной неопределенности) необходимо определиться с границами неисключенной систематической погрешности (НСП) Θ . Согласно [5], нормированная погрешность твердомера при соответствующих экспериментальных значениях составляет ± 2 единиц твердости.

Границы НСП для рассматриваемого примера, согласно п.6.1 Рекомендаций [4], определяются одной НСП твердомера и будут приниматься равными ± 2 единиц твердости. В данном примере не учитывались значения Θ границы НСП округления ввиду ее малости (до 0,5 единиц твердости).

Согласно п.8.3 Рекомендаций [4], доверительная граница погрешности результата измерений твердости равна:

$$\Delta(\mathbf{P}) = K[\Theta(\mathbf{P}) + \varepsilon(\mathbf{P})] = 0,76(2 + 2 \cdot 1,1) = 3,19 \text{ ед.тв.} \quad (1)$$

или с учетом округления $\Delta(\mathbf{P}) = 3,2$ ед. тв.

Воспользуемся этими же Рекомендациями [4] для расчета расширенной неопределенности результата измерения твердости по представленной выше экспериментальной выборке.

Так, согласно п.8.3 Рекомендаций [4] расширенная неопределенность для уровня доверия $P = 0,95$ равна

$$\mathbf{U}(\mathbf{P}) = k_0 (\mathbf{u}_A^2 + \mathbf{u}_B^2)^{1/2} = 2(1,1^2 + 4/3)^{1/2} = 3,19 \text{ ед. тв.} \quad (2)$$

или с учетом округления $\mathbf{U}(\mathbf{P}) = 3,2$ единиц твердости.

В данном примере рассчитанное значение стандартной неопределенности

u_B ($u_B = 1,15$) соизмеримо со значением стандартной неопределенности u_A ($u_A = 1,1$), значимо влияет на окончательную величину неопределенности $U(P)$.

Приведенный анализ показывает идентичность характеристик точности результата измерения, получаемый как с использованием рекомендуемой нормативной документации по расчету суммарной погрешности, так и расширенной неопределенности.

Таким образом, для внутренних заказчиков результат измерения твердости **67,2** может быть представлен с указанием доверительных границ суммарной погрешности $\pm\Delta(P) = \pm 3,2$, а международных – с указанием значений расширенной неопределенности $\pm U(P) = \pm 3,2$.

В **примере 2** анализируется расчет расширенной неопределенности результата определения предела прочности на разрыв образцов прямоугольного сечения сплава технического алюминия, описанного в [7]. Измеряемая характеристика S – предел прочности (σ_B) не является прямо измеряемой (как в случае измерения твердости сплава), а определяется через ряд других величин:

$$S = \sigma_B = F/T*W, \tag{3}$$

где F – сила разрыва,

T, W – толщина и ширина поперечного сечения образца;

S – предел прочности (обозначение для примера 2).

Каждая из участвующих в измерении величин (T, W, F) определяется с соответствующей стандартной неопределенностью, а именно $u(T), u(W)$ и $u(F)$.

В таблице 2 приведены значения толщины (T), ширины (W), усилия (F) и предела прочности (σ_B)= $F/T*W$ для пяти образцов, средние значения и средне-квадратичные отклонения (СКО) единичных измерений.

Таблица 2 – Экспериментальные данные механических характеристик пяти образцов

№ образца	Толщина (Т), <i>мм</i>	Ширина (W), <i>мм</i>	Усилие (F), <i>H</i>	Предел проч- ности, S (σ_B), <i>H/мм²</i>
1	3,150	12,675	3689,50	92,41
2	3,200	12,725	4000,66	98,25
3	3,175	12,700	3600,60	89,29
4	3,200	12,700	3867,31	95,16
5	3,150	12,675	3778,40	94,63
Среднее зна- чение	3,175	12,695	3787,30	93,95
СКО или $u(x_i)$ -станд. неопредел.	0,0254	0,0213	155,26	3,33

Если измеряемая величина f не является прямо измеренной, а зависит от N других измеряемых величин x_1, x_2, \dots, x_N через функциональную зависимость (косвенное измерение):

$$f = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_N), \quad (4)$$

то согласно [2] суммарная стандартная неопределенность (по типу «А») равна:

$$U_c^2(f) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 U_{(x_i)}^2, \quad (5)$$

$$\text{или } U_c^2(f) = \sum c_i^2 u_i^2 \quad (6)$$

где c_i – коэффициенты чувствительности.

Для приведенного выше примера коэффициенты чувствительности $c_i = \partial f / \partial x_i$ будут равны:

$$c_F = \frac{\partial S}{\partial S} = \frac{1}{TW} = \frac{S}{F}; \quad c_T = \frac{\partial S}{\partial T} = \frac{-F}{T^2 W} = \frac{-S}{T}; \quad c_W = \frac{\partial S}{\partial W} = \frac{-F}{T^2 W} = \frac{-S}{TW} \quad (7)$$

Подставляя значения, приведенные в таблице 1, можно получить:

$$c_F = \frac{S}{F} = \frac{93,93 \text{ Н/мм}^2}{3787,29 \text{ Н}} = +0,02488 \text{ мм}^{-2}$$

$$c_T = \frac{-S}{T} = \frac{-93,93 \text{ Н/мм}^2}{3,175 \text{ мм}} = -29,59 \text{ Н/мм}^3$$

$$c_W = \frac{-S}{W} = \frac{-93,93 \text{ Н/мм}^2}{12,675 \text{ мм}} = -7,40 \text{ Н/мм}^3$$

Поскольку среднеквадратичные отклонения для величин T , W и F , приведенные в таблице 1, являются соответствующими стандартными неопределенностями, суммарная стандартная неопределенность U_c будет равна:

$$U_c = \sqrt{c_F^2 U_F^2 + c_T^2 U_T^2 + c_W^2 U_W^2} =$$

$$= \sqrt{(0,0248)^2 (155,26)^2 + (-29,59)^2 (0,025)^2 + (-7,40)^2 (0,0212)^2} = 3,93$$

Н/мм^3

$$u_c = \sqrt{c_F^2 u_F^2 + c_T^2 u_T^2 + c_W^2 u_W^2} =$$

$$= \sqrt{(0,0248)^2 (155,26)^2 + (-29,59)^2 (0,025)^2 + (-7,40)^2 (0,0212)^2} = 3,93$$

Н/мм^3

Другой способ определения суммарной неопределенности U_c сводится к следующему: если анализируемая величина функционально связана с другими входящими величинами как $f = C x_1^{p_1} x_2^{p_2} \dots x_n^{p_n}$, то суммарная стандартная неопределенность U_c вычисляется согласно [2] из выражения:

$$\left[\frac{U_c(y)}{y}\right]^2 = \sum_{i=1}^n \left[\frac{p_i U_c(x_i)}{x_i}\right]^2 \quad (8)$$

В рассматриваемом примере функциональную зависимость $S = F/T * W$ можно записать в виде $S = F * (T^{-1}) * (W^1)$, тогда

$$\left[\frac{U_c(S)}{y}\right]^2 = \left[\frac{(1)(155,26)}{3787,30}\right]^2 + \left[\frac{(-1)(0,025)}{3,175}\right]^2 + \left[\frac{(-1)(0,0212)}{12,695}\right]^2 = 0,001747 \quad (9)$$

$$\frac{U_c(S)}{y} = \sqrt{0,001747} = 0,0418 \quad (10)$$

Отсюда $U_c = 0,0418S = 0,0418 \cdot 93,95 = 3,93 \text{ Н/мм}^2$

Как видно из полученных результатов, различие в значениях для U_c , оцененных двумя способами, отсутствует, хотя такая ситуация наблюдается только для случая слабо коррелированных входных величин.

Учет коэффициентов корреляции между величинами T, W и F дает для суммарной стандартной неопределенности (по типу «А») U_c значение $3,94 \text{ Н/мм}^2$, т.е. корреляционный вклад незначителен и им можно пренебречь.

Для расчета стандартной неопределенности по типу «В» принимается в внимание нормируемое значение погрешности измерения усилия растяжения в диапазоне нагрузки от 200кгс до 1000кгс равное $\pm 1\%$ в соответствии с Техническими характеристиками на разрывные машины типа РМ-5. Тогда границы НСП определения среднего значения предела прочности (σ_v) принимаются равными $\Theta \pm 0,94 \text{ Н/мм}^2$ и стандартная неопределенность по типу «В» согласно [8] будет равна:

$$u_B = \sqrt{\frac{\theta^2}{3}} = (0,94^2 / 3)^{1/2} = 0,54 \text{ (Н/мм}^2\text{)}$$

Расширенная неопределенность результатов равна согласно [8]:

$$U(P) = k_0 \sqrt{u_A^2 + u_B^2} = 2 \sqrt{3,93^2 + 0,94^2 / \sqrt{3}^2} = 7,94 \sim 7,9 \text{ (Н/мм}^2\text{)}$$

Следует заметить, что здесь коэффициент охвата $k_0=2$ был использован, согласно [8], как нижняя граница диапазона его применимости от 2 до 3. В общем случае коэффициент охвата определяется через эффективное число степеней свободы и квантиль распределения Стьюдента [8].

Показано, что найденный по пяти образцам конечный результат величины предела прочности σ_v с доверительной вероятностью 0,95 составляет **93,95 \pm 7,94 (Н/мм²)**, а с учетом округления – **94,0 \pm 7,9 (Н/мм²)**.

Если для расчета расширенной неопределенности за стандартную неопределенность u_A по типу «А» принять значение СКО величины предела прочности, приведенное в таблице 1, которое составляет $3,33 \text{ Н/мм}^2$ и не учитывает коэффициенты чувствительности, то интервал расширенной неопределенности более узкий и равен:

$$U(P) = k_0 \sqrt{u_A^2 + u_B^2} = 2 \sqrt{3,33^2 + 0,94^2 / \sqrt{3}^2} = 6,74 \sim 6,7 \text{ (Н/мм}^2\text{)}$$

Представляя оценку значения предела прочности с привлечением доверительного интервала получаем **93,95 \pm 6,74 (Н/мм²)** или с учетом округления **94,0 \pm 6,7 (Н/мм²)**.

Видно, что в данном примере учет коэффициентов чувствительности необходим для расчета расширенной неопределенности результата измерения (особенно в спорных ситуациях соответствия металлопродукции установленным требованиям). Влияние значения НСП в данном примере несущественно.

Таким образом, на примере анализа результатов прямых однократных измерений показана идентичность оценки точности результата измерения, полу-

чаемой как с использованием национальной нормативной документации, так и международных стандартов при расчете суммарной погрешности и расширенной неопределенности. Для измерений однократных косвенных важен учет коэффициентов чувствительности, вклад которых в бюджет расширенной неопределенности может быть значительно больше неопределенности по типу «В». Если не принимать этого в расчет получается более узкий диапазон значений неопределенности результата измерений, что может привести к неверным выводам при оценке соответствия металлопродукции заявленным требованиям.

Литература

1. ГОСТ Р ИСО 1576-2006. Статистические методы. Руководство по оценке соответствия установленным требованиям. Часть 1.
2. ГОСТ 34100.3-2017/ ISO/ISC Guide 98-3:2008. Межгосударственный стандарт. Неопределенность измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределенности измерения.
3. Рекомендации по межгосударственной стандартизации. РМГ 91-2019. Использование понятий «погрешность измерения» и «неопределенность измерений».
4. Рекомендации по метрологии Р.50.2.038-2004 «Измерения прямые однократные. Оценивание погрешностей и неопределенности результата измерений».
5. ГОСТ 23677-79 – «Твердомеры для металлов. Общие требования».
6. Фролов С.В., Вернидуб О.Д. Методологические аспекты определения погрешности и неопределенности результата измерения твердости материала в практике современной испытательной лаборатории // Современная лабораторная практика. 2015. № 3(31). с. 19-20.
7. Фролов С.В., Вернидуб О.Д. Оценка неопределенности результатов при определении физико-механических характеристик металлопродукции // Проблемы черной металлургии и материаловедения. 2010. № 2. с.101-104.
8. РМГ 43-2001 Рекомендации по межгосударственной стандартизации. Применение «Руководства по выражению неопределенности измерений».

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

Подписано в печать 15.12.2021
Формат В5
Печать офсетная. Усл.печ.л. 10,2
Тираж 500 экз.
Заказ № 91-04
Отпечатано
в типографии
ООО «Научный консультант»
г. Москва
Хорошевское шоссе, 35, корп.2
Тел.: +7 (926) 609-32-93,
+7 (499) 195-60-77
E-mail :keyneslab@gmail.com
Site:www.n-ko.ru