

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 – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «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]; 2.5. Машиностроение [2.5.13. Проектирование, конструкция и производство летательных аппаратов]; 2.6. Химические технологии, науки о материалах, металлургия; [2.6.17. Материаловедение]

Подписной индекс в каталоге «Почта России» ПП997

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

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

Адрес редакции:  
141070, Королев,  
Ул. Октябрьская, 10а  
Тел. (495)543-34-30 (доб.138),  
E-mail: [rio-kimes@mail.ru](mailto:rio-kimes@mail.ru),  
Site: [www.unitech-mo.ru](http://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

### СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

Минитаева А.М.

**НОВЫЙ ОПЕРАТОР ТЕНЗОРНОГО ПРОИЗВЕДЕНИЯ И АНАЛИЗ НЕЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ С ПОЛИНОМИАЛЬНЫМИ ФУНКЦИЯМИ ПРОСТРАНСТВА СОСТОЯНИЙ.....3**

Михед А.Д., Шульженко С.Н.

**АНАЛИЗ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРЕДПРИЯТИЯ.....15**

Попова Е.С., Нефедов А.В.

**АНАЛИЗ РАБОТЫ МОДЕЛИ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ ИНФОРМАЦИОННОГО ПОИСКА В БОЛЬШОМ ОБЪЕМЕ ДАННЫХ.....24**

### МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ, КОМПЛЕКСОВ И КОМПЬЮТЕРНЫХ СЕТЕЙ

Артюшенко В.М., Воловач В.И.

**АНАЛИЗ ПОСТРОЕНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДВУМЕРНЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ И ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОДАВЛЕНИЯ НЕГАУССОВСКИХ ИМПУЛЬСНЫХ ПОМЕХ.....38**

Воловач В.И.

**МАТЕМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ АЛГОРИТМОВ ОЦЕНКИ ОШИБКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ МАНЕВРИРУЮЩИХ ОБЪЕКТОВ.....48**

Семенов А.Б., Артюшенко В.М.

**АНАЛИЗ СТРУКТУРИРОВАННЫХ КАБЕЛЬНЫХ СИСТЕМ В СИСТЕМНОЙ ТОЧКЕ БИФУРКАЦИИ. ВЕРТИКАЛЬНАЯ ИНТЕГРАЦИЯ И ОСОБЕННОСТИ ЕЕ ВНЕДРЕНИЯ.....56**

### ПРОЕКТИРОВАНИЕ, КОНСТРУКЦИЯ И ПРОИЗВОДСТВО ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Ахтамьянов Р.М., Ахтамьянова Л.Ш., Букатый А.С.

**ЭФФЕКТИВНОЕ ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ И ИНСТРУМЕНТОВ СИСТЕМНОГО ИНЖИНИРИНГА В ОПЫТНО-КОНСТРУКТОРСКИХ РАБОТАХ.....68**

## 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. Солянко В.Н., к.т.н.
18. Стреналиук Ю.В., д.т.н., профессор
19. Халиуллин В.И., д.т.н., профессор
20. Чесноков А.В., д.т.н.
21. Щурин К.В., д.т.н., профессор

Подписано в печать 20.09.2024

Формат В5

Печать офсетная. Усл.печ.л. 9,5

Тираж 500 экз.

Заказ № 97-03

Отпечатано в типографии  
ООО «Научный консультант»

г. Москва

Хорошевское шоссе, 35, корп. 2

Бершадский В.А.

**ВЛИЯНИЕ ДЕМПФИРУЮЩИХ ПЕРЕГОРОДОК  
В БАКЕ РАКЕТНОЙ ДВИГАТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ  
НА ПРОГРЕВ ТОПЛИВА.....85**

Серков А.С.

**ПРИМЕНЕНИЕ ШЕСТИКУЛАЧКОВОГО  
САМОЦЕНТРИРУЮЩЕГО СПИРАЛЬНО-РЕЕЧНОГО  
ПАТРОНА ДЛЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ  
ЗУБЧАТЫХ КОЛЁС МАЛОЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ  
ЖЁСТКОСТИ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В ЛЕТАТЕЛЬНЫХ  
АППАРАТАХ.....91**

Фалько А.Р.

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИБОРНОГО  
РАДИООБОРУДОВАНИЯ ИЗДЕЛИЙ  
РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ  
ПОСРЕДСТВОМ ОЦЕНКИ АТМОСФЕРНЫХ  
ЗАТУХАНИЙ РАДИОСИГНАЛА НА ТРАССЕ  
«КОСМОС – ЗЕМЛЯ».....98**

## МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Афонин А.В.

**КОНЦЕПЦИЯ ПРИМЕНЕНИЯ ИСКУССТВЕННОГО  
ИНТЕЛЛЕКТА ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ  
КРУПНОГАБАРИТНЫХ ДЕТАЛЕЙ РАКЕТНЫХ  
ДВИГАТЕЛЕЙ ПО ТЕХНОЛОГИИ ПРЯМОГО  
ЛАЗЕРНОГО ВЫРАЩИВАНИЯ.....111**

Ащеурова А.В., Сабо С.Е., Кузнецов Н.А., Тимошенко А.Д.

**ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННАЯ ОБРАБОТКА  
ПРИ 3Д ПЕЧАТИ.....120**

Воейко О.А., Суворова Т.А., Приданцева Ю.А., Райцис И.Д.

**ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА И СКОРОСТЬ  
ВНЕДРЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА  
ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ЗА СЧЁТ ПРИМЕНЕНИЯ  
КООРДИНАТНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ МАШИН.....137**

УДК 519.711.3, 514.743.2

## Новый оператор тензорного произведения и анализ нелинейных систем с полиномиальными функциями пространства состояний

Алина Мажитовна Минитаева, кандидат технических наук,

доцент кафедры Компьютерные системы и сети,

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», г. Москва

*В статье предлагаются формы записи с использованием тензоров или многоиндексных объектов уравнений состояния нелинейных систем управления с полиномиальными функциями пространства состояний. Вводится новый бинарный оператор алгебры многоиндексных объектов и тензорной алгебры, доказываются его свойства. Предлагается способ анализа решетчатых функций и моделирования нелинейных систем управления с дискретным временем, основанный на множественной полиномиальной регрессии.*

Нелинейные системы управления, решетчатые функции, множественная полиномиальная регрессия, многоиндексные объекты, тензоры, тензорное исчисление, тензорная алгебра, тензорное произведение.

## A novel tensor product operator and analysis of nonlinear systems with polynomial state space functions

Alina Mazhitovna Minitaeva, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Computer Systems and Networks,

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Bauman Moscow State Technical University (National Research University)», Moscow

*The paper proposes the tensor notation of state equations of nonlinear control systems with polynomial state space functions. A new binary operator of the algebra of multiindex objects and tensor algebra is introduced and its properties are proved as 2 theorems. The method of lattice function analysis and modeling of discrete-time nonlinear control systems based on multiple polynomial regression is presented.*

Nonlinear control system, lattice function, multiple polynomial regression, multi-index object, tensor, tensor algebra, tensor product.

### Введение

За последние десять лет были проведены значительные исследования [1, 10], направленные на анализ внутренней нелинейной структуры, присутствующей в сигналах [26] и/или моделях ввода-вывода, для повышения эффективности моделирования нелинейных систем. Этому начинанию способствовало использование сначала в линейных системах тензоров [16], которые служат фундамен-

тальными конструкциями в полилинейной алгебре, что привело к развитию подходов к моделированию нелинейных систем, основанных на тензорах [10]. Тензорные методы создают подпространства низкого ранга для работы с многопараметрическими [18] и многомерными [19] моделями.

В настоящее время системы управления обычно представляются системой дифференциальных или разностных уравнений в пространстве состояний [5]. Для линейных систем управления с непрерывным временем без явной прямой связи [4]:

$$x' = Ax + Bu;$$

$$y = Cx,$$

и для линейных систем управления с дискретным временем:

$$\begin{aligned} x[n+1] &= Ax[n] + Bu[n]; \\ y[n] &= Cx[n], \end{aligned} \quad (1)$$

В нелинейных системах управления сейчас принята векторная запись  $x' = f(t, x, u)$  или для дискретного времени [6]:

$$\begin{aligned} x[n+1] &= f(nT, x[n], u[n]); \\ y[n] &= h(nT, x[n]), \end{aligned} \quad (2)$$

Векторы  $x, u, f, h$  выглядят следующим образом:

$$\begin{aligned} x[n] &= \begin{pmatrix} x_1[n] \\ x_2[n] \\ \dots \\ x_s[n] \end{pmatrix}, u[n] = \begin{pmatrix} u_1[n] \\ u_2[n] \\ \dots \\ u_m[n] \end{pmatrix}, f(nT, x[n], u[n]) = \begin{pmatrix} f_1(nT, x[n], u[n]) \\ f_2(nT, x[n], u[n]) \\ \dots \\ f_s(nT, x[n], u[n]) \end{pmatrix}, \\ h(nT, x[n]) &= \begin{pmatrix} h_1(nT, x[n]) \\ h_2(nT, x[n]) \\ \dots \\ h_g(nT, x[n]) \end{pmatrix}, \end{aligned} \quad (3)$$

## 1. Множественная полиномиальная регрессия решетчатой функции пространства состояний

Рассмотрим решетчатую функцию пространства состояний  $f_i(nT, x[n], u[n]), i = 1, 2, \dots, s$  из (3) – она определена на множестве значений  $\{x(kT), u(kT)\}, k = 1, 2, \dots, N$ , где  $x(kT), u(kT)$  представляют собой временные

ряды длиной  $NT$  без пропусков. При этом  $f_i$  в зависимости от целей моделирования может иметь или не иметь аналитическое представление. В обоих случаях допустимо методами регрессионного анализа (например, аппроксимирующие поверхности, полиномиальная квантильная регрессия [3], поверхности отклика

[9], интеллектуальные методы на основе машинного обучения [11, 12], полиномы Чебышева [13], метод факторизации симультанных уравнений [14]) найти полином нескольких переменных, количество членов которого (и число переменных-регрессоров) в общем виде будет зависеть от рассматриваемого случая:

- линейная часть управления (регрессорами являются только  $s$  переменных состояния);

- отдельная нелинейная часть управления (регрессорами по отдельности являются переменные состояния и переменные управления, а множественная полиномиальная регрессия применяется дважды [25] – отдельно для  $s$  предикторов и отдельно для  $m$  предикторов);

- общая нелинейность состояния и управления ( $s+m$  регрессорами являются и переменные состояния, и переменные управления).

Обозначим полиномиальную функцию, которая после применения множественной полиномиальной регрессии будет представлять  $i$ -ую решетчатую функцию, как  $\hat{f}_i$ . Осуществим регрессионный переход к полиномиальной форме:

$$f_i(nT, x[n], u[n]) \rightarrow \hat{f}_i(t, x, u).$$

1. В случае линейной части управления полиномиальная форма представима в виде суммы:

$$\hat{f}_i(nT, x, u) = \hat{f}_{ix}(t, x) + \hat{f}_{iu}(t, u), \quad (4)$$

где часть состояния  $\hat{f}_{ix}(t, x)$  – это полином  $s$  переменных степени  $p$ ; часть управления  $\hat{f}_{iu}(t, u) = Bu$ , как в линейных системах;  $B$  – это матрица управления.

2. В случае отдельной нелинейной части управления выражение (4) также справедливо.

Однако, часть управления  $\hat{f}_{iu}(t, u)$  – это уже полином  $m$  переменных степени  $q$ .

Итак, в случаях 1 и 2 часть состояния выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned} \hat{f}_{ix}(t, x) &= \hat{f}_{ix}(t, x_1, x_2, \dots, x_s) = \\ &= \sum a_{k_1, k_2, \dots, k_s} x_1^{k_1} x_2^{k_2} \times \dots \times x_s^{k_s} = \\ &= \sum a_{k_1, k_2, \dots, k_s} \prod_{j=1}^s x_j^{k_j}, \end{aligned} \quad (5)$$

где суммирование производится по всем различным упорядоченным наборам (мультииндексам). По теореме Безу полином (5) имеет  $C_{p+s}^p$  членов. В рамках рассмотрения систем управления с однородными дифференциальными уравнениями свободный член не рассматриваем, поэтому количество членов на 1 меньше:  $C_{p+s}^p - 1$ .

Аналогично выражению (5) для случая 2 часть управления может быть представлена в виде:

$$\hat{f}_{iu}(t, u) = \sum b_{k_1, k_2, \dots, k_m} \prod_{j=1}^m u_j^{k_j}. \quad (6)$$

Число членов полинома (6) по теореме Безу равно  $C_{q+m}^q - 1$ .

3. В случае общей нелинейности состояния и управления полиномиальную форму для  $i$ -ой решетчатой функции уже нельзя представить в виде суммы отдельных функций (частей состояния и управления) с отдельными векторными аргументами  $x$  и  $u$ , т.е. равенство (2) не выполняется.

В этом случае  $\hat{f}_i(t, x, u)$  – это полином  $s+m$  переменных:

$$\hat{f}_i(x, u) = \sum a_{k_1, k_2, \dots, k_s, r_1, r_2, \dots, r_m} \prod_{j, l=1}^{s, m} x_j^{k_j} u_l^{r_l}. \quad (7)$$

Если полином (7) имеет степень  $p$ , то число его членов без свободного коэффициента равно  $C_{p+s+m}^p - 1$ .

Без потери общности можно считать вышеописанные варианты 1 и 2 частными случаями варианта 3: при  $p > m$  случай 2 может быть преобразован в случай 3 заменой  $m$  переменных вектора  $x$  на переменные  $u$ , а точнее их переносом из вектора  $x$  в вектор  $u$ ; в первом случае такое действие аналогично возможно, потому что  $m = 1$ .

## 2. Тензорная форма записи уравнения состояния нелинейной системы управления с полиномиальными функциями пространства состояний

В силу последнего вывода для начала ограничимся рассмотрением случая 1, т.е. полинома (5), и приведем два примера.

**Пример 1.**  $p = 2, s = 2$ . Полином содержит  $C_4^2 - 1 = 5$  членов:

$$\hat{f}_{ix}(t, x) = \hat{f}_{ix}(t, x_1, x_2) = a_{i,2,0}x_1^2 + a_{i,1,1}x_1x_2 + a_{i,0,2}x_2^2 + a_{i,1,0}x_1 + a_{i,0,1}x_2.$$

Назовем

$$X_C = \begin{pmatrix} 0 & x_2 & x_2^2 \\ x_1 & x_1x_2 & 0 \\ x_1^2 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (8)$$

матрицей сочетаний переменных состояния, а

$$A_i = \begin{pmatrix} 0 & a_{i,0,1} & a_{i,0,2} \\ a_{i,1,0} & a_{i,1,1} & 0 \\ a_{i,2,0} & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (9)$$

матрицей коэффициентов полинома состояния  $i$ -го уравнения состояния.

Для всей системы из  $s = 2$  уравнений можно говорить о многоиндексном объекте ранга 3:

$$A = \begin{pmatrix} 0 & a_{1,0,1} & a_{1,0,2} \\ a_{1,1,0} & a_{1,1,1} & 0 \\ a_{1,2,0} & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & a_{2,0,1} & a_{2,0,2} \\ a_{2,1,0} & a_{2,1,1} & 0 \\ a_{2,2,0} & 0 & 0 \end{pmatrix}, A \in \square^{2 \times 3 \times 3}. \quad (10)$$

Также создадим многоиндексный объект ранга 3 из матрицы  $X_C$  (8), продублировав ее в качестве его сечения:

$$X = \begin{pmatrix} 0 & x_2 & x_2^2 \\ x_1 & x_1 x_2 & 0 \\ x_1^2 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & x_2 & x_2^2 \\ x_1 & x_1 x_2 & 0 \\ x_1^2 & 0 & 0 \end{pmatrix}, X \in \mathbf{X}^{2 \times 3 \times 3}, \quad (11)$$

где  $X$  – это бесконечное множество одночленов из переменных вектора  $x$ .

Теперь аналогично уравнению в матричной форме (1) можно записать уравнение (2) в форме многоиндексных объектов:

$$x_i[n+1] = A_i \times^{\phi\rho} X_C + B_i u[n], \quad (12)$$

где  $\times$  – бинарный оператор фробениусова скалярного произведения (или стандартного скалярного произведения), определенного на пространствах любого ранга  $\square^{d_1 \times d_2 \times \dots \times d_r}$ :

$$A \times^{\phi\rho} B = \sum_{i=1}^{d_1} \sum_{j=1}^{d_2} \dots \sum_{k=1}^{d_r} a_{i,j,\dots,k} b_{i,j,\dots,k}.$$

Мы рассматриваем случай 1 с линейной частью управления, поэтому в уравнении (12)  $B$  осталась матрицей.

**Пример 2.**  $p = 2, s = 3$ . Полином содержит  $C_5^2 - 1 = 9$  членов:

$$\hat{f}_{ix}(t, x) = \hat{f}_{ix}(t, x_1, x_2, x_3) = a_{i,2,0,0}x_1^2 + a_{i,1,1,0}x_1x_2 + a_{i,1,0,1}x_1x_3 + a_{i,0,2,0}x_2^2 + a_{i,0,1,1}x_2x_3 + a_{i,0,0,2}x_3^2 + a_{i,1,0,0}x_1 + a_{i,0,1,0}x_2 + a_{i,0,0,1}x_3.$$

Назовем

$$X_C = \begin{pmatrix} 0 & x_2 & x_2^2 \\ x_1 & x_1 x_2 & 0 \\ x_1^2 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} x_3 & x_2 x_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} x_3^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, X_C \in \mathbf{X}^{3 \times 3 \times 3} \quad (13)$$

тензором сочетаний переменных состояния, а

$$A_i = \begin{pmatrix} 0 & a_{i,0,1,0} & a_{i,0,2,0} \\ a_{i,1,0,0} & a_{i,1,1,0} & 0 \\ a_{i,2,0,0} & 0 & 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} a_{i,0,0,1} & a_{i,0,1,1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} a_{i,0,0,2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad (14)$$

$$A_i \in \square^{3 \times 3 \times 3}$$

тензором коэффициентов полинома состояния  $i$ -го уравнения состояния, он имеет ранг 3.

Для всей системы из  $s = 3$  уравнений можно говорить о тензоре ранга 4, определенном на пространстве  $\square^{3 \times 3 \times 3 \times 3}$ :

$$A = (A_1, A_2, A_3), A \in \square^{3 \times 3 \times 3 \times 3}. \quad (15)$$

Также создадим тензор ранга 4 дублированием в качестве его сечения тензора 3-го ранга  $X_C$  (13):

$$X = (X_C, X_C, X_C), X \in \mathbf{X}^{3 \times 3 \times 3 \times 3}. \quad (16)$$

Теперь аналогично уравнению в форме многоиндексных объектов (12) можно записать уравнение рассматриваемой системы в тензорной форме:

$$x_i[n+1] = A_i \times^{\phi\phi} X_C + B_i u[n], \quad (17)$$

где  $\times^{\phi\phi}$  – бинарный оператор фробениусова скалярного произведения (или стандартного скалярного произведения).

$A_i, X_C, A, X$  являются тензорами, т.к., во-первых, их размерности по всем индексам совпадают между собой, а во-вторых, в их пространствах определены базисы (задаваемые переменными состояния) и законы преобразования координат [21] при смене базиса (производимой с переменными состояния замене в системе уравнений пространства состояний).

Используя метод математической индукции и переходя от частных примеров к общему случаю 3, обозначим:

$W_C$  – многоиндексный объект сочетания переменных состояния  $x$  и управления  $u$  ранга  $s+m$ ;

$A_i$  – многоиндексный объект (ранга  $s+m$ ) коэффициентов полинома состояния  $i$ -го уравнения состояния системы;

$W$  – многоиндексный объект, получаемый дублированием  $W_C$  в качестве своего сечения, ранга  $s+m+1$ ;

$A$  – многоиндексный объект (ранга  $s+m+1$ ) коэффициентов полиномиальной системы уравнений нелинейной системы управления.

При  $p = s - 1, q = 1$  (в случае линейной части управления) или  $p = s + m - 1$  (в случае общей нелинейности частей состояния и управления) многоиндексные объекты  $A_i, W_c$  являются тензорами, поэтому при осуществлении множественной полиномиальной регрессии  $f_i(nT, x[n], u[n]) \rightarrow \hat{f}_i(t, x, u)$  рекомендуется выбирать степень полинома  $P$  на единицу меньшую, чем количество переменных-регрессоров.

При этом нелинейную систему дифференциальных или разностных (2) уравнений с полиномиальным вектором  $f$  (3) в этих обозначениях можно записать тензорной формой:

$$\begin{aligned} x'_i &= A_i^{\varphi\rho} \times W_C; \\ x_i[n+1] &= A_i^{\varphi\rho} \times W_C, \end{aligned} \quad (18)$$

где правая часть содержит в себе и часть состояния, и часть управления, которые могут быть в том числе полиномиально объединены (связаны) между собой.

### 3. Форма записи с использованием многоиндексных объектов системы уравнений пространства состояний нелинейной системы управления с дискретным временем

Для перехода от записи  $i$ -х уравнений пространства состояний к записи всей системы необходим новый бинарный оператор произведения многоиндексных объектов ранга  $d+1$  с векторным результатом, определенный на множествах  $\square^{d+1}, X^{d+1}$  и производящий умножение с векторным результатом по одному измерению тензоров и фробениусово скалярное умножение по остальным измерениям. Такой бинарный оператор тензорной алгебры можно определить следующим образом:

**Определение 1.**

$$A^{d+1} \overset{\mu}{\otimes} B^{d+1} = (A_1, A_2, \dots, A_d) \overset{\mu}{\otimes} (B_1, B_2, \dots, B_d) = \begin{pmatrix} A_1^{\varphi\rho} \times B_1 \\ A_2^{\varphi\rho} \times B_2 \\ \dots \\ A_d^{\varphi\rho} \times B_d \end{pmatrix}, \quad (19)$$

$$\{A, B\} \in \{\square^{d+1}, X^{d+1}\},$$

где  $A_i, B_i$  – это тензоры ранга  $d$ .

**Замечание 1.** Оператор  $\overset{\mu}{\otimes}$  по выражению (19) можно реализовать в алгоритмических языках программирования, например, Python с подключением биб-

лиотеки `numpy`. Не будем приводить исходный код в данной статье в силу его тривиальности.

Докажем переместительное свойство умножения  $\overset{\mu}{\otimes}$ .

**Теорема 1.**

$$A^{d+1} \overset{\mu}{\otimes} B^{d+1} = B^{d+1} \overset{\mu}{\otimes} A^{d+1} \quad (20)$$

Доказательство. По равенству (19) левая часть равна вектору:

$$A^{d+1} \overset{\mu}{\otimes} B^{d+1} = \begin{pmatrix} A_1 \overset{\varphi\rho}{\times} B_1 \\ A_2 \overset{\varphi\rho}{\times} B_2 \\ \dots \\ A_d \overset{\varphi\rho}{\times} B_d \end{pmatrix}.$$

Так как фробениусово умножение (или стандартное скалярное произведение) обладает переместительным свойством, то:

$$\begin{pmatrix} A_1 \overset{\varphi\rho}{\times} B_1 \\ A_2 \overset{\varphi\rho}{\times} B_2 \\ \dots \\ A_d \overset{\varphi\rho}{\times} B_d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} B_1 \overset{\varphi\rho}{\times} A_1 \\ B_2 \overset{\varphi\rho}{\times} A_2 \\ \dots \\ B_d \overset{\varphi\rho}{\times} A_d \end{pmatrix}.$$

По определению 1:

$$\begin{pmatrix} B_1 \overset{\varphi\rho}{\times} A_1 \\ B_2 \overset{\varphi\rho}{\times} A_2 \\ \dots \\ B_d \overset{\varphi\rho}{\times} A_d \end{pmatrix} = B^{d+1} \overset{\mu}{\otimes} A^{d+1},$$

значит,  $A^{d+1} \overset{\mu}{\otimes} B^{d+1} = B^{d+1} \overset{\mu}{\otimes} A^{d+1}$ , т.е. равенство (20) справедливо, и произведение по оператору  $\overset{\mu}{\otimes}$  обладает переместительным свойством.

Распределительное свойство умножения  $\overset{\mu}{\otimes}$  относительно сложения также выполняется.

**Теорема 2.**

$$A^{d+1} \overset{\mu}{\otimes} (B^{d+1} + C^{d+1}) = A^{d+1} \overset{\mu}{\otimes} B^{d+1} + A^{d+1} \overset{\mu}{\otimes} C^{d+1} \quad (21)$$

Доказательство.

$$A^{d+1} \overset{\mu}{\otimes} (B^{d+1} + C^{d+1}) = (A_1, A_2, \dots, A_d) \overset{\mu}{\otimes} ((B_1, B_2, \dots, B_d) + (C_1, C_2, \dots, C_d)) =$$

$$= (A_1, A_2, \dots, A_d) \overset{\mu}{\otimes} (B_1 + C_1, B_2 + C_2, \dots, B_d + C_d) = \begin{pmatrix} A_1 \overset{\varphi\rho}{\times} (B_1 + C_1) \\ A_2 \overset{\varphi\rho}{\times} (B_2 + C_2) \\ \dots \\ A_d \overset{\varphi\rho}{\times} (B_d + C_d) \end{pmatrix}.$$

Так как фробениусово умножение обладает распределительным свойством относительно сложения, то:

$$\begin{pmatrix} A_1 \overset{\varphi\rho}{\times} (B_1 + C_1) \\ A_2 \overset{\varphi\rho}{\times} (B_2 + C_2) \\ \dots \\ A_d \overset{\varphi\rho}{\times} (B_d + C_d) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_1 \overset{\varphi\rho}{\times} B_1 + A_1 \overset{\varphi\rho}{\times} C_1 \\ A_2 \overset{\varphi\rho}{\times} B_2 + A_2 \overset{\varphi\rho}{\times} C_2 \\ \dots \\ A_d \overset{\varphi\rho}{\times} B_d + A_d \overset{\varphi\rho}{\times} C_d \end{pmatrix}.$$

По определению сложения векторов и далее по определению 1:

$$\begin{pmatrix} A_1 \overset{\varphi\rho}{\times} B_1 + A_1 \overset{\varphi\rho}{\times} C_1 \\ A_2 \overset{\varphi\rho}{\times} B_2 + A_2 \overset{\varphi\rho}{\times} C_2 \\ \dots \\ A_d \overset{\varphi\rho}{\times} B_d + A_d \overset{\varphi\rho}{\times} C_d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_1 \overset{\varphi\rho}{\times} B_1 \\ A_2 \overset{\varphi\rho}{\times} B_2 \\ \dots \\ A_d \overset{\varphi\rho}{\times} B_d \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} A_1 \overset{\varphi\rho}{\times} C_1 \\ A_2 \overset{\varphi\rho}{\times} C_2 \\ \dots \\ A_d \overset{\varphi\rho}{\times} C_d \end{pmatrix} = A^{d+1} \overset{\mu}{\otimes} B^{d+1} + A^{d+1} \overset{\mu}{\otimes} C^{d+1},$$

значит,  $A^{d+1} \overset{\mu}{\otimes} (B^{d+1} + C^{d+1}) = A^{d+1} \overset{\mu}{\otimes} B^{d+1} + A^{d+1} \overset{\mu}{\otimes} C^{d+1}$ , т.е. равенство

(21) верно, и умножение по оператору  $\overset{\mu}{\otimes}$  обладает распределительным свойством относительно сложения.

Очевидно, что сочетательным свойством умножение по оператору  $\overset{\mu}{\otimes}$  не обладает.

**Замечание 2.** Оператор  $\overset{\mu}{\otimes}$  и определение 1 могут быть расширены на пространства  $\square^{d_1 \times d_2 \times \dots \times d_r}$  любого ранга для многоиндексных объектов с любым количеством измерений и любыми размерностями в них. При этом переместительное и распределительное относительно сложения свойства сохраняются.

Теперь все по  $i$  уравнения пространства состояний нелинейной системы управления с дискретным временем (18) можем записать в форме многоиндексных объектов:

$$x[n+1] = A \overset{\mu}{\otimes} W. \quad (22)$$

Уравнение нелинейной системы управления (22) еще компактнее векторной формы уравнения (2) и реализует новый тензорный подход для моделирования нелинейных систем управления с дискретным временем.

### Заключение

Моделирование и анализ нелинейных систем управления может быть более сложным, чем линейных систем [16], однако нелинейные системы управления широко используются и имеют много применений, таких как моделирование нелинейных нестационарных процессов [20, 22-24], СППР [15], хаотические системы [17], энергетические сети и системы [27], телекоммуникации и сети [8], экономические [7], биологические и эволюционные [2] системы.

Использование предложенной тензорной формы записи уравнений состояния нелинейной системы управления с полиномиальными функциями пространства состояний позволит упростить запись систем, а также их моделирование в алгоритмических языках программирования, например, Python. Предложенный в статье бинарный оператор тензорной алгебры реализует новый тензорный подход для моделирования нелинейных систем управления с дискретным временем.

### Литература

1. Aguado J.V., Borzacchiello D., Sagar K., Chinesta F., Huerta A. Tensor Representation of Non-linear Models Using Cross Approximations // Journal of Scientific Computing. 2019. DOI 10.1007/s10915-019-00917-2.
2. Gao X., Guo Y., Shan W. Shallow-Water Investigations: Bilinear Auto-Backlund Transformations For A (3+1)-Dimensional Generalized Nonlinear Evolution System // Appl. Comput. Math. 2023. № 22. P. 133-142.
3. Muller C. Optimizing anti-poverty transfers with quantile regressions // Appl. Comput. Math. 2005. № 4. P. 178-191.
4. Zak S.H. Systems and Control // Oxford: Oxford University Press. 2002.
5. Chen C. Analog and Digital Control System Design: Transfer-Function, State-Space, and Algebraic Methods // Oxford: Oxford University Press. 2006.
6. Nijmeijer H., Schaft A. Nonlinear Dynamical Control Systems // Springer. 1990.
7. Atkinson A.B., Stiglitz J.E. The Structure of Indirect Taxation and Economic Efficiency // Journal of Public Economics. 1972. № 1. P. 97-119.
8. Basar T. Control and game-theoretic tools for communication networks (survey) // Appl. Comput. Math. 2007. № 6. P. 104-125.
9. Box G.F.P., Draper N.R. Measures of lack of fit for response surface designs and predictor variable transformations // Technometrics. 1982. № 24. P. 1-8.
10. Favier G., Kibangou A. Tensor-Based Approaches for Nonlinear and Multilinear Systems Modeling and Identification // Algorithms. 2023. № 16. DOI 10.3390/a16090443.
11. Buldakova T.I., Lantsberg A.V. Data Analysis System based on the Intelligent Agent // 6th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering REEPE 2024. 2024. DOI 10.1109/REEPE60449.2024.10479851.

12. Zarubenkova V.O., Skvortsova M., Fardoun H. An Intelligent System for Classifying Emotional Coloration of Comments // 6th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering REEPE 2024. 2024. DOI 10.1109/REEPE60449.2024.10479749.
13. Hayes J.G. Numerical methods for curve and surface fitting // Bull. Inst. Math. Appl. 1974. № 10. P. 144-152.
14. Minitaeva A.M. Coefficient estimation of simultaneous equations in the case of stochasticity of exogenous variables // Journal of Physics: Conference Series. 2023. № 2543. DOI 10.1088/1742-6596/2543/1/012005.
15. Minitaeva A.M. Analysis of the Multi-Criteria Decision-Making Problem Under Conditions of Heterogeneous Interval Uncertainty // 4th International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency SUMMA 2022. 2022. P. 42-45.
16. Murthy G.R. Concurrent Cyber Physical Systems: Tensor State Space Representation // 11th IEEE International Conference on Control & Automation (ICCA). 2014. DOI 10.1109/ICCA.2014.6871098.
17. Volosova A.V. Using Quantum Algorithms for Uncertainty Processing // 2024 6th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering REEPE 2024. 2024. DOI 10.1109/REEPE60449.2024.10479677.
18. Suyatinov S.I., Buldakova T.I., Vishnevskaya Yu.A. Identification of Situations based on Synergetic Model // 3rd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency SUMMA 2021. 2021. P. 509-514.
19. Syuzev V.V., Smirnova E.V., Proletarsky A.V. Algorithms of multidimensional random process simulation // Computer Optics. 2021. № 45. P. 627-637.
20. Li H., Yamamoto S. Polynomial regression based model-free predictive control for nonlinear systems // 55th Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineers of Japan SICE 2016. 2016. DOI 10.1109/SICE.2016.7749264.
21. Zengin F.O. and Demirbag S.A. // On Ricci Tensor of Weakly Concircular Symmetric Riemannian Spaces // Appl. Comput. Math. 2013. № 12. P. 168-174.
22. Минитаева А.М. Многомодельный подход к прогнозированию нелинейных нестационарных процессов в задачах оптимального управления // Необратимые процессы в природе и технике: труды 12 Всероссийской конференции, Москва, 31 января-3 февраля 2023 г.: в 2 т. 2023. Т. 1. С. 438-447.
23. Минитаева А.М., Шайтура С.В. Системный анализ и разработка методики моделирования нелинейных нестационарных процессов в системе поддержки принятия решений // Информационно-технологический вестник. 2023. Т. 37. № 3. С. 54-64.
24. Шайхутдинов А.А. Методы и аспекты прогнозного моделирования нелинейных нестационарных процессов // Информационно-технологический вестник. 2024. Т. 40. № 2.
25. Минитаева А.М. Эволюция методов оценки коэффициентов авторегрессии произвольного порядка // Наука и технологии: материалы XLIV Всероссийской конференции, посвященной 300-летию РАН и 100-летию академика В.П. Макеева, г. Миасс, 11-13 июня 2024 г. 2024. Т. 1. С. 182-188.

26. Артюшенко В.М., Воловач В.И. Анализ математических моделей информационных параметров сигналов, обрабатываемых радиолокационными устройствами наблюдения ближнего действия // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. 2014. № 5. С. 14-20.
27. Артюшенко В.М., Самаров Е.К. Применение алгоритма фильтрации Калмана-Бьюси в задачах анализа качества электроэнергии // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2006. Т. 2. № 1. С. 17-23.

УДК 004.032.26

## Анализ нейронной сети для прогнозирования показателей эффективности предприятия

**Антон Дмитриевич Михед**, кандидат технических наук,

доцент кафедры «Приборы управления»,

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тульский государственный университет», г. Тула,

**Сергей Николаевич Шульженко**, доктор технических наук,

профессор кафедры «Информационных технологий и управляющих систем»,

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

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

*Производится описание подсистемы нейросетевого прогнозирования доходов предприятия, реализующего продажи посредством интернет-магазина. Представлена функциональная модель организации продаж с учетом подсистемы прогнозирования. Осуществлен выбор и анализ основных параметров LSTM-сети. Построен график нейронной сети и точечный график прогноза доходов предприятия.*

Функциональная модель, LSTM-сеть, прогнозирование доходов, интернет-магазин, нейронная сеть.

### Neural network analysis for predicting enterprise performance indicators

**Anton Dmitrievich Mikhed**, candidate of technical Science,

Associate Professor of the Department «Control Devices»,

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education

«Tula State University», Tula,

**Sergey Nikolaevich Shulzhenko**, doctor of technical sciences,

professor of the department of information technologies and control systems,

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education

«Technological University named after twice Hero of the Soviet Union,

pilot-cosmonaut A.A. Leonov», Korolev, Moscow region

*A description of the subsystem of neural network forecasting of the income of an enterprise selling through an online store is made. A functional model of sales organization is presented, taking into account the forecasting subsystem. The selection and analysis of the main parameters of the LSTM network has been carried out. A neural network graph and a dot graph of the enterprise revenue forecast are constructed.*

Functional model, LSTM network, revenue forecasting, online store, neural network.

## **Введение**

Основные показатели эффективности торгового предприятия зависят от объёма продаж и доходов. В свою очередь доходность предприятия зависит от множества факторов, таких как сезонность, потребность клиентов, конкуренция, реклама и др.

Прогнозирование в торговом предприятии помогает понять будущий спрос на товары и услуги, оптимизировать закупки, управлять запасами и разрабатывать маркетинг кампании. Точное прогнозирование улучшает уровень обслуживания клиентов, оптимизирует запасы, снижает издержки. Прогноз экономических показателей и принятие на его основе соответствующих мер, может способствовать получению желаемой прибыли.

С развитием машинного обучения для прогнозирования всё чаще используют нейронные сети, которые находят широкое применение при исследовании сложных нелинейных задач как в гражданской, так и в военной сфере. Такие сети могут строить прогноз изменения потребления на основе данных об изменении дохода [1]. В системах стабилизации и наведения линии визирования использование нейронных сетей позволяет осуществлять прогноз движения цели [2]. А в энергетике прогнозировать электрическую нагрузку и потери мощности в электрических сетях [3].

## **Постановка задачи**

При использовании нейронных сетей в прогнозировании экономических показателей предприятия необходима их интеграция с бизнес-процессами. Поэтому одним из недостатков существующих бизнес-процессов многих торговых предприятий является отсутствие комплексного автоматизированного подсчёта экономических доходов от продаж с возможностью их прогнозирования в определенный временной период.

Сложность задачи определения параметров для нейронной сети заключается в выборе подходящей архитектуры, количества слоёв, нейронов в каждом слое и функций активации. Эти параметры напрямую влияют на способ обработки входных данных и выдачу выходных результатов. Кроме этого, необходимо осуществить настройку параметров для обучения сети, минимизировав ошибки исключая переобучения сети.

Проблема определения параметров нейронной сети является одной из самых важных и сложных задач в области машинного обучения. Эти параметры включают в себя количество нейронов и весов связей между ними, смещения, число эпох, а также другие коэффициенты, которые определяют ее поведение [4].

## **Методы решения**

В настоящее время известно множество статистических методов прогнозирования. Основные методы прогнозирования включают анализ исторических данных, качественные методы (экспертные оценки, опросы, фокус-группы), статистические методы (временные ряды, регрессионный анализ) и использование внешних данных (социальные сети, поисковые запросы).

В настоящее время методы на основе нейросетей вытесняют классические методы, в частности для задач прогнозирования. Данный выбор обусловлен рядом преимуществ по сравнению с известными классическими методами прогнозирования: возможностью решения плохо формализованных и неформализо-

ванных задач; большая устойчивость в условиях изменяющейся среды; работа с огромным объемом противоречивых данных и с недостаточным количеством данных происходит с большей результативностью [5].

Нейросетевые методы несут большую пользу если имеется достаточно большой набор обучающих данных. При рассмотрении вопроса прогнозирования экономических характеристик торгового предприятия большие данные можно получить если рассматривать в качестве единицы времени день, неделю или месяц в интервале многих лет.

### Описание результатов

Автоматизация обработки заказа делает прозрачной покупку и исключает возможную ошибку продавца магазина. А подсистема прогнозирования, на основании данных бухгалтерии за отчетный период выполняет расчет возможных экономических показателей на будущее.

Декомпозиция функциональной модели работы интернет-магазина предприятия «ТО-ВЕ» с учетом подсистемы прогнозирования доходов показана на рисунке 1. Исходные данные модели: заносимый администратором системой управления контентом товарный ассортимент, и данные для покупателя при оформлении заказов. Информационные данные о каждом заказе по оформленному товару и финансы покупателя являются выходными данными.

Торговая и финансовая деятельность предприятия регулируется нормативными документами и законодательными актами РФ, в частности, как для веб-системы.

Персонал и покупатель – два ключевых звена в организации работы предприятия.

Структурные единицы, формирующие работу торгового предприятия следующие: Поступление заявки на заказ; Принятие заказа; Проверка наличия заказа на складе; Выставление счета; Отправка заказа; Расчет доходов; Подсистемы прогнозирования доходов.

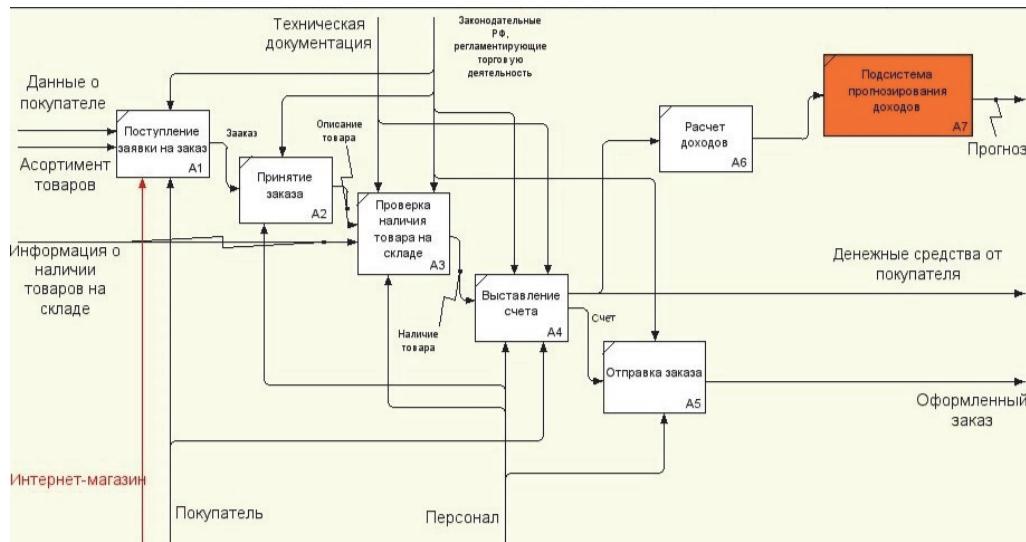


Рисунок 1 – Декомпозиция функциональной модели «ТО-ВЕ» организации продажи товаров на предприятии с подсистемой прогнозирования

В функциональную модель «ТО-ВЕ», в отличии от модели «AS-IS» добавлен входной поток «Данные о покупателе». Под данными о покупателе понимается его ФИО, контакты (телефон и электронная почта), а также его заказы из личного кабинета интернет-магазина.

В качестве механизма воздействия в модель «ТО ВЕ» введен «Интернет-магазин». Данный механизм автоматизирует поступление заявки на заказ через Интернет. На основании счетов оплаты заказов производится расчет доходов за определенный период времени. Информация по доходам поступает на подсистему прогнозирования, выходом которой является прогноз данных по доходам предприятия на будущее.

Для программной реализации сети прогнозирования предлагается использовать нейронную сеть долгосрочной кратковременной памяти, или сокращенно LSTM-сеть [6]. В качестве языка программирования целесообразно применять Python с библиотеками Keras и NumPy. Keras позволяет работать с глубоким машинным обучением, а NumPy с большими массивами данных и математическими функциями.

Сначала в персептроне определяется количество входов по первому слою и выходов на последнем слое. При этом задается фиксация оконной ширины в виде того что величина данных на входе нейросети может быть огромной. С этой целью производим деление по выборкам с фиксацией количества временных шагов.

Правило такое, что для входа первого слоя последовательно является каждая выборка.

Для изучения предсказания в один шаг используется каждый следующий временной шаг.

Ширина окна равняется 3, для временного ряда по доходам, то есть

$[x_1, x_2, \dots, x_n]$  При этом выборки преобразуются так:

$$\begin{aligned} & [x_1, x_2, x_3] & x_4 \\ & [x_2, x_3, x_4] & x_5 \\ [x_1, x_2, \dots, x_n] \rightarrow & [x_3, x_4, x_5] & x_6 \\ & \dots & \dots \\ & [x_{n-3}, x_{n-2}, x_{n-1}] & x_n \end{aligned}$$

То следующее значение которое должно быть на самом деле формируется по ширине окна предыдущего массива в качестве информации нейросети. Так называемое «скольжение» на входе персептрона формируется информацией массива данных следующего значения и это и есть процесс обучения. В результате этого обучения при тестировании определяется ошибка, и если она приемлена, то персептрон готов к работе по прогнозированию, а если нет то просто переобучаем его.

То число, которое нейросеть найдет, соответствующее значению дохода и будет исходным числом.

Проектируемая сеть содержит три слоя: Input, LSTM и Dense. Слой Input является входным и обеспечивает поступление обучающих данных в нейронную

сеть. LSTM-слой содержит большое число нейронов и связей между ними соответственно. Слой Dense является выходным слоем. Алгоритмы вычисления LSTM и Dense содержаться в библиотеке Keras. Структурная схема слоёв нейронной сети показана на рисунке 2а, а её граф на рисунке 2б.

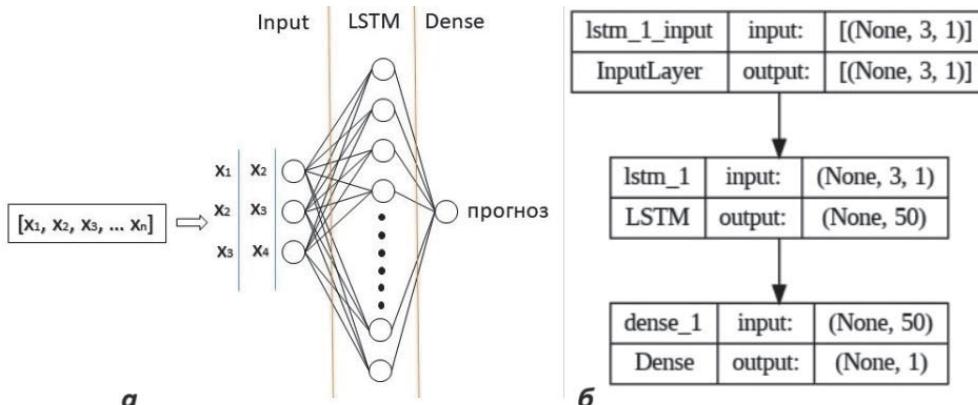


Рисунок 2 – Структурная схема слоёв нейронной сети (а) и её графа (б)

При реализации нейронной сети необходимо определить оптимальное число её нейронов, которое зависит от множества факторов, таких как размер и сложность данных, количество входных переменных, требуемая точность модели и доступные вычислительные ресурсы. В общем случае, чем больше нейронов используется, тем точнее модель, но их увеличение может привести к переобучению и возрастанию времени обучения. Поэтому оптимальное число нейронов должно быть достаточным для конкретной задачи.

Первый входной слой InputLayer представлен выборкой с размерностью 3 элемента в одной строке из обучающего ряда.

Второй LSTM-слой на выходе имеет одномерный массив, данные которого определяют 50 нейронов. Выход LSTM-слоя соединен со входом слоя Dense, формирующего полно-связанную нейронную сеть. Искомая координата формируется на выходе завершающего слоя. Лишь один единственный нейрон содержится в выходном слое класса Dense.

Обучающие входные данные по количеству шагов задаются на входе, а на выходе соответствующие признаки (n\_features) в процессе проектирования нейросети.

Последние элементы временного ряда дают количество шагов своим числом, для использования в алгоритме программы, выходные признаки задают число прогнозных элементов.

Для исследуемой сети выходной признак один – это временной интервал в виде года, поэтому примем n\_features = 1.

Количество параметров, необходимых для обучения LSTM-слоя можно найти по следующей формуле [7]:

$$P_{LSTM} = 4 \cdot [n \cdot n + n \cdot n_{features} + n], \quad (1)$$

где n – число нейронов в слое LSTM.

Для проектируемой сети по формуле (1) найдем число параметров обуче-

ния:

$$P_{\text{LSTM}} = 4 \cdot [50 \cdot 50 + 50 \cdot 1 + 50] = 10400$$

Количество параметров в слое Dense можно найти по следующей формуле [7]:

$$P_{\text{Dense}} = (n + 1) \cdot d, \quad (2)$$

где  $d = 1$  – число нейронов в слое Dense; 1 – это нейрон смещения (bias нейрон) в котором отсутствуют входные синапсы, а вход и выход всегда равняются 1.

Для проектируемой сети по формуле (2) найдем число параметров в слое Dense:

$$P_{\text{Dense}} = (50 + 1) \cdot 1 = 51$$

Количество рассчитанных параметров сети можно проверить с помощью программной функции вывода данных по команде – `print(model.summary())`. На рисунке 3 показан результат выполнения данной команды в среде PyCharm.

Layer (type)	Output Shape	Param #
lstm_37 (LSTM)	(None, 50)	10400
dense_37 (Dense)	(None, 1)	51

Рисунок 3 – Результат выполнения команды `print(model.summary())`

Для обновления весов нейронной сети целесообразно использовать оптимизатор Adam, так как он позволяет учитывать динамику изменения градиентов и адаптироваться к ним на каждой итерации обучения.

Реализация программного кода нейронной сети выполнялась в среде PyCharm. На рисунке 4 представлен точечный график прогнозного значения доходов предприятия на конец 2024 года. Красными точками представлены известные значения доходов, построенные по известному обучающему временному ряду, а последнее значение в виде зеленого треугольника является искомым прогнозом. Из графика видно, что по сравнению с 2023 годом в 2024 наблюдается значительное уменьшение доходов предприятия.

При определении прогнозного значения доходов главным показателем является погрешность прогноза, которая зависит как от количества переменных обучающего временного ряда, так и от числа нейронов сети. В свою очередь число нейронов сети зависит от множества факторов, таких как размер и сложность данных, числа входных переменных, требуемой точности модели и доступных вычислительных ресурсов. В общем случае, чем больше нейронов используется, тем точнее модель, но чрезмерное увеличение может привести к переобучению и возрастанию времени расчета прогноза. Поэтому оптимальное число нейронов должно быть достаточным для конкретной задачи.

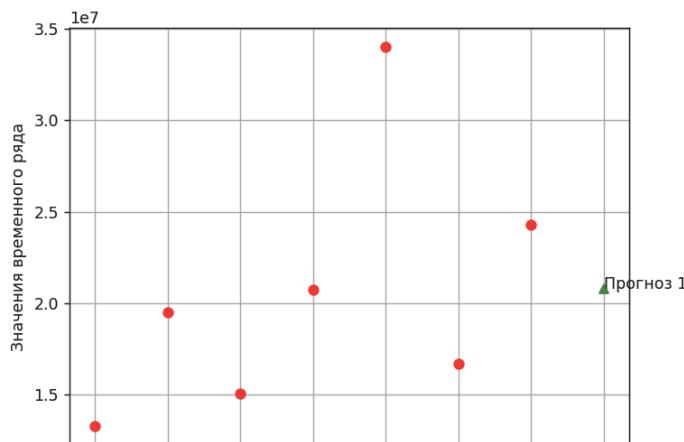


Рисунок 4 – Точечный график прогнозного значения доходов предприятия на конец 2024 года

Для определения зависимостей погрешности прогнозирования от числа нейронов в LSTM-слое и количества эпох, возьмем за интервал времени единичный параметр. Для различных задач этот параметр может быть, например, один день, месяц или год. Программное моделирование проводилось для двух обучающих рядов с количеством переменных  $k$  равных 13 и 25. На рисунке 5а показаны результаты моделирования зависимости погрешности прогнозирования от числа нейронов в LSTM-слое. При использовании обучающего ряда  $k=13$  минимальная погрешность составила 0,3 при условии, что нейронная сеть содержит более 120 нейронов. В обучающем ряде  $k=25$  погрешность стремится к нулю если сеть содержит 20 нейронов и более. Поэтому обучающий ряд  $k=13$  является недостаточным и не может обеспечить обучение сети с высокой точностью. Среднее время выполнения операции прогнозирования составило 2,5 секунды.

Таким образом для уменьшения погрешности прогнозирования нейронной сети необходимо определить оптимальное количество элементов обучающего ряда с минимальным числом нейронов LSTM-слоя. При уменьшении числа нейронов вычислительное время программы также будет уменьшаться, а вероятность переобучения сводится к нулю.

Важным параметром нейронной сети является количество эпох. Данный параметр определяет циклы прохождения программы через все обучающие данные. В цикле происходит обновление весов и пороговых значений, которые были обучены на предыдущей эпохе. Этот процесс повторяется до тех пор, пока не будет достигнуто заданное количество эпох.

Для определения погрешности прогнозирования от числа эпох будем использовать обучающий ряд  $k=25$  при  $n=50$ .

Если значение эпох равно двумстам и более, то как мы видим на рисунке 5б на графике стремится к нулю. Необходимо, чтобы было не менее ста эпох для рассматриваемой нейросети, так как при меньшем значении будет велика погрешность прогноза.

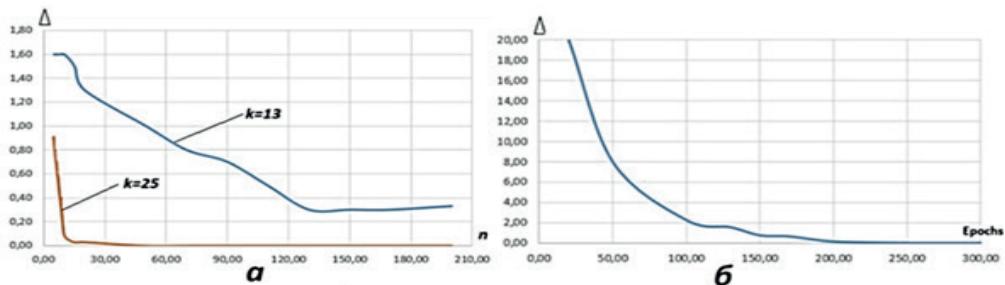


Рисунок 5 – Графики зависимостей погрешности прогнозирования от:  
 а) числа нейронов первого LSTM-слоя при количестве обучающих данных 13 и 25;  
 б) числа эпох

Рассмотрим задачу прогнозирования нелинейно-возрастающего показателя эффективности при обучающем ряде, содержащем 25 известных значений обучающего временного интервала. Будем считать, что показатель эффективности изменяется согласно уравнению:

$$x(t) = \sin(t^2) + t,$$

где  $t$  – это временной интервал, при котором определяется значение показателя эффективности.

В качестве  $t$  примем один день. На рисунке 6 красной кривой показан график функции  $x(t)$ , а синими точками – прогнозируемый график  $p(t)$  показателя эффективности. График делится на обучающий интервал и интервал достоверного прогноза, который соответствует примерно 6 дням. Далее наблюдается накопление погрешности, а прогнозируемый график  $p(t)$  с течением времени расходится с действительным  $x(t)$ .

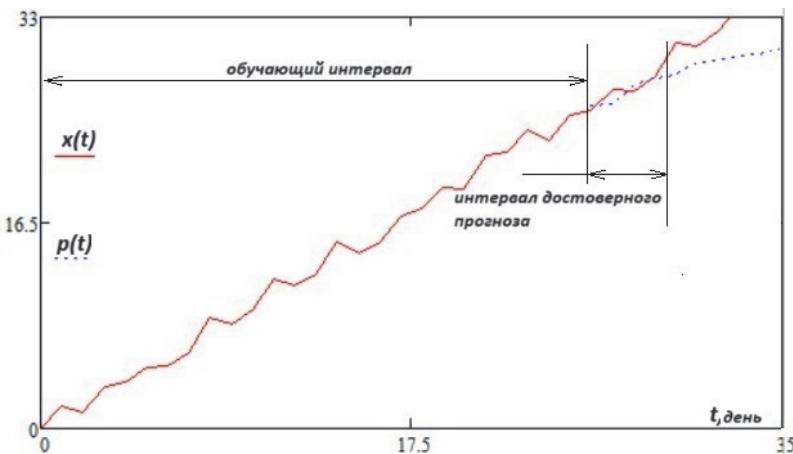


Рисунок 6 – Действительный и прогнозируемый графики показателя эффективности

### Выводы

В результате проведенного анализа подсистемы нейросетевого прогнози-

рования доходов предприятия был осуществлен выбор следующих параметров нейронной сети: слои InputLayer, LSTM и Dense; число обучающих данных – не менее 25; количество нейронов в LSTM-слое – 50; число эпох – 200.

Результаты численного моделирования показали прогноз уменьшения доходов предприятия на конец 2024 года. Так чистая прибыль в 2023 году имело значение 24305268 руб., а прогнозное значение на конец 2024 года составило 20794524 руб. Что показывает на необходимость принятия мер для экономического роста предприятия.

Моделирование нелинейного прогнозируемого графика показателя эффективности, при 25 значениях обучающего ряда, показало целесообразность применения нейронной сети в течении 6 временных интервалов.

#### *Литература*

1. Петайкина А.Д. Прогнозирование изменений потребления домашних хозяйств с использованием нейронных сетей // Экономическое развитие России. 2023. Т. 30. № 7. С. 42-53.
2. Земенков Н.С., Новиков А.Н., Михед А.Д. Применение системы технического зрения для прогнозирования движения цели // В сборнике: Научный форум: тенденции развития науки и общества. Сборник материалов Международной научно-практической конференции. Кемерово, 2023. С. 25-29.
3. Манусов В.З. Родыгина С.В. Нейронные сети: прогнозирование электрической нагрузки и потерь мощности в электрических сетях. От романтики к прагматике. Новосибирский государственный технический университет. Новосибирск, 2018. 303 с.
4. Трофимова Е.А. Нейронные сети в прикладной экономике: учебное пособие / Е.А. Трофимова, В.Д. Мазуров, Д.В. Гилёв; под общ. ред. Е.А. Трофимовой; Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина. Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2017. 98 с.
5. Дауб И.С. Обзор методов прогнозирования временных рядов с помощью искусственных нейронных сетей. StudNet. 2020. Т. 3. № 10. С. 247.
6. Мейзер М.В., Северьянова Е.Д., Мокшин В.В. Пример прогнозирования временных рядов с помощью рекуррентной нейронной сети LSTM // Молодой ученый. 2022. № 9(404). С. 13-15.
7. Ясницкий Л.Н. Интеллектуальные системы: учебник / Л.Н. Ясницкий. 2-е изд. Москва: Лаборатория знаний, 2020. 224 с.

УДК 004.89

**Анализ работы модели машинного обучения  
искусственного интеллекта при реализации информационного поиска  
в большом объеме данных**

**Екатерина Сергеевна Попова**, специалист по учебно-методической работе  
кафедры «Информационные технологии и управляющие системы»,  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования

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

**Александр Валерьевич Недедов**, бизнес-аналитик,  
ООО «ПФ СВ Крафт», г. Фрязино, Московская область

*В данной статье рассматриваются различные модели машин обучения, применяемые для автоматической сертификации кода товаров по номенклатуре внешнеэкономической деятельности на основе их естественного описания. Рассматриваются практические аспекты реализации и точности классификационных алгоритмов. Исследование будет полезно специалистам в области нейронных сетей и искусственного интеллекта, а также тем, кто занимается исследованиями и внедрением интеллектуальных систем в сфере внешнеэкономической деятельности.*

Модели машинного обучения, автоматическая классификация.

**Analysis of the functioning of machine learning and artificial intelligence in  
implementing information retrieval in large volumes of data**

**Ekaterina Sergeevna Popova**, a specialist in educational and methodical work at the  
Department of «Information technology and Control Systems»,  
Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education  
«Technological University named after twice Hero of the Soviet Union,  
pilot-cosmonaut A.A. Leonov», Korolev, Moscow region,  
**Alexander Valerievich Nefedov**, business analytical,  
LLC PF SV Kraft, Fryazino, Moscow region

*This article discusses various models of learning machines used for automatic certification of product codes according to the nomenclature of foreign economic activity based on their natural description. Practical aspects of the implementation and accuracy of classification algorithms are considered. The study will be useful to specialists in the field of neural networks and artificial intelligence, as well as those involved in research and implementation of intelligent systems in the field of foreign economic activity.*

Machine learning model, automatic classification.

**Введение.** Машинное обучение является ветвью искусственного интеллекта, которая наделяет информационные системы способностью к самостоятельному обучению и совершенствованию на основе накопленного опыта, без необходимости явного программирования. Неотъемлемой составляющей этой области является информационный поиск [1-5].

Классификация документов в рамках информационного поиска представляет отношение каждого документа к определенной категории в зависимости от его содержания. Современные методы информационного поиска позволяют эффективно обрабатывать огромные объемы данных, генерируемых ежедневно.

Одним из методов машинного обучения является «обучение с учителем», включающее в себя классификацию. Данный подход требует наличия обучающей выборки, состоящей из размеченных документов по каждой категории, что необходимо для эффективной работы классификационного алгоритма. Тем не менее, «обучение с учителем» по-прежнему предполагает предварительную ручную разметку данных. Сам процесс классификации документов состоит из нескольких этапов:

- Очистка и предобработка данных;
- Кодирование различными методами представления текста;
- Построение модели машинного обучения.

Структура данной модели представлена на рисунке 1.



Рисунок 1 – Процесс классификации

Вариант очистки и предобработки теста, а также его представление был подробно рассмотрен в [6].

Рассмотрим и проанализируем модель машинного обучения и оценки предсказания кода на примере ТН ВЭД (товарной номенклатуры внешнеэкономической деятельности) по описанию товара.

#### Общая постановка задачи.

Существует проблема – определение кода ТН ВЭД по описанию товара. Например, когда человек хочет что-то отправить, то ему необходимо заполнить таможенную декларацию, в которой нужно указать код товара. Подбор правильного кода может занять много времени, а за неверно указанный код грозит административная ответственность. Использование методов машинного обучения для автоматизации работы делает весь процесс очень быстрым и эффективным.

Математическая модель задачи классификации – это метод, который позволяет определить принадлежность объекта к одному из заданных классов на

основе имеющихся данных. В задаче классификации мы имеем набор объектов, для которых известны значения признаков, и нужно определить, к какому классу они относятся.

Основная идея математической модели задачи классификации заключается в том, чтобы построить разделяющую поверхность в пространстве признаков, которая будет разделять объекты на классы.

В самом простом случае модель классификации может быть линейной, то есть объекты разделяются прямой линией или гиперплоскостью. В более сложных случаях можно использовать нелинейные модели, которые могут строить сложные нелинейные разделяющие поверхности.

Чтобы построить математическую модель задачи классификации, необходимо сначала обучить модель на обучающем наборе данных, где для каждого объекта известен правильный класс. Затем модель тестируется на тестовом наборе данных, чтобы оценить ее качество и точность предсказаний.

Оценка качества классификации играет важную роль в машинном обучении и анализе данных, так как позволяет определить, насколько хорошо работает модель классификации и насколько точно она предсказывает принадлежность объектов к различным классам. Оценка качества классификации помогает проверить эффективность модели, выявить ее сильные и слабые стороны, а также выбрать наиболее подходящий алгоритм для решения конкретной задачи.

Математическая модель классификации является краеугольным камнем в решении задач машинного обучения, обеспечивая эффективное и безошибочное распределение объектов по различным категориям.

Метрики для оценки качества классификации можно разделить на группы, среди которых:

Метрики, основанные на матрице ошибок (Confusion Matrix) представлены на рисунке 2.



Рисунок 2 – Метрики для оценки качества классификации

Формулы метрик представлены на рисунке 3.

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP},$$

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN},$$

где  $TP$  – истинно-положительное срабатывание;

$FP$  – ложно-положительное срабатывание;

$FN$  – ложно-отрицательное срабатывание;

В конечном счёте, F-мера считается по формуле:

$$F = 2 \frac{Precision \times Recall}{Precision + Recall}$$

**Рисунок 3 – Формулы метрик**

Среди ключевых показателей эффективной классификации можно выделить полноту и точность. Полнота отражает то, насколько верно весь алгоритм выделяет объекты данного класса. Точность показывает, насколько верно алгоритм распознаёт нужные объекты. Для оценки эффективности классификационного алгоритма используются процентные значения, где 100% означает идеальный результат.

В задаче классификации, особенно с несколькими классами, может быть полезно использовать макро- и микро-усреднение для оценки качества модели. Оба метода позволяют учесть различные аспекты производительности модели в многоклассовой классификации.

### 1. Микро-усреднение:

Микро-усреднение, как правило, используется в задачах с дисбалансом классов, когда некоторые классы имеют небольшую долю от общей выборки. При микро-усреднении каждый предсказанный класс и его фактическое значение рассматриваются как отдельные события. Затем собираются все результаты для всех классов и рассчитываются метрики на основе общего количества правильно классифицированных и неправильно классифицированных объектов для всех классов. Микро-усреднение дает больший вес классам с большим количеством объектов.

### 2. Макро-усреднение:

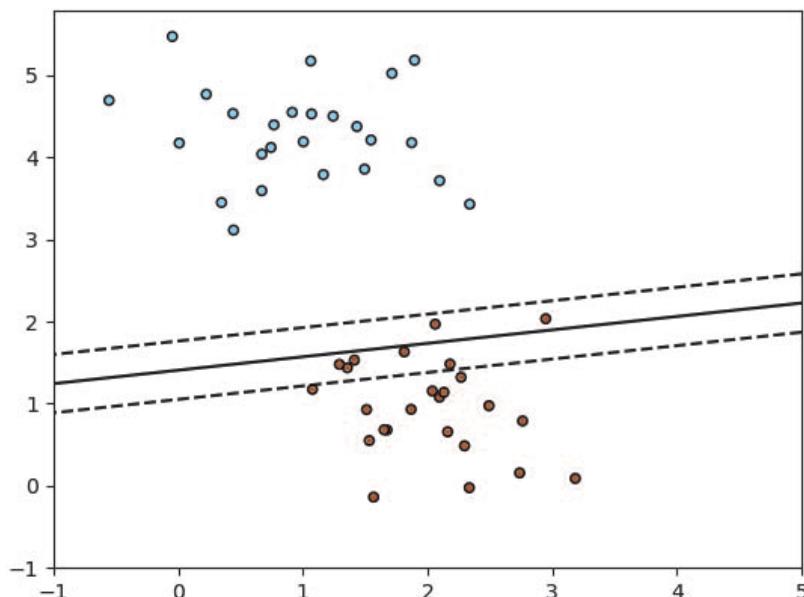
Макро-усреднение рассматривает каждый класс независимо друг от друга и вычисляет метрики для каждого класса отдельно, затем усредняет результаты

по всем классам. Макро-усреднение обрабатывает все классы как равнозначные при расчете метрик. Этот метод подходит для задач, когда важна независимость от дисбаланса классов и когда каждый класс должен быть рассмотрен отдельно.

Выбор между микро- и макро-усреднением зависит от специфики конкретной задачи классификации и целей анализа. Важно учитывать дисбаланс классов, предпочтения по рассмотрению каждого класса и того, какие аспекты производительности модели важнее для конкретного случая. Оба метода усреднения могут быть полезны в качестве дополнительных способов оценки работы модели и понимания ее обобщенности на различных классах.

Оценка качества классификации и выбор подходящих метрик играют важную роль в построении и улучшении моделей машинного обучения, так как помогают оценить и сравнить различные варианты моделей и оптимизировать их работу.

**Стохастический градиентный спуск.** Является моделью оптимизации целевой функции с гладкими свойствами. Он становится все более популярным алгоритмом в машинном обучении для задач классификации данных. В данной задаче мы представляем, что все объекты могут быть классифицированы в два класса (Рисунок 4).



**Рисунок 4 – Модель стохастического градиентного спуска. Пунктирные линии – два классификатора, сплошная линия – поверхность принятия решений, вызванная двумя классификаторами**

Основная сложность заключается в определении, к какому классу относятся новые объекты.

Стохастический градиентный спуск является итерационным методом оп-

тимизации, который заменяет фактический градиент на его оценку, рассчитанную на основе случайно выбранного подмножества данных. Это позволяет снизить вычислительную нагрузку при работе с большими объемами данных, обеспечивая более быстрые итерации.

**Метод опорных векторов (Support Vector Machines – SVM).** Это один из наиболее популярных и эффективных методов машинного обучения, используемый для задач классификации и регрессии.

Основная идея SVM заключается в том, что алгоритм находит оптимальную разделяющую поверхность между классами данных, максимизируя зазор между этой поверхностью и ближайшими к ней точками каждого класса, называемыми опорными векторами (Рисунок 5).

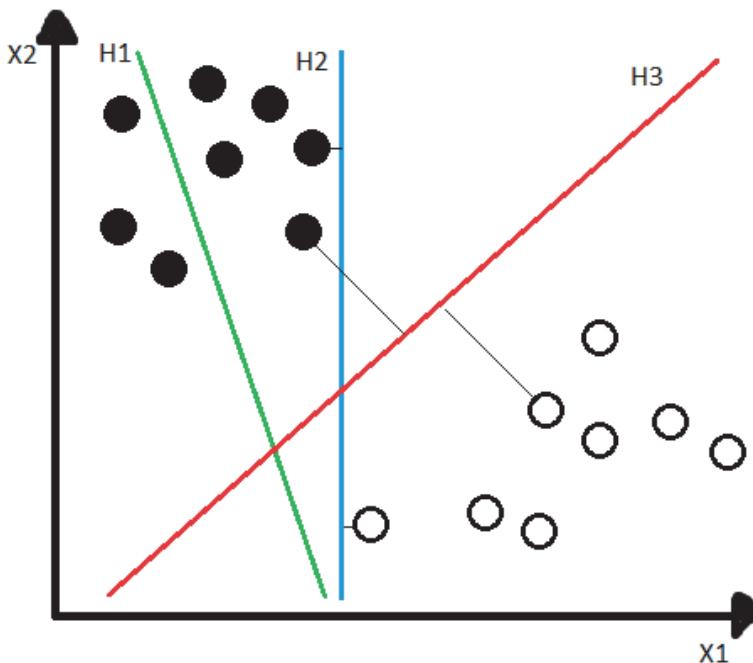


Рисунок 5 – H1, H2, H3 – гиперплоскости.  
H3 – гиперплоскость максимального расстояния

Для построения разделяющей гиперплоскости в SVM используется оптимизационная задача, которая сводится к поиску вектора весов и смещения, минимизирующих функцию потерь и удовлетворяющих условиям оптимизации. Задача оптимизации состоит в поиске такого гиперплоскости, которая наилучшим образом разделяет классы и имеет максимальный зазор между ними. Таким образом, SVM строит гиперплоскость таким образом, чтобы найти оптимальное решение для данной задачи классификации.

Способность обрабатывать не только линейно разделимые, но и нелинейно разделимые данные – основное конкурентное преимущество метода опорных векторов. Это возможно при помощи перевода данных в пространство более высокой размерности, за счёт применения ядерных функций. Данный метод разре-

шает организовывать нелинейные границы между классами, а также повысить точность классификации.

Исходя из всего вышесказанного, можно сделать вывод о том, что, метод опорных векторов – мощный инструмент, способный решить задачу классификации и регрессии. Данный метод характеризуется высокой обобщающей способностью и устойчивостью к переобучению. Он нашёл широкое применение в таких областях, как компьютерное зрение, биоинформатика, финансовый анализ и многие другие.

**Наивный байесовский классификатор (Naïve Bayes Classifier).** Это вероятностная модель машинного обучения, основанная на теореме Байеса. Он используется для решения задач классификации, то есть определения принадлежности объекта к одному из заданных классов на основе его признаков.

Основная идея наивного байесовского классификатора заключается в предположении о «наивности» (naïve) признакового пространства, то есть в том, что признаки являются независимыми друг от друга при условии заданного класса. Это предположение облегчает вычисление вероятностей и делает модель более простой и вычислительно эффективной.

Для того чтобы классифицировать объекты, наивный байесовский классификатор использует теорему Байеса. Этот метод позволяет определить вероятность принадлежности объекта к каждому из классов на основе его характеристик.

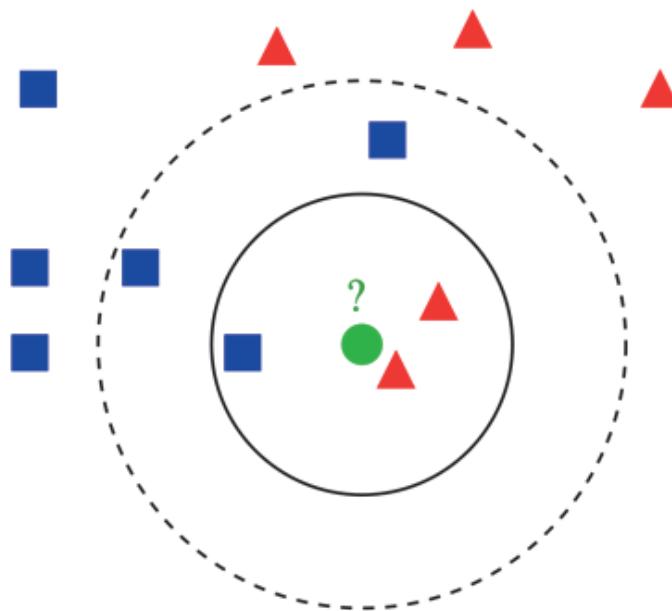
Для этого необходимо провести анализ данных и подсчитать априорные вероятности классов и условные вероятности признаков для каждого класса. Затем, используя правило Байеса, можно определить апостериорную вероятность классов.

Наивный байесовский классификатор особенно эффективен при работе с большими объемами данных. Он также хорошо справляется с задачами, в которых признаки в наборе данных являются действительно независимыми или слабо коррелированными. Это делает его идеальным выбором для задач классификации текста, фильтрации спама и анализа тональности текста.

Благодаря своей способности быстро обучаться и обрабатывать большие объемы текстовых данных, наивный байесовский классификатор широко используется в различных областях. Он может быть адаптирован под конкретные задачи и требования, что делает его универсальным инструментом для решения сложных проблем классификации.

**Метод k-ближайших соседей (k-Nearest Neighbors – KNN).** Это один из самых простых и популярных методов машинного обучения. Он основан на предположении, что объекты, которые находятся ближе друг к другу в пространстве признаков, имеют больше общих характеристик.

Основная идея метода KNN заключается в том, чтобы для каждого объекта в обучающей выборке найти k ближайших объектов по расстоянию в пространстве признаков. Затем эти k объектов используются для предсказания класса нового объекта. Если большинство из этих k объектов принадлежат одному классу, то новый объект также относится к этому классу (Рисунок 6).



**Тестовый образец (зеленый круг) должен быть классифицирован как синий квадрат (класс 1) или как красный треугольник (класс 2).**

**Если  $k=3$ , то он классифицируется как 2-й класс, потому что внутри меньшего круга 2 треугольника и только 1 квадрат.**

**Если  $k=5$ , то он будет классифицирован как 1-ый класс, (3 квадрата против 2 треугольников внутри большего круга)**

Рисунок 6 – Пример классификации  $k$ - ближайших соседей

При правильном подборе параметров и оптимальном применении, этот метод может обеспечивать хорошие результаты в задачах машинного обучения.

**Процесс классификации данных.** Код ТН ВЭД (Товарной Номенклатуры Внешнеэкономической Деятельности) или просто таможенный код представляет собой специальный код, используемый для классификации товаров при проведении внешнеэкономической деятельности (импорта, экспорта) и в таможенном деле.

Код ТН ВЭД состоит из нескольких цифр и букв, которые описывают товар с точностью до деталей, указывая на страну происхождения, вид товара, характеристики и другие важные детали. Этот код важен для правильного заполнения таможенных деклараций, определения таможенных пошлин и сборов, контроля за перемещением товаров через границы, статистического учета торговли и других таможенных процедур. Структура кода ТН ВЭД показана на рисунке 7.

Анализируя структуру кода, перейдем к обучению модели машинного обучения. Для этой цели был выбран язык программирования Python, который предлагает множество алгоритмов для предобработки текста, машинного обучения и нейронных сетей.

Исходными данными является пара код ТН ВЭД и значение, которое

представляет описание исторического массива поданных деклараций за 2022 год.

Теперь можно приступить к анализу данных. Разобьем данные на обучающую и тестовую выборки в соотношении 70/30, при этом количество записей составляет 191 682.



Рисунок 7 – Структура кода ТН ВЭД

Все методы машинного обучения будут реализовываться в библиотеке Scikit-learn (sklearn)

Метод стохастического градиентного спуска (SGDClassifier):

Для данной работы выберем функцию потерь «сглаженная потеря петли (или же плавная потеря петли)», так как она включает метод, позволяющий получить вектор оценок вероятности.

Фрагмент реализации стохастического градиентного спуска представлен на рисунке 8.

```
from sklearn.linear_model import SGDClassifier
nb = Pipeline([('vect', CountVectorizer()),
               ('tfidf', TfidfTransformer()),
               ('clf', SGDClassifier(loss="modified_huber")),
               ])
```

Рисунок 8 – Фрагмент описания метода

Фрагмент кода реализации метода опорных векторов представлен на рисунке 9.

```
from sklearn.svm import LinearSVC
nb = Pipeline([('vect', CountVectorizer()),
               ('tfidf', TfidfTransformer()),
               ('clf', LinearSVC()),
               ])

```

Рисунок 9 – Реализация метода опорных векторов

Наивный байесовский алгоритм представлен на рисунке 10.

```
nb = Pipeline([('vect', CountVectorizer()),
               ('tfidf', TfidfTransformer()),
               ('clf', MultinomialNB()),
               ])

```

Рисунок 10 – Наивный байесовский алгоритм

Метод k-ближайших соседей представлен на рисунке 11.

В данной работе значением для алгоритма KNN является 5.

```
nb = Pipeline([('vect', CountVectorizer()),
               ('tfidf', TfidfTransformer()),
               ('clf', KNeighborsClassifier(n_neighbors=5)),
               ])

```

Рисунок 11 – Метод k-ближайших соседей

**Результат обучения.** После того, как модель была обучена, нужно провести анализ её точности, время работы и сравнить полученные результаты.

Оценка точности производится с учётом F-меры, которая представляет собой гармоническое среднее между точностью (precision) и полнотой (recall) (Рисунок 12).

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP}$$

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN}$$

где  $TP$  – истинно-положительное срабатывание;  $FP$  – ложно-положительное срабатывание;  $FN$  – ложно-отрицательное срабатывание.

Рисунок 12 – Формула точности и полноты

В конечном итоге,  $F$ -мера вычисляется по следующей формуле (1):

$$F = 2 \frac{Precision \times Recall}{Precision + Recall} \quad (1)$$

Точность системы для каждого класса оценивает, насколько много положительных классификаций, сделанных моделью, действительно были верными.

Полнота системы измеряет, насколько много положительных экземпляров в данных было правильно классифицировано моделью.

Таким образом, точность и полнота работают в паре, предоставляя информацию о том, как хорошо модель правильно классифицирует объекты положительного класса и как много объектов этого класса модель упускает.

Когда классов много, изучение метрик каждого класса займет много времени. Поэтому для таких случаев существуют усредненные метрики.

Метрика *MacroAVG* – это среднее арифметическое значение.

$$MacroAVG = \frac{\sum_{i=1}^n M_i}{n} \quad (2)$$

где  $M$  – метрика, по которой ищем усреднение.

Такую метрику обычно используют, когда класс имеет важность. При анализе результатов важно обратить внимание на то, чтобы метрика была не менее 40%, иначе модель считается посредственной по данной метрике.

На практике часто встречается ситуация, когда один класс содержит большое количество объектов, в то время как в другом классе их очень мало. Когда один из классов соответствует редко встречающимся явлениям, такую ситуацию называют дисбалансом классов. В таком случае используется метрика *WeightedAVG* – это взвешенное усредненное значение. Эта метрика схожа с *Macro*, но метрика берется каждого класса, и вместо среднего арифметического ищется взвешенное среднее, то есть для каждого класса используем вес

$$WeightedAVG = \sum_{i=1}^n M_i * m_i, \quad (3)$$

где  $m$  – вес, который рассчитается как количество объектов с целевым классом деленное на количество объектов в целом.

Эта метрику используется в случаях, когда имеется дисбаланс классов.

В результате проведенного эксперимента обучение модели *SGDClassifier* заняло 13 минут. Результаты обучения модели стохастическим градиентным спуском отражены в таблице 1.

Если смотреть на усредненную метрику по макро (MacroAVG), то получаем усредненную модель. Из-за дисбаланса классов нужно смотреть на взвешенное усредненное (WeightedAVG).

Лучшие показатели точности и доли правильных ответов были достигнуты методом опорных векторов (LinearSVC). Но данный метод не предусматрива-

ет вывод нескольких подходящих кодов, которые подходят по описанию товара. Также этот метод занял очень много времени.

Таблица 1 – Результат обучения моделей

Метод машинного обучения	F-мера		Доля правильных ответов	Время
	MacroAVG	WeightedAVG		
LinearSVC	43%	67%	69%	30 мин
SGDClassifier	32%	59%	63%	13 мин
Naïve Bayes Classifier	3%	16%	20%	1,5 мин
KNeighbors	30%	51%	52%	3,5 мин

Исходя из этого, будем рассматривать модель стохастического градиентного спуска (*SGDClassifier*), который по времени оказался намного быстрее, но по метрикам точности немного хуже.

Результаты опыта свидетельствуют о том, что модель, оцениваемая по метрике макро (*MacroAVG*), является посредственной. В связи с несбалансированностью классов следует обратить внимание на взвешенное усредненное (*WeightedAVG*), которое должно составлять не менее 40%.

Для более подробного рассмотрения качества обучения модели стохастическим градиентным спуском приведены конкретные примеры. При запросе программы предлагает коды, соответствующие описанию товара с вероятностью более 10%. На рисунке 13 показан пример работы обученной модели *SGDClassifier*.

казан

7323910000 ( 73.57 %) изделия кухонные для бытовых нужд из чугунного литья...

3926909709 ( 25.16 %) изделия прочие из пластмасс и изделия из прочих материалов

Рисунок 13 – Пример работы обученной модели классификации

На вход подается описание товара: «казан». Программа выдает два наиболее подходящих кода. Исходя из вероятности соответствия кода описанию товара, выбирается код с наибольшей вероятностью – 73,57%.

Рассмотрим другой пример. На вход подается описание товара: «столешница деревянная». Программа выдает три наиболее подходящих кода с вероятностью более 10% (Рисунок 14).

столешница деревянная

9403890000 ( 61.91 %) ЧАСТИ МЕБЕЛИ ИЗ ДРЕВЕСИНЫ

9403910000 ( 12.79 %) ПРОЧАЯ МЕБЕЛЬ ИЗ ПРОЧИХ МАТЕРИАЛОВ, ВКЛЮЧАЯ ТРОСТНИК

4412920000 ( 10.14 %) ФАНЕРА ОБЩЕГО НАЗНАЧЕНИЯ С НАРУЖНЫМИ СЛОЯМИ ИЗ ШПОНА ЛИСТВЕННЫХ ПОРОД (БУКА)

Рисунок 14 – Пример работы обученной модели классификации

Возможность получения нескольких подходящих кодов позволяет пользователю самостоятельно выбирать код для товара.

Также можно убрать ограничение на вероятность и запросить все подходящие коды для заданного описания товара (рисунок 15).

7323910000 ( 73.7857967204138 % )  
3926909709 ( 25.20350318970039 % )  
6310100002 ( 0.178664563138552 % )  
2933111000 ( 0.1763447202409497 % )  
3605000000 ( 0.16343535887258612 % )  
7016901000 ( 0.1560449699764956 % )  
9303201000 ( 0.11796268686512623 % )  
2804900000 ( 0.10076659682110783 % )  
9405690009 ( 0.07145665707263804 % )  
8517693100 ( 0.029174677160958847 % )  
9015401000 ( 0.01684985973739462 % )

Рисунок 15 – Пример работы обученной модели классификации

Анализ данных, представленных на рисунке 6, показывает, что большая часть предложенных кодов имеет низкую вероятность. Очевидно, что пользователь не выберет кодировку с такой низкой процентностью, а значит, вышеуказанный выбор ограничения на вероятность является очень полезным.

**Заключение.** Таким образом, в статье были исследованы модели машинного обучения для автоматического определения кода по товарной номенклатуре внешнеэкономической деятельности на основании естественного описания товара. Были изучены и подобран подходящий метод. Был выполнен анализ работы модели машинного обучения, проведена оценка качества классификации. Проверка на примерах демонстрирует автоматическое определение кода товара по ТН ВЭД на основании естественного описания товаров. Показано, что рассмотренный метод машинного обучения является оптимальным классификатором для прогнозирования и будет полезным для применения в задачах автоматической многоклассовой классификации текстовых данных. Данная разработка поможет пользователю в дальнейшем либо самому уточнить класс принадлежности товара, либо задать уточняющие признаки, которые позволяют алгоритму определить подходящий код товара.

*Литература*

1. Бархатов А.П. Бухгалтерский учет внешнеэкономической деятельности: учебное пособие для бакалавров. М.: Издательско-торговая корпорация «Дашков и К°», 2022. 266 с.
2. Бурков Андрей. Машинное обучение без лишних слов. СПб.: Питер, Серия «Библиотека программиста». 2020. 192 с.
3. Лимановская О.В. Основы машинного обучения: учебное пособие / О.В. Лимановская, Т.И. Алферьева. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2020. 88 с.
4. Лимановская О.В. Основы машинного обучения: учебное пособие / О.В. Лимановская, Т.И. Алферьева. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2020. 88 с.
5. Попова Е.С. Системный анализ задач при подготовке текста для машинного обучения // Современные информационные технологии. 2023. С. 176-185.
6. Флах П. Машинное обучение. Наука и искусство построения алгоритмов, которые извлекают знания из данных: учебник / П. Флах. 2-е изд. М.: ДМК Пресс, 2023. 401 с.

УДК 621.391.821:621.396

**Анализ построения математической модели двумерных  
распределений и потенциальной эффективности подавления  
негауссовых импульсных помех**

**Владимир Михайлович Артюшенко**, доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой информационные технологии и управляющие системы,  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования

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

**Владимир Иванович Воловач**, доктор технических наук, доцент,  
и.о. директора Высшей школы передовых производственных технологий,  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования,

Поволжский государственный университет сервиса, г. Тольятти

*Рассмотрены методы построения моделей двумерных распределений вероятностей. Определены условия отсутствия сингулярности моделей. Произведена оценка потенциального выигрыша обработки с учетом зависимости между отсчетами атмосферных радиопомех относительно метода их амплитудного подавления.*

Двумерная модель распределения, негауссовые импульсные помехи, эффективность амплитудного подавления, гауссовский шум.

**Analysis of the construction of a mathematical model of two-dimensional  
distributions and the potential effectiveness of suppression of non-Gaussian  
pulse interference**

**Vladimir Mikhailovich Artyushenko**, doctor of Technical Sciences, Professor,  
Head of the Department of Information Technologies and Control Systems,  
Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education  
«Technological University named after twice Hero of the Soviet Union,  
pilot-cosmonaut A.A. Leonov», Korolev, Moscow region,

**Vladimir Ivanovich Volovach**, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor,  
Acting Director of the Higher School of Advanced Production Technologies,  
Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education,  
Volga Region State University of Service, Tolyatti

*Methods of constructing models of two-dimensional probability distributions are considered. The conditions for the absence of a singularity of the models are determined. The evaluation of the potential gain of processing is carried out, taking into account the dependence between the readings of atmospheric radio interference with respect to the method of their amplitude suppression.*

Multidimensional distribution model, non-Gaussian pulse interference, amplitude suppression efficiency, Gaussian noise.

**Введение.** Одним из наиболее распространенных типов негауссовых помех являются так называемые естественные или атмосферные радиопомехи [5], содержащие гауссовскую флуктуационную и импульсную компоненты и отличающиеся от других негауссовых помех отсутствием нулей у характеристических функций распределения вероятностей [2].

Знание одномерного распределения вероятностей позволяет оценить эффективность амплитудного подавления помехи [3]. При учете зависимости между отсчетами помехи на основе использования многомерных моделей можно достичь большей эффективности.

В [2, 10] рассмотрена многомерная модель атмосферных радиопомех и сделан вывод о значительном повышении эффективности. Очевидно, что минимально достижимый уровень помехи не может быть ниже уровня гауссовой компоненты. Однако, хотя модель [2, 10] строится на основе представления атмосферных радиопомех как гауссовского процесса со случайным среднеквадратическим отклонением, описываемым логарифмически нормальным распределение вероятностей, но в конечной форме гауссовой компоненты не содержит. Об этом свидетельствует нулевой радиус сходимости разложения одномерного распределения вероятностей в ряд Маклорена, из которого можно найти уровень гауссовой компоненты.

Покажем и проанализируем на примере двумерных распределений вероятностей необходимость учета независимого гауссова шума при использовании имеющих существенные эмпирические предпосылки многомерных моделей. Причем независимость должна подтверждаться распределением вероятностей порядка не ниже, чем моделируемое распределение. Найдем условия, позволяющие достичь адекватности действительности в плане потенциальной эффективности подавления реальных помех.

**Условия адекватности действительности потенциальной эффективности подавления реальных помех.** Первым условием адекватности является отсутствие сингулярных свойств у модели помех, то есть подавление помехи не должно стремиться к бесконечности в случае асимптотически малого сигнала и бесконечного увеличения числа разбиений  $N$  любого конечного интервала наблюдения  $T$ , что, например, имеет место для помехи с логарифмически нормальным распределением вероятностей [10].

В соответствии с [6], при этих условиях величина  $P_{\text{вых}}^{-1}$  обратная мощности помехи на выходе обнаружителя известного сигнала на фоне односвязной марковской помехи, для достаточно больших  $N$ , при которых соседние отсчеты сигнала мало отличаются, то есть  $T/N$  мало, имеет вид

$$P_{\text{вых}}^{-1} = 2NI_2 - (N - 1)I_1, \quad (1)$$

где  $I_1$  равняется  $P_{\text{вых}}^{-1}$  в одномерном случае [7]

$$I_1 = \left\langle \left[ \frac{d}{dx} \ln W_1(x) \right]^2 \right\rangle; \\ I_2 = 0,5 \sum_{i,j=1}^2 \left\langle \frac{\partial}{\partial x_i} \ln W_2(x_1, x_2) \frac{\partial}{\partial x_j} \ln W_2(x_1, x_2) \right\rangle, \quad (2)$$

где, в свою очередь,  $W_1(\cdot)$  и  $W_2(\cdot, \cdot)$  – одномерная и двумерная плотности распределения вероятностей;  $\langle \cdot \rangle$  – математический знак усреднения.

Из (1) следует одно из необходимых условий отсутствия сингулярности, заключающееся в справедливости соотношения

$$I_2 = I_1/2,$$

при коэффициенте корреляции  $R \rightarrow 1$ .

**Метод получения одномерных моделей негауссовых помех.** Одним из широко используемых методов получения одномерных моделей негауссовых помех, допускающим обобщение на многомерный случай, является представление помехи как гауссова процесса со случайной дисперсией  $D$ .

Выбор распределения вероятностей величины  $D$  позволяет получить необходимый вид одномерного распределения вероятностей помехи. Характер изменения  $D$  во времени также может быть различным.

Так, для диапазона сверхнизких частот [2] при  $T \leq 1 \dots 4$  мс  $D$  можно считать неизменным и получить многомерное распределение вероятностей аналогичное [3] усреднением произведения многомерного распределения вероятностей гауссова процесса и плотности распределения вероятностей величины  $1/D$ .

Для варианта модели [3] при значении параметра модели  $k_1 = 1$ , соответствующего описанию распределения вероятностей огибающей моделью Холла [1], усреднение в (2) выполняется аналитически и

$$I_1 = \frac{a+0,5}{(a+1,5)\sigma_3^2};$$

$$I_2 = \frac{a+1}{(a+2)(1+R)\sigma_3^2},$$

где  $k_1$ ,  $a$  и  $\sigma_3$  – параметры модели [3].

Заметим, что распределение Холла – это непрерывное распределение вероятностей для суммы  $n$  независимых и одинаково распределенных  $U(0, 1)$  случайных величин:

$$X = \sum_{k=1}^n U_k.$$

При  $n = 1$ ,  $X$  соответствует равномерному распределению:

$$f_X(x) = \begin{cases} 1, & 0 \leq x \leq 1; \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases}$$

При  $n = 2$ ,  $X$  соответствует треугольному распределению:

$$f_X(x) = \begin{cases} x, & 0 \leq x \leq 1; \\ 2 - x, & 1 \leq x \leq 2. \end{cases}$$

При  $n = 3$ ,

$$f_X(x) = \begin{cases} \frac{1}{2}x^4, & 0 \leq x \leq 1; \\ \frac{1}{2}(-2x^2 + 6x - 3), & 1 \leq x \leq 2; \\ \frac{1}{2}(3 - x)^2, & 2 \leq x \leq 3. \end{cases}$$

При  $n = 4$ ,

$$f_X(x) = \begin{cases} \frac{1}{6}x^3, & 0 \leq x \leq 1; \\ \frac{1}{6}(-3x^3 + 12x^2 - 12x + 4), & 1 \leq x \leq 2; \\ \frac{1}{6}(3x^3 - 24x^2 + 60x - 44), & 2 \leq x \leq 3; \\ \frac{1}{6}(4-x)^3, & 3 \leq x \leq 4. \end{cases}$$

При  $n = 5$ ,

$$f_X(x) = \begin{cases} \frac{1}{24}x^4, & 0 \leq x \leq 1; \\ \frac{1}{24}(-4x^4 + 20x^3 - 30x^2 + 20x - 5), & 1 \leq x \leq 2; \\ \frac{1}{24}(6x^4 - 60x^3 + 210x^2 - 300x + 155), & 2 \leq x \leq 3; \\ \frac{1}{24}(-4x^4 + 60x^3 - 330x^2 + 7800x - 555), & 3 \leq x \leq 4; \\ \frac{1}{24}(5-x)^4, & 4 \leq x \leq 5. \end{cases}$$

Внешний вид распределения  $f_X(x)$ , для различных значений величины  $n$ , представлен на рисунке 1.

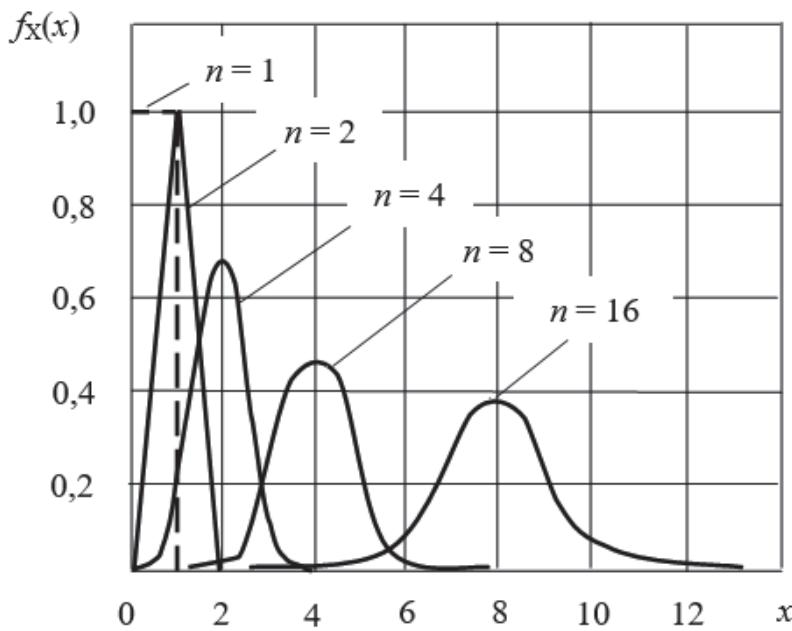


Рисунок 1 – Распределение Холла

Заметим, что при этом, в отличии от [2, 10] распределение вероятностей помехи и ее огибающей разлагаются в ряд Маклорена и помеха содержит зависимую от импульсной гауссовскую компоненту.

Поскольку при  $R = 1$ ,  $I_2 > I_1/2$ , согласно (1)  $P_{\text{вых}}^{-1} \rightarrow \infty$  при  $N \rightarrow \infty$  и мо-

дель оказывается сингулярной. К тому же результату, как показали численные расчеты, приводят и случаи  $k_1 < 1$ , соответствующие наличию независимой, но только при рассмотрении одномерного распределения вероятностей, гауссовой компоненты.

Сингулярность не исчезает и при учете марковского характера процесса  $1/D$ , который может иметь место при использовании выбранных в [3] распределений вероятностей этой величины [7].

Следовательно, рассмотренный метод не годится для адекватного многомерного моделирования помех, поскольку не обеспечивает наличия независимой гауссовой компоненты при рассмотрении распределения вероятностей той же размерности.

**Метод получения многомерных моделей негауссовых помех.** Рассмотрим способ получения многомерных распределений вероятностей моделей более близкий к реальному механизму их формирования. Он основан на представлении помехи как результата фильтрации пуассоновского потока импульсов.

Двумерная характеристическая функция профильтрованного пуассоновского процесса [7]

$$f_2(s_1, s_2) = \exp \left\{ \nu \int_0^\infty \left[ \langle \exp(iA(s_1 h(t) + s_2 h(t + \theta))) \rangle_A - 1 \right] dt + \right. \\ \left. + \nu \int_0^\theta [\langle \exp(is_2 A h(t)) \rangle_A - 1] dt, \right. \quad (3)$$

где  $\nu$  – интенсивность потока;  $A$  – случайная амплитуда импульсов;  $h(\cdot)$  – импульсная характеристика;  $\theta$  – разность моментов времени наблюдения.

Если предположить, что  $h(t) \sim \exp(-\Omega t)$  (марковский процесс,  $\Omega$  – параметр полосы), то  $f_2(s_1, s_2)$  выражается через одномерную характеристическую функцию:

$$f_2(s_1, s_2) = \frac{f_1(s_1 + R s_2) f_1(s_2)}{f_1(R s_2)}, \quad (4)$$

где корреляционная функция

$$R(\theta) = \exp(-\Omega \theta).$$

Дальнейшие преобразования удается выполнить для

$$f_1(s) = \exp(-b|\dot{s}|), \quad (5)$$

где  $b$  – параметр.

Подставив (5) в (4), учитывая наличие независимого гауссового шума, путем умножения (4) на двумерную характеристическую функцию нормального распределения вероятностей и выполнив двумерное преобразование Фурье, после достаточно громоздких преобразований, получаем:

$$W_2(x_1, x_2) = \frac{1}{8\pi\sigma_g^2\sqrt{1-R^2}} \sum_{\delta_1, \delta_2=\pm 1} \exp \frac{b+i\delta_1 x_1^2}{2\sigma_g^2} \operatorname{erfc} \frac{b+i\delta_1 x_1}{\sqrt{2}\sigma_g} \times \\ \times \frac{[(1-R)b+i\delta_2(x_2-Rx_1)]^2}{2\sigma_g^2(1-R^2)} \operatorname{erfc} \frac{[(1-R)b+i\delta_2(x_2-Rx_1)]}{\sqrt{2}\sigma_g\sqrt{1-R^2}}, \quad (6)$$

где  $\sigma_g^2$  – дисперсия независимого гауссового шума;  $\operatorname{erfc}(\cdot)$  – дополнительный интеграл вероятностей.

Результаты моделирования двухмерных негауссовых плотностей распределения вероятностей в соответствии с соотношениями (6) для различных коэффициентов корреляции  $R = r$  представлены на рисунке 2.

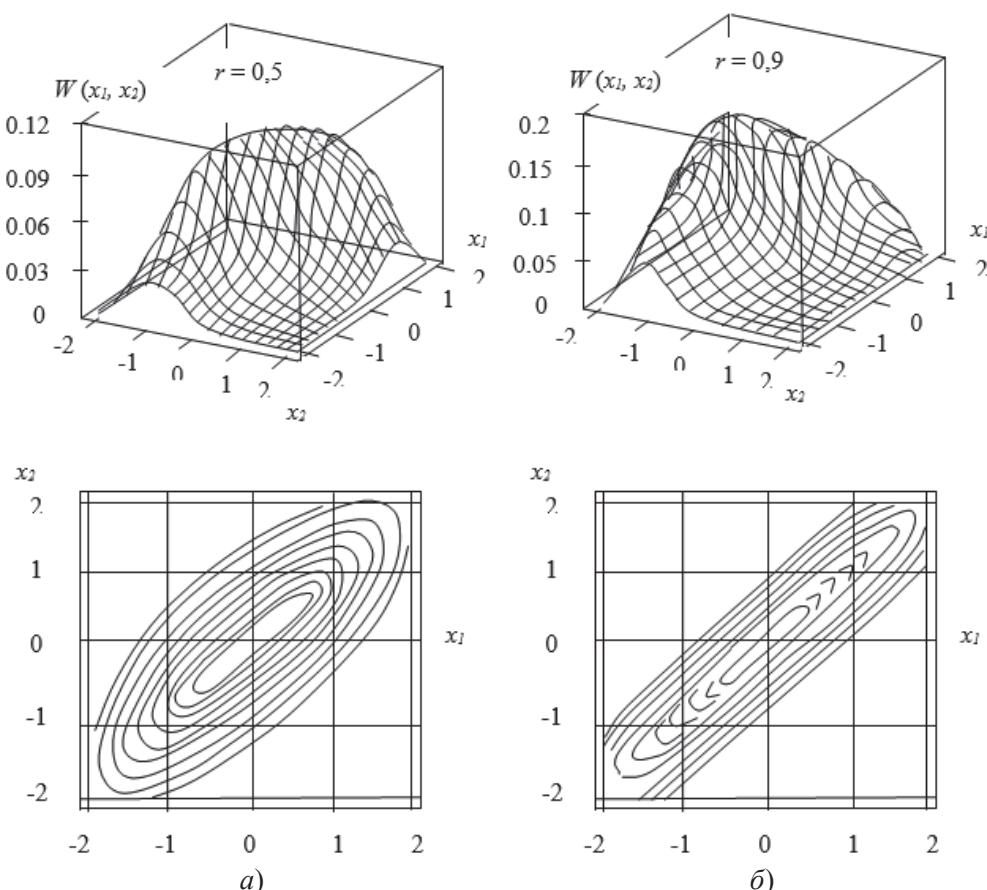


Рисунок 2 – Результаты моделирования двумерных негауссовых плотностей распределения вероятностей и изолиний их поверхностей при:  
 $a - r = 0,5$ ;  $\delta - r = 0,9$

Соответствующее (6) одномерное распределение вероятностей близко к модели [3] при  $a = 0,5$  и, потому ввиду удовлетворительного согласия этого одномерного распределения вероятностей с определенным массивом экспериментальных данных, описываемых моделью [3] при, выполнении примерного неравенства,  $0,45 \leq a \leq 0,65$ , двумерная модель (6) имеет практический интерес.

Численные расчеты, выполненные с помощью (6), (2) и (1) показали, что этой моделью описывается помеха с

$$P_{\text{вых}}^{-1} = 1/c\sigma_g^2 \text{ при } N \rightarrow \infty,$$

где  $1 < c \leq 2$ .

Как и ожидалось, модель (6) не сингулярная. Однако распределение вероятностей, собственно, гауссовой части помехи, которое соответствует характеристической функции (5) и может быть получено из (6) при  $\sigma_g \rightarrow 0$ , оказывается сингулярным.

Это достаточно неожиданно, поскольку специальный анализ, подобный выполненному в [9], показывает теоретическую возможность формирования (5)

только при  $v \rightarrow \infty$ , а при этом условии должен самостоятельно формироваться и гауссовский шум.

Можно предположить, что причиной этого является использование физически нереализуемой экспоненциальной корреляционной функции. С учетом квантовой поправки к спектральной плотности «белого шума» [1] эта функция всегда квадратичная на начальном участке.

В случае квадратичного начального участка зависимости  $R(t)$  в (3) не удается выполнить интегрирование по  $t$  аналитически. Поэтому соответствующий расчет  $I_2$ , учитывая возможность аналитического усреднения по  $A$ , сводится к пятикратному вычислению несобственных интегралов, что осуществить непосредственно не реально.

Поэтому было использовано разложение по полиномам Эрмита:

$$W_2(x_1, x_2) = \frac{1}{2\pi\sigma^2\sqrt{1-R^2}} \exp\left\{-\frac{1}{2\sigma^2}\left[x_1^2 + \frac{(x_2-Rx_1)^2}{1-R^2}\right]\right\} \times \times \sum_{k=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} C_{kn} H_n\left(\frac{x_2-Rx_1}{\sigma\sqrt{1-R^2}}\right); \quad (7)$$

$$f_2(s_1, s_2) = \exp[-(s_1^2 + 2Rs_1s_2 + s_2^2)\sigma^2/2] \sum_{k=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} i^{k+n} C_{kn} H_n \times \times [(s_1 + Rs_2)\sigma] H_n(s_2\sigma\sqrt{1-R^2}). \quad (8)$$

Параметры  $\sigma$  и  $C_{kn}$  в (7), (8) тождественны.

В этом случае вычисления разбиваются на три этапа. Сначала с помощью (3) вычисляется двумерный массив значений  $f_2(s_1, s_2)$ . Затем, исходя из (8), стандартным способом [4] определяются коэффициенты  $C_{kn}$  и, наконец, с помощью (1), (2) находится  $P_{\text{вых}}^{-1}$ .

Заметим, что отличие (7) от соответствующего двумерного ряда Эджворта [10] ускоряет сходимость ряда в случае конкретной, квадратичной, корреляционной функции.

С помощью (7), (8) были выполнены расчеты для колебательного режимов в колебательном контуре

$$R(t) = (1 + \Omega t) \exp(-\Omega t), \quad (9)$$

при двухстороннем экспоненциальном распределении вероятностей величины  $A$ .

**Определение потенциальной эффективности подавления помехи.** Для определения потенциальной эффективности подавления помехи желательно выбрать  $R(T/N) \rightarrow 1$ , а  $\sigma_g^2 \rightarrow 0$ .

Однако практически степень близости этих величин к указанным пределам определялись диапазоном представления чисел при использовании арифметики одинарной точности на персональном компьютере (ПК).

Было выбрано  $R \approx 0,9$  и  $\sigma_g^2 = 0,01$  при условно единичной мощности пуссоновской помехи  $m_2 = 1$ . Из этих же соображений количество членов ряда в (7), (8) ограничивалось:  $k, n \leq 12$ .

Наилучшая сходимость рядов достигалась при выборе  
 $\sigma^2 = m_2 + \sigma_g^2$ .

Величина  $N$  не имеет принципиального значения при сравнительном анализе. Для определенности было рассмотрено  $T \approx 3\tau_k$ , где  $\tau_k$  – время корреляции помех;  $N = 10$ .

Заметим, что моделируемая ситуация может иметь место в случае приема в сверхнизкочастотном диапазоне.

Соотношение  $\frac{\sigma_g^2}{m_2} = 0,01$  реально для соотношения мощностей шумов приемника и дальних атмосфериков, а выбор  $R = 0,9$  с учетом значений  $\tau_k = 0,12$  мс [2] и квадратичности  $R(t)$  приводит к частоте дискретизации 25 кГц, которая также реально используется при цифровой обработке сигналов, принимаемых в полосе 0,4...0,95 кГц [8].

Для решения принципиального вопроса об адекватности моделей был рассмотрен случай  $\frac{v}{\Omega} = 10$ , который, соответствует существенной степени нормализации совокупности дальних атмосфериков [9].

Для экспоненциальной  $R(t)$  было получено  $P_{\text{вых}}^{-1} = 8,63$  ( $I_1 = 1,0675, I_2 = 0,91$ ), а для (9)  $P_{\text{вых}}^{-1} = 1,477$  ( $I_1 = 0,9983, I_2 = 0,5231$ ).

Существенное различие этих значений между собой и относительно небольшое, при существенном отличии соответствующих (6) и (7) одномерных распределений вероятностей, расхождение первого значения со случаем (6), где при тех же величинах  $\sigma_g, R$ , и  $N, \frac{\sigma_g}{b} \ll 1$  имеем  $P_{\text{вых}}^{-1} \approx 5$ , подтверждает справедливость использования метода и свидетельствует о решающем влиянии вида начального участка  $R(t)$ .

Результат для (9) практически не отличается от случая полностью нормализованной помехи, когда

$$I_2 = \frac{I_1}{1+R},$$

из чего следует, что флюктуационная компонента поля атмосферной радиопомехи при достаточном значении индекса перекрытия  $\frac{v}{\Omega}$ , точная граница зависит от  $h(t)$ , ведет себя аналогично гауссовскому шуму.

Для исследования возможностей подавления импульсной компоненты атмосферных радиопомех были выполнены расчеты при  $\frac{v}{\Omega} = 2$ , когда нормализация еще отсутствует, и получено  $P_{\text{вых}}^{-1} = 6,01$  ( $I_1 = 1,133, I_2 = 0,8105$ ), что соответствует случаю (6) и показывает значительное возрастание подавления импульсной помехи при переходе от амплитудного подавления к подавлению с учетом зависимости соседних отсчетов помехи.

Поскольку флюктуационная компонента формируется за счет независимого гауссовского шума и в достаточной степени перекрывающихся импульсов, ее уровень  $\sigma_j^2$  будет определять потенциальную эффективность подавления негауссовской помехи.

Нижняя оценка величины  $\sigma_j$  выполненная с использованием [9], для модели [3] имеет вид:

$$\sigma_j^2 = \sigma_3^2 a / (a + 0,5k_I), \quad (10)$$

а соответствующая верхняя оценка из [3]  $-\sigma_j \leq \sigma_3$ .

на практике для атмосферных радиопомех естественного происхождения  $a \geq 0,5$  и  $k_I < 1,5$ , и, учитывая, что в случае амплитудного подавления атмосферных радиопомех [3]

$$P_{\text{вых}} = \sigma_3^2 [1 + k_I / (a + 0,5)],$$

а также оценки  $\sigma_j$  выигрыш за счет учета зависимости отсчетов помехи не превосходит 4...8 дБ.

Что касается реализации этого выигрыша, то для единственной несингулярной аналитической двумерной модели (6), используя методику оценки параметров из [3], найдем  $k_I = b/\sigma_3$  и

$$\sigma_3^2 = \frac{\sigma_g^2}{1 + \frac{b}{\sqrt{2/\pi}\sigma_g} \exp\{b^2/2\sigma_g^2\} \operatorname{erfc}(b/\sqrt{2}\sigma_g)}.$$

Откуда, учитывая (10) и оценку величины  $c$ , получим, что модель достаточно адекватно описывает помехи с  $k_I < 0,44 \dots 0,7$ , для которых выигрыш – не более 1,6...4,6.

Так как при инженерной реализации будут возникать определенные потери, которые в связи с существенно большими трудностями определения параметров двумерного распределения вероятности, будут превосходить соответствующие потери в одномерном случае [3], преимущество учета корреляции отсчетов помехи может оказаться проблематичным, оставляя в силе для большинства практических случаев вывод о достаточности мер амплитудного подавления атмосферных радиопомех [3].

В определенных же случаях, достаточно широкая полоса и малый вклад флуктуационных помех, достижение преимущества тесно связано с решением проблемы поиска простых алгоритмов, обладающих аналогично одномерному случаю свойством устойчивости результата к виду распределения вероятностей помехи [3].

**Выводы.** Проведен анализ построения математической модели двумерных распределений и потенциальной эффективности подавления негауссовых импульсных помех.

Показано, что для построения не обладающих свойством сингулярности многомерных моделей негауссовых импульсных помех необходимо вводить независимый при рассматриваемой размерности гауссовский шум или использовать профильтрованный импульсный процесс с корреляционной функцией, имеющей начальный квадратичный участок.

Потенциальная эффективность подавления с учетом корреляции помехи определяется уровнем нормализованной флуктуационной компоненты и для атмосферных радиопомех превосходит эффект амплитудного подавления не более чем на 4...8 дБ.

#### Литература

1. Ван дер Зил А. Шумы при измерениях. М.: Мир, 1979. 292 с.
2. Диксон Р.К. Широкополосные системы: Пер. с англ. / Под ред. Варакин Л.Е. Теория сложных сигналов. М.: Сов. Радио, 1970. 376 с.
3. Кабанов В.В. Многомерные модели и потенциальная эффективность подавления негауссовых импульсных помех // Радиотехника. 1990. № 6. С. 42-45.
4. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. М.: Сов. Радио, 1989. 656 с.
5. Ремизов Л.Т. Естественные радиопомехи. М.: Наука, 1985. 196 с.

6. Теория обнаружения сигналов / Под ред. П.А. Бакута. М.: Радио и связь, 1984. 440 с.
7. Тихонов В.И., Миронов М.А. Марковские процессы. М.: Сов. Радио, 1977. 488 с.
8. Трифонов В.В. Исследование статистических характеристик радиопомех ДВ-диапазона. Доклады ТУСУР, № 2. 2007. С. 134-138.
9. Тузов Г.И. Статистическая теория приема сложных сигналов. М.: Сов. Радио, 1977. 400 с.
- 10.Хаджи Б.А., Добрjak Д.С., Вершинин Е.А. Естественные ОНЧ шумы как помехи радиоприему. М.: ИРЭ АН СССР, 1986. 234 с.

УДК 621.396.96.01

## Математический анализ алгоритмов оценки ошибки определения параметров движения маневрирующих объектов

**Владимир Иванович Воловач**, доктор технических наук, доцент,  
и.о. директора Высшей школы передовых производственных технологий,  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования,  
Поволжский государственный университет сервиса, г. Тольятти

*Рассмотрена задача ошибок оценивания параметров движения маневрирующих объектов, возникающих из-за расхождения реальной модели и модели, используемой для построения фильтра. Получено рекуррентное соотношение для построения множества средних значений ошибок оценивания маневрирующих объектов, описываемых линейными дискретными уравнениями. Даны условия, при которых система фильтрации обладает наибольшими ошибками. Показано, что проведенный анализ точности алгоритма фильтрации был сделан для наихудшего случая и имеет оценочный характер.*

Дискретные алгоритмы линейной фильтрации, качество фильтрации, экстремальные значения ошибок, сходимость фильтра, среднеквадратичная ошибка оценивания.

### **Mathematical analysis of algorithms for estimating the error in determining the parameters of movement of maneuvering objects**

**Vladimir Ivanovich Volovach**, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor,  
Acting Director of the Higher School of Advanced Production Technologies,  
Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education,  
Volga Region State University of Service, Tolyatti

*The problem of errors in estimating the motion parameters of maneuvering objects arising from the discrepancy between the real model and the model used to build the filter is considered. A recurrence relation is obtained for constructing a set of average values of errors in the estimation of maneuvering objects described by linear discrete equations. The conditions under which the filtration system has the greatest errors are given. It is shown that the conducted analysis of the accuracy of the filtering algorithm is given for the worst case and has an estimated character.*

Discrete linear filtering algorithms, filtration quality, extreme error values, filter convergence, standard error of estimation.

**Введение.** Широкое распространение дискретных алгоритмов линейной фильтрации [7, 12, 17] для сопровождения маневрирующих объектов оставляет актуальной задачу об ошибках оценивания параметров движения маневрирую-

щих объектов [7, 18, 20]. Несоответствие между реальным движением объекта и используемыми моделями приводит к «расходимости» алгоритма сопровождения [9, 12, 18, 20]. Априорная неопределенность статистических характеристик маневра, шумов измерения преодолевается применением адаптивных алгоритмов [13, 15, 18, 20].

Более достоверные модели движения и измерения содержат как стохастические неопределенности с известными законами и характеристиками распределения, так и не стохастические неопределенности.

О не стохастических неопределенностях наблюдателю известно только то, что они могут принимать любое значение из некоторых известных областей. Задача оценки параметров движения в таких условиях привела к развитию теории гарантированного оценивания [5, 10, 16, 24].

В данной работе рассматривается задача об ошибках оценивания, возникающих из-за несоответствия реальной модели и модели, используемой для построения фильтра. В реальной модели наряду с шумами, стохастическими неопределенностями, аддитивно действуют не стохастические неопределенности. Наблюдатель при построении фильтра считает, что в модели имеют место только шумы.

Работа касается проблем, затронутых в [12, 19] и развивает подход [4, 10, 24] по использованию выпуклых многогранников в теории оценивания. Другой подход к ошибкам оценивания и оптимальным помехам, затрудняющих наблюдение, изложен в [21].

**Постановка задачи.** Пусть наблюдатель осуществляет сопровождение объекта  $i$ -го типа, действительные уравнения движения, оцениваемый процесс, которого имеют вид

$$\vec{x}(k+1) = A_i \vec{x}(k) + B_i \vec{u}(k), k = 0, 1, 2, \dots, \quad (1)$$

где  $\vec{x}(k)$  – вектор фазовых координат;  $\vec{u}(k)$  – вектор управления;  $A_i, B_i$  – постоянные матрицы соответствующих размерностей.

Уравнение  $\vec{u}(k) \in U_i(k)$ , где  $U_i(k)$  – выпуклое замкнутое ограниченное множество.

Наблюдатель для сопровождения цели, оценивания процесса, использует модель движения [1], не совпадающую с (1):

$$\vec{x}(k+1) = \bar{A} \vec{x}(k) + \bar{B} \vec{w}(k) \quad (2)$$

и уравнению измерения

$$\vec{y}(k) = G \vec{x}(k) + \vec{\xi}(k), \quad (3)$$

где  $\vec{w}(k), \vec{\xi}(k)$  – независимые гауссовские векторы с нулевым средним и заданными матрицами ковариаций  $Q(i), R(i)$ ,

$$M \vec{w}(i) \vec{w}'(j) = Q(i) \delta(i, j),$$

$$M \vec{\xi}(i) \vec{\xi}'(j) = R(i) \delta(i, j).$$

Здесь  $M$  – символ математического ожидания;  $\delta(i, j)$  – символ Кронекера; штрих означает операцию транспонирования.

Источником ошибок оценивания являются не только различия в уравнениях (1), (2), но и то, что при оценивании параметров движения в условиях воздействия естественных и преднамеренных помех в правой части уравнения изме-

рения (3) наряду со случайной составляющей шума измерения  $\vec{\xi}(k)$  существует и не стохастическая составляющая  $v(k)$ , не учитываемая наблюдателем:

$$\vec{y}(k) = G\vec{x}(k) + \vec{v}(k) + \vec{\xi}(k). \quad (4)$$

В результате воздействия помех составляющая  $\vec{v}(k)$  может принимать любое значение из некоторого множества  $V_i(k)$ , где индекс  $i$  – номер типа объекта. Статистические характеристики  $\vec{v}(k)$  либо не известны, либо не существуют.

Таким образом, множество типов объектов образует набор множества  $\Omega(k) = \{A_i, B_i, U_i(k), V_i(k), i = \overline{1, \gamma}\}$ .

В дальнейшем для упрощения обозначений будем опускать индекс  $i$  за исключением отдельных случаев.

Пусть наблюдателем для модели (2), (3) синтезирован, например, фильтр Калмана, который определяется уравнениями [7]

$$\begin{aligned} \hat{\vec{x}}\left(k + \frac{1}{k}\right) &= \bar{A}\hat{\vec{x}}(k/k), \\ \hat{\vec{x}}(k/k) &= \hat{\vec{x}}(k/k - 1) + K(k) [\vec{y}(k) - G\hat{\vec{x}}(k/k - 1)], \\ K(k) &= P(k/k - 1)G'[GP(k/k - 1)G' + R(k)]^{-1}, \\ P(k/k - 1) &= \bar{A}P(k - 1/k - 1)\bar{A}' + \bar{B}Q(k)\bar{B}', \\ P(k/k) &= P(k/k - 1) - K(k)GP(k/k - 1), \end{aligned} \quad (5)$$

где  $\hat{\vec{x}}\left(k + \frac{1}{k}\right)$  и  $\hat{\vec{x}}(k/k)$  – прогноз и оценка вектора состояния соответственно;  $K(k)$  – коэффициент усиления фильтра Калмана;  $P(k/k - 1)$ ,  $P(k/k)$  – корреляционные матрицы ошибок прогноза и оценки.

Чрезвычайно важным показателем качества устройств фильтрации [3] является полная среднеквадратичная ошибка оценивания

$$P_e(k) = V_e(k) + \vec{\mu}(k)\vec{\mu}'(k),$$

где  $V_e(k) = M\{[\vec{e}(k) - \vec{\mu}(k)][\vec{e}(k) - \vec{\mu}(k)]'\}$  – ковариационная матрица ошибки оценивания

$\vec{e}(k) = \vec{x}(k) - \hat{\vec{x}}(k/k)$ ;  $\vec{\mu}(k) = M\vec{e}(k)$ ;  $\vec{\mu}(k)\vec{\mu}'(k)$  – матрица, являющаяся внешним произведением вектора  $\vec{\mu}(k)$ . Ковариационная матрица определяется только априорными данными.

Из уравнений (1), (4), (5) имеем [18, 23]

$$\vec{\mu}(k + 1) = \bar{A}^1(k)\vec{\mu}(k) + B_i^1(k)\vec{u}(k) - K(k + 1)\vec{v}(k + 1) + \Delta A_i^1(k)\vec{x}(k), \quad (6)$$

$k = 0, 1, 2, \dots$ ,

где

$$\bar{A}^1(k) = [I - K(k + 1)G]\bar{A};$$

$$B_i^1(k) = [I - K(k + 1)G]B_i;$$

$$A_i^1(k) = [I - K(k + 1)G]\Delta A_i;$$

$$\Delta A_i = A_i - \bar{A};$$

$I$  – единичная матрица.

Средняя ошибка  $\vec{\mu}(k + 1)$  фильтрации зависит от типа объекта  $i$  и полностью определяется реализовавшимися значениями  $\vec{u}(k)$ ,  $\vec{v}(k + 1)$ , ( $k = 0, 1, 2, \dots$ ), от которых, следовательно, зависит и полная среднеквадратичная ошибка оценивания  $P_e(k)$ .

Поскольку  $u(k)$ ,  $v(k + 1)$ ,  $k = 0, 1, 2, \dots$ , могут принимать любые значения

из множеств  $U(k), V(k+1)$ , из (1), (6) аналогично [16, 23, 24] получим множественно-множественное отображение:

$$\dot{M}(k+1) = \bar{A}^1(k)\dot{M}(k) + B_i^1(k)U_i(k) - K(k+1)V_i(k+1) + \Delta A_i^1(k)X_i(k), \quad (7)$$

где  $X_i(k)$  – множество достижимости системы (1), а  $\dot{M}(k+1)$  – множество достижимых средних ошибок на  $(k+1)$ -м шаге, начиная с нулевого шага для  $i$ -го объекта.

Если же  $\vec{\mu}(k), \vec{x}(k)$  – реализовавшиеся значения ошибки и вектора фазовых координат на  $k$ -м шаге, то при переходе на  $(k+1)$ -й шаг из (6), (7) имеем множество ошибок

$$\begin{aligned} \dot{M}(k+1/k) = & \bar{A}^1(k)\vec{\mu}(k) + B_i^1(k)U_i(k) - \\ & - K(k+1)V_i(k+1) + \Delta A_i^1(k)\vec{x}(k). \end{aligned} \quad (8)$$

Очевидно, что

$$\begin{aligned} \dot{M}(k+1/k) \in & \dot{M}(k+1) = \\ = & \{\dot{M}(k+1/k) \forall \vec{\mu}(k) \in \dot{M}(k), \vec{x}(k) \in X_i(k)\}. \end{aligned}$$

При практических расчетах, когда неизвестно значение  $\vec{x}(k)$ , его можно заменить на

$$\vec{x}(k) = M\vec{x}(k) = \vec{\mu}(k) + \vec{\mu}(k),$$

где  $\vec{\mu}(k) = M\hat{\vec{x}}(k/k)$ .

Тогда (8) примет вид

$$\begin{aligned} \dot{M}(k+1/k) = & \bar{A}^1(k)\vec{\mu}(k) + B_i^1(k)U_i(k) - \\ - & K(k+1)V_i(k+1) + \Delta A_i^1(k)\vec{\mu}(k), \end{aligned} \quad (8a)$$

где  $A_i^1(k) = [I - K(k+1)G]A_i$ .

В уравнении (8a) используются результаты измерения в виде  $\vec{\mu}(k)$ . Аналогичную замену при необходимости можно произвести во всех выражениях, где имеется  $\vec{x}(k)$ .

Таким образом, если множества  $\dot{M}(k+1/k)$  зависят от результатов измерения, то множества  $\dot{M}(k+1)$  полностью определяются априорной информацией о системе (1)-(4), могут быть построены при проектировании фильтра и позволяют оценить предельно достижимые значения  $\vec{\mu}(k+1) \in M(k+1)$  в наиболее неблагоприятном случае.

Алгоритмы построения множеств (7), (8) для эллипсоидальных множеств  $\dot{M}(0), U(k), V(k+1), k = 0, 1, 2, \dots$ , приведены в [8]. Для выпуклых многогранников в [15, 20], при этом множества (7), (8) будут выпуклыми многогранниками.

Качество фильтрации будем оценивать по значениям величины

$$\Phi(k) = \vec{\mu}'(k)\theta(k)\vec{\mu}(k), k = 0, 1, 2, \dots,$$

либо  $\Phi(N)$ , где  $N$  – наперед заданный номер.

Здесь конкретный вид матрицы  $\theta(k)$  определяется назначением системы фильтрации.

Поэтому представляет большое прикладное значение отыскание для каждого типа объекта  $i$  ( $i = \overline{1, \gamma}$ ) последовательностей  $\vec{\mu}(k), \vec{v}(k+1), (k = 0, 1, 2, \dots)$ , являющихся решением либо задачи

$$\max_{\vec{u}(k) \in U_i(k), \vec{v}(k+1) \in V_i(k+1)} \Phi(k+1), k = 0, 1, 2, \dots, \quad (9)$$

либо задачи

$$\max_{\vec{u}(k) \in U_i(k), \vec{v}(k+1) \in V_i(k+1)} \Phi(N), \quad k = \overline{0, N-1}, \quad (10)$$

где  $N$  – наперед заданный номер.

Решения задач (9), (10) удовлетворяют неравенству

$$\max \Phi(k) \leq \max \Phi(N) = \widehat{\Phi}(\dot{M}_i(N)),$$

где  $\widehat{\Phi}(\dot{M}_i(N)) = \max \Phi(N)$  на множестве  $M_i(N)$ .

Сравнение качества фильтрации по  $i$  (типам объектов) возможно проводить по значениям  $\widehat{\Phi}(\dot{M}_i(N))$ . Наихудшим для сопровождения будет объект, для которого достигается

$$\max_i \widehat{\Phi}(\dot{M}_i(N)).$$

С другой стороны, лучшей моделью (2), (3) будет та, которая обеспечивает  $\min_{\vec{A}, \vec{B}} \max_i \widehat{\Phi}(\dot{M}_i(N))$ .

**Асимптотические свойства ошибок фильтрации.** Представим решение системы (6) в виде [12]

$$\vec{\mu}(k+1) = \varphi(k, 0)\vec{\mu}(0) + \sum_{n=0}^{k-1} \varphi(k, n+1) [\vec{z}(n) + \Delta A^1(n)\vec{x}(n)], \quad (11)$$

где

$$\varphi(k, 0) = \prod_{j=0}^{k-1} \bar{A}^1(j), \quad \varphi(k, k) = I, \quad \varphi(k+1, l) = \bar{A}^1(k)\varphi(k, l),$$

$$\varphi(k, j) = \prod_{j=0}^{k-1} \bar{A}^1(j), \quad \vec{z}(k) = B^1(k)\vec{u}(k) - K(k+1)\vec{v}(k+1).$$

Для сходимости фильтра при  $\Delta A_i = 0$ ,  $\vec{z}(n) = 0$  необходимо, чтобы  $\varphi(k, 0)\vec{\mu}(0) \rightarrow 0$  с ростом  $k$ . Отсюда следует, что элементы матрицы  $\varphi(k, 0)$  стремятся к нулю с ростом  $k$ . Значит, убывают и элементы матрицы  $\varphi(k, m), \varphi(k, m-1), \varphi(k, m-2), \dots, \varphi(k, 1)$ .

Тогда можно всегда указать такой номер  $m$ , что из (11) получим

$$\vec{\mu}(k+1) \approx \sum_{n=m}^{k-1} \varphi(k, n+1) [\vec{z}(n) + \Delta A^1(n)\vec{x}(n)]. \quad (12)$$

Таким образом, сходимость фильтра означает конечную «память» фильтра. В результате ошибки на  $(k+1)$ -м шаге зависит от последовательности значений  $\vec{z}(n), \vec{x}(n)$  на предыдущих шагах лишь от  $m$  до  $k-1$ , а не от 0 до  $k-1$ .

Из (1), (5), (12) получим

$$\vec{\mu}(k+1) \cong \sum_{n=m}^{k-1} \varphi(k, n+1) \{ \vec{z}(n) + \Delta A^1(n) \times \\ \times [\sum_{j=m}^{n-2} \psi(n-1, j+1)B(j)\vec{u}(j) + \psi(n-1, m)\vec{x}(m)] \}, \quad (13)$$

где  $\psi(\alpha, \beta) = A^{\alpha-\beta-1}$ .

Выражение (13) позволяет существенно упростить решение задачи (10), найти решение частных задач  $\max \vec{\mu}_j^2(N)$  ( $\vec{\mu}_j$  –  $j$ -я координата вектора  $\vec{\mu}$ ), оценить влияние неточности модели.

Аналогично (7) из (13) получим

$$\dot{M}(k+1) \approx \sum_{n=m}^{k-1} \varphi(k, n+1) \{ B_i^1(k)U_i(k) - K(k+1)V_i(k+1) + \\ + \Delta A_i^1(n) [\sum_{j=m}^{n-2} \varphi(n-1, j+1)B_i(j)U_i(j) + \\ + \psi(n-1, m)X_i(m)] \}. \quad (14)$$

При достаточно больших значениях  $k_0$  множество  $\dot{M}(k)$  при  $k > k_0$  можно аппроксимировать постоянным множеством [5]:

$$\dot{M}(k_0) = \sum_{n=m}^{k_0-1} \varphi(k_0, n+1) [B_i^1(n)U_i - K(n+1)V_i],$$

где  $\Delta A = 0, R(k), U(k), V(k), Q(k)$  постоянных, и если система  $\vec{x}(k+1) =$

$A\vec{x}(k)$ ,

$\vec{y}(k) = G\vec{x}(k)$  обнаруживаемая либо вполне наблюдаема, либо асимптотически устойчива.

При  $k > k_0$  представим (14) в виде

$$\dot{M}(k+1) \approx \dot{M}(k_0) + \Delta \dot{M},$$

где символом  $\Delta \dot{M}$  обозначены остальные слагаемые в (14). Множество  $\dot{M}(k_0)$  характеризует потенциальную точность фильтра (5) при  $\Delta A = 0$ .

**Решение экстремальных задач.** Решение задач (9), (10) наиболее просто, когда множества  $\dot{M}(0)$ ,  $U(k)$ ,  $V(k+1)$ ,  $k = 0, 1, \dots$  – выпуклые многогранники либо могут ими аппроксимироваться [3, 6].

Тогда (9), (10) с учетом (13) будут задачами квадратичного программирования [1, 23] и их решение достигается в одном из угловых точек множества  $\dot{M}(k+1/k)$  и  $\dot{M}(N)$  соответственно.

По найденным экстремальным значениям  $\hat{u}(k)$ ,  $\hat{v}(k+1)$ , а для (10) их последовательность.

Можно сначала найти экстремальные значения  $\hat{u}(k)$ ,  $\hat{v}(k+1)$ , которые будут координаты одной из угловых точек множества  $W(k) = U(k)V(k+1)$  – декартова произведения множеств  $U(k), V(k+1)$ . На практике число угловых точек ограничено и их можно найти [2, 22] на этапе проектирования фильтра.

Тогда  $\max \Phi(k)$  можно найти непосредственно перебором значений  $\Phi(k)$  на множестве угловых точек при небольшом их числе, либо с помощью условий экстремума [1].

**Рассмотрим пример.** Рассмотрим уравнения движения, измерения и модели из [7], допускающие разделение на две независимые идентичные системы для дальности и азимута. Для того, чтобы получить уравнение ошибок (6), введем вместо вектора фазовых координат

$$\vec{x}(k) = [r(k), \dot{r}(k)]'$$

расширенный вектор

$$\vec{x}_p(k) = [\vec{x}(k), \vec{u}(k)]',$$

а в уравнениях (1), (4) расширенные матрицы

$$A_p = \begin{bmatrix} 1 & T & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0,5 \end{bmatrix}, B_p = [0 \ 1 \ 0,5]', G_p = [1 \ 0 \ 0].$$

Расчет проводился для следующих значений параметров:

- $T = 10$  с – период обзора;
- $\sigma_r^2 = 10^6$  м<sup>2</sup> – дисперсия ошибок измерения дальности;
- $\sigma_{M_1}^2 = 9 \times 10^4$  м<sup>2</sup>/с<sup>2</sup> – дисперсия интенсивности маневра;
- $\rho = 0,5$  – коэффициент корреляции;
- $r(0) = 10^5$  м – начальная дальность.

Ограничения на управления и воздействия имеют вид

$$|u(k)| \leq 300 \text{ м/с}, |v(k)| \leq 10^3 \text{ м}.$$

Качество фильтрации оценивалось по среднему значению ошибки дальности  $\mu_1(k)$ .

В таблице 1 приведены результаты расчета экстремальных значений

$\mu_1(k)$ , при этом экстремальные значения  $u(k), v(k)$  оказываются постоянными и равны  $\hat{u} = -300$  м/с,  $\hat{v} = 10^3$  м.

Таблица 1 – Результаты экспериментальных значений

$u$	$v$	$k$					
		1	2	3	4	5	6
-0,3	1	1,067	1,030	1,085	1,068	1,073	1,070
-0,2	0	-0,134	-0,097	-0,155	-0,082	-0,134	-0,085
0,0	1	-1,040	-0,946	-1,014	-0,0964	-1,031	-1,010

Нетрудно убедиться, что  $(\hat{u}, \hat{v}) = \arg \max \mu_1^2(k)$  удовлетворяет условию  

$$(\hat{u}, \hat{v}) = \begin{cases} (300, -10^3) & \forall \hat{\mu}_1(k) > 0 \\ (-300, 10^3) & \forall \hat{\mu}_1(k) < 0 \end{cases}$$

Для сравнения в таблице 1 даны экстремальные значения  $\mu_1(k)$  при отсутствии воздействия  $v \equiv 0$  на процесс измерения. При этом ошибка уменьшается на порядок.

Воздействие на измерение при отсутствии маневра ( $u \equiv 0$ ) создает ошибку по дальности, меньшую чем ошибка, возникающая при  $u \neq 0, v \neq 0$ , на (5...10)%. При увеличении ограничения  $U(k)$  ошибка измерения дальности растет. Постоянство значений  $\hat{u}(k), \hat{v}(k)$  обусловлено отсутствием ограничений на  $x(k)$ .

При учете ограничений  $X(k) \ni x(k)$  экстремальные управления  $\hat{u}, \hat{v}$  принимают релейный характер  $\hat{u} = \pm 300$  м/с,  $\hat{v} = \pm 10^3$  м, а моменты переключения определяются ограничениями  $X(k)$ . Очевидно, что экстремальные значения ошибок  $\hat{\mu}_1(k)$  при этом становятся меньше.

**Выводы.** Произведен математический анализ алгоритмов оценивания ошибок параметров движения маневрирующих объектов, возникающих из-за расхождения реальной модели и модели, используемой для построения фильтра. Найдены выражения для множества средних значений ошибок фильтрации, рассмотрены асимптотические и экстремальные свойства ошибок, множества. Показано, что проведенный анализ точности алгоритма фильтрации носит оценочный характер и рассчитан на наихудший случай. При неудовлетворительной точности необходимо либо изменить модель, либо синтезировать минимаксно-стохастический фильтр.

#### Литература

1. Аоки М. Введение в методы оптимизации. М.: Наука, 1977. 234 с.
2. Баклицкий В.К., Юрьев А.Н. Корреляционно-экстремальный методы навигации. М.: Радио и связь, 1982. 256 с.
3. Бакулов П.А., Степин В.М. Методы и устройства селекции движущихся целей. М.: Радио и связь, 1986. 288 с.
4. Белавин О.В. Основы радионавигации. М.: Сов. Радио, 1975. 439 с.

5. Вопросы статистической теории радиолокации / Под ред. Г.П. Тартаковского. М.: Сов. Радио, 1983. 424 с.
6. Емиличев В.А., Ковалев М.М., Кравцов М.К. Многогранники, графы, оптимизация (комбинаторная теория многогранников). М.: Наука, 1981. 324 с.
7. Зингер Р.А., Бенке К.В. Способ определения дальности до наземного источника излучения с самолета, оснащенного азимутальным фазовым пеленгатором // Зарубежная радиоэлектроника. 1972. № 1. С. 44-60.
8. Кинкулькин И.Е., Рубцов В.Д., Фабрик М.А. Фазовый метод определения координат / Под ред. И.Е. Кинкулькина. М.: Сов. Радио, 1979. 280 с.
9. Коростелев А.А. Пространственно-временная теория радиосистем. М.: Радио и связь, 1987. 320 с.
10. Космические траекторные измерения / П.А. Агаджанов, Н.М. Барабанов, Н.И. Буренин и др.; под ред. П.А. Агаджанова, В.Е. Дулевича, В.Е. Коростелева. М.: Сов. Радио, 1969. 504 с.
11. Радиолокационные устройства (теория и принципы построения) / В.В. Васин, О.В. Власов, В.В. Григорин-Рябов и др.; под ред. В.В. Григорина-Рябова. М.: Сов. Радио, 1970. 680 с.
12. Сейдж Э.П., Уайт У.С. Оптимальное управление системами. М.: Радио и связь, 1982. 392 с.
13. Скользник Р. Справочник по радиолокации: Пер. с англ. В 4 т. / Под общей ред. К.Н. Трофимова. М.: Сов. Радио, 1976. 456 с.
14. Сосулин Ю.Г. Оптимальное обнаружение радиосигналов. М.: МАИ, 1978. 59 с.
15. Сосулин Ю.Г. Обнаружение и оценивание параметров траектории объектов. М.: МАИ, 1982. 28 с.
16. Сосновский А., Хаймович И.А. Авиационная радионавигация: Справочник. М.: Транспорт, 1980. 256 с.
17. Теоретические основы радиолокации / Я.Д. Ширман, В.Н. Голиков, И.Н. Бусыгин и др.; под ред. Я.Д. Ширмана. М.: Сов. Радио, 1970. 560 с.
18. Теоретические основы радиолокации / А.А. Коростелев, Н.Ф. Клюев, Ю.А. Мельник и др.; под ред. В.Е. Дулевича. М.: Сов. Радио, 1978. 608 с.
19. Фильтрация и стохастическое уравнение в динамических системах / Под ред. Леондеса К.Т. М.: Мир, 1980. 480 с.
20. Финкельштейн М.И. Основы радиолокации. М.: Радио и связь, 1983. 536 с.
21. Черноусько Ф.Л., Колмановский В.Б. Оптимальное уравнение при случайных возмущениях. М.: Наука, 1978. 342 с.
22. Черников С.Н. Линейные неравенства. М.: Наука, 1968. 424 с.
23. Ширяев В.И. Теория и техника радиосистем: Тематический сборник научных трудов. Челябинск: Политехнический институт, 1984. С. 114.
24. Экстремальная радионавигация / В.И. Алексеев, А.М. Корков, Р.И. Полонников и др.; под ред. Р.И. Полонникова и В.П. Тарасенко. Наука, 1978. 280 с.

УДК 004.05

**Анализ структурированных кабельных систем в системной  
точке бифуркации. Вертикальная интеграция и особенности  
ее внедрения**

**Андрей Борисович Семенов**, доктор технических наук, профессор,  
Национальный исследовательский университет Московский государственный  
строительный университет (НИУ МГСУ), г. Москва,

**Владимир Михайлович Арtyушенко**, доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой информационные технологии и управляющие системы,  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования

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

*В рамках системного подхода показана перспективность системной  
вертикальной интеграции пассивного и активного сетевого оборудования как  
средства наращивания технико-экономической эффективности внутриобъек-  
товых информационных систем. Рассмотрены варианты выполнения такой  
интеграции и продемонстрирована выгодность ее углубления на нижнем поль-  
зовательском уровне. Обоснована целесообразность разбиения классической гори-  
зонтальной подсистемы СКС на два подуровня.*

Структурированные кабельные системы, технология Ethernet, вертикальная инте-  
грация, активная точка консолидации, однопортовые информационные розетки.

**Analysis of structured cabling systems at the system bifurcation point.  
Vertical integration and its implementation features**

**Andrey Borisovich Semenov**, Doctor of Technical Sciences, professor,  
National Research University Moscow State University of Civil Engineering  
(NRU MGSU), Moscow,

**Vladimir Mikhaylovich Artyushenko**, doctor of Technical Sciences, Professor,  
Head of the Department of Information Technologies and Control Systems,  
Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education  
«Technological University named after twice Hero of the Soviet Union,  
pilot-cosmonaut A.A. Leonov», Korolev, Moscow region

*Within the framework of the system approach, the prospects of the system vertical  
integration of passive and active network equipment as a means of increasing the  
technical and economic efficiency of on-site information systems are shown. The options  
for performing such integration are considered and the profitability of deepening  
it at the lower user level is demonstrated. The expediency of dividing the classical hor-  
izontal subsystem of the SCS into two sublevels is substantiated.*

Structured cabling systems, Ethernet technology, vertical integration, active consolidation point, single-port telecommunication outlets.

**Введение.** На большинстве современных объектов промышленного и гражданского строительства, на которых постоянно или длительное время находятся люди, наряду с отоплением, вентиляцией, водо- и электроснабжением, и прочими классическими инженерными системами реализуется также информационно-телекоммуникационная система (ИТС). Она предназначена для удовлетворения потребностей пользователей в различных видах связного и информационного сервиса и создается с привлечением проверенной временем модели OSI взаимодействия информационных систем. Физический уровень формируемого комплекса в реалиях сегодняшнего дня выполняется преимущественно в форме структурированной кабельной системы (СКС). Не исключены иные подходы, но известные достоинства структурированного кабелирования по ряду параметров, ключевых для массовой практики эксплуатации ИТС, обеспечивают СКС доминирующее положение в рассматриваемой области.

СКС представляет собой хорошо востребованный конечными пользователями высокотехнологичный продукт. Однако, как уже отмечалось ранее [1], что уже в середине второго десятилетия текущего века потенциал, который был заложен в технику структурированного кабелирования на этапе формирования концепции в середине-конце 80-х гг. прошлого столетия, был в значительной мере исчерпан. В результате как технический объект массового применения структурированная проводка значимо потеряла былую экономическую привлекательность для широкого круга потребителей, не устарев при этом морально. Соответственно, одной из актуальнейших задач ИТ-отрасли становится восстановление того исходного комплекса технико-экономических преимуществ, который демонстрировала СКС на предыдущих этапах своего практического использования. Данная работа выполняется по ряду направлений, одно из которых рассматривается далее и обозначается как вертикальная интеграция.

Вертикальная интеграция понимается в смысле иерархии отдельных уровней упомянутой выше модели OSI. Де-факто, с учетом места нахождения СКС в стеке уровней OSI сопутствующие ей процедуры сводятся к углублению до наиболее полного и максимально бесшовного сопряжения структурированной проводки с подключаемым к нему различным активным сетевым оборудованием.

Оптимизационные процедуры осуществляются с учетом достигнутого уровня техники и обязательно принимают во внимание положенные в основу СКС постулаты, например, в части универсальности горизонтальной подсистемы. На правах альтернативного подхода к построению ИТС допустим частичный отказ от их выполнения в тех ситуациях, когда это дает значимый результирующий технико-экономический эффект.

**Существующая схема взаимодействия СКС с активным оборудованием различного назначения и ее ограничения.** Основное назначение СКС – доставка с заданным качеством сигналов от разъема до разъема сетевых интерфейсов активного оборудования ИТС. Дополнительно она может решать некоторые иные практически важные задачи. Наиболее известная среди таковых – обеспечение дистанционного питания маломощных терминалных устройств по

технологии группы PoE [4]. Де-факто СКС, эксплуатируемая в составе современной ИТС массового применения, представляет собой многофункциональный компонент информационной инфраструктуры.

Само назначение СКС изначально предполагает наличие определенной гармонизации параметров техники, используемой для построения двух непосредственно взаимодействующих между собой физического и канального уровней модели OSI.

В рамках реализации концепции обеспечения тесного взаимодействия активного сетевого оборудования и кабельного тракта можно указать на то, что:

- кабельный тракт непосредственно инкапсулируется в Ethernet-Link активного оборудования, рисунок 1.
- в процессе тестирования параметров СКС по модели тракта оконечные вилки аппаратных шнурков рассматриваются как часть активного оборудования и исключаются из измеряемой конфигурации кабельной системы;
- требования к параметрам кабельного тракта в явном виде введены в спецификации группы IEEE802.3 сетевых интерфейсов Ethernet.

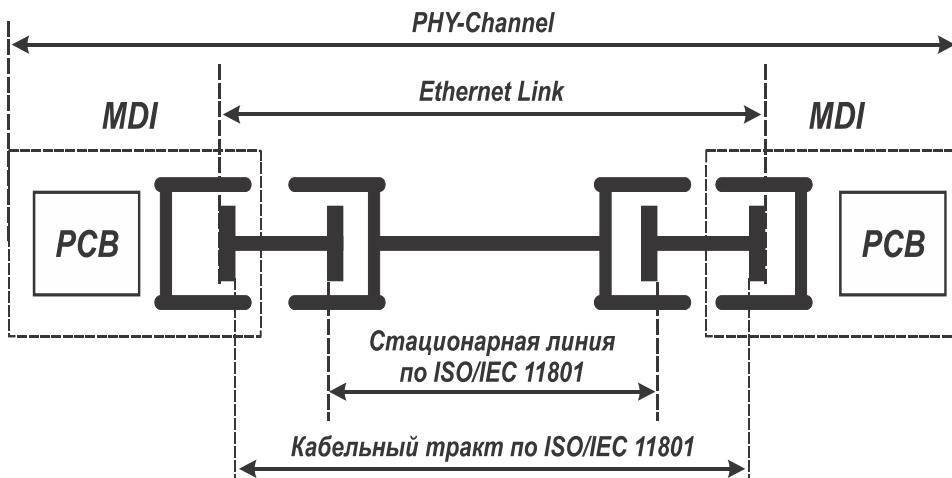


Рисунок 1 – Стационарная линия и тракт сетевых интерфейсов Ethernet:  
MDI – (англ. medium dependent interface) – один из вариантов реализации  
интерфейсного порта; PCB – (англ. printed circuit board) – печатная плата

Последнее отказывает существенное обратное влияние на СКС тем, что открывает возможности сертификации кабельных линий на соответствие требованиям конкретного приложения. Это значимо приближает СКС к потребностям практики, расширяя ее проектную и эксплуатационную гибкость. При целенаправленном доведении данного принципа до своего логического завершения формируется новое техническое направление. Примером такового является активно развивающийся в последнее время «длинный» Ethernet [5].

Из представленного непосредственно вытекает, что зафиксированная в стандартах глубина интеграции ЛВС и СКС вполне отвечала уровню техники

конца 80-х – начала 90-х гг. прошлого столетия. Её главный недостаток – исключительно структурный характер на уровне одиночного тракта, что, впрочем, вполне соответствовало изначальной концепции СКС, но перестало отвечать современным требованиям.

**Особенности взаимодействия СКС с активным сетевым оборудованием.** Концепция СКС разрабатывалась в «до коммутаторную» эру эволюции локальных сетей и отражала возможности техники этого периода. В частности, необходимость выполнения правила четырех репитеров, известное также как IEEE way [3], ограничивает количество уровней иерархии СКС тремя: горизонтальная и две магистральные подсистемы.

Коммутатор, выполняя все функции классического концентратора, отличается от него заметно расширенным функциональными возможностями, что достигается применением принципа мультиплексирования сигналов, поступающих на его порты. За счет этого он

- радикально устраняет ключевую для исходного варианта Ethernet проблему возникновения коллизий и полностью восстанавливает форму сигнала на выходе своих портов (регенерация);
- позволяет значительно нарастить быстродействие сети без уменьшения предельной дальности связи.

Дополнительно коммутатор берет на себя также выполнение ряда таких полезных и хорошо востребованных в практике построения сетей функций как преобразование среды и формирования VLAN. Одновременно замена им обычных концентраторов никоим образом не влияет на стоимостные параметры проекта.

Простота внедрения коммутаторов в сетевые структуры определяется изначальной тесной связью между ЛВС и СКС, которые демонстрируют явно выраженную топологическую идентичность и хорошо гармонизированы друг с другом. Критически важным в этом вопросе становится то, что топология СКС инвариантна по отношению к схеме построения концентратора. Иначе говоря, глубокий апгрейд сети с выводом ее на качественно новый уровень в части функциональных возможностей производится простой прямой заменой активного оборудования.

При дальнейшей системной оптимизации ИТС в целом необходимо учитывать следующую совокупность факторов:

- рост стоимости меди и нефти как основных сырьевых компонентов для их изготовления;
- характерное для последнего времени увеличение количества линий из-за массового применения сетевого оборудования цифрового потолка [6];
- резкое падение стоимости коммутаторов всех разновидностей как ключевого сетевого оборудования;
- существенное сокращение темпов обновления ПО.

В этой ситуации объективно резко растет значение коммутатора как компонента, который берет на себя роль промежуточного связного звена между пользовательскими рабочими станциями ЛВС и обслуживающими их немногочисленными серверами, выполняя при этом функции мультиплексирования.

**Сетевые структуры следующего поколения.** Коммутатор как сетевое устройство выполняет процедуры мультиплексирования сигналов отдельных активных терминальных устройств. Данная особенность позволяет разделить упомянутую выше вертикальную интеграцию на системную и структурную составляющие, рисунок 2.



**Рисунок 2 – Разновидности вертикальной интеграции в современной внутриобъектовой ИТС**

Системная составляющая дает разработчику решения в целом еще одну степень свободы за счет того, что открывает перспективы использования в качестве объекта оптимизации группу кабельных трактов. Эффект от внедрения соответствующих решений потенциально усиливается за счет возможности применения классического мультиплексирования. Преимущества этого приема практически реализуются через переработку структуры нижнего уровня ИТС, а полученный результат дополнительно наращивается применением коммутаторов специфического дизайна.

В основе технической возможности модернизации базовой концепции построения информационной системы лежит факт того, что коммутаторы как сетевое оборудование не попадают под действие упомянутого выше правила четырех репитеров. Эта особенность позволяет без ограничения нарастить количество уровней иерархии ЛВС.

Для массовой практики построения сетей применяется деление нижнего уровня на два подуровня с выносом части оборудования непосредственно в рабочую область. Этот прием привлекателен тем, что

- по крайней мере частично решает проблему нехватки места в технических помещениях нижнего уровня, значимо обострившуюся в последние годы из-за роста количества подсистем в составе ИТС [7];
- значимо ослабляет требования к инженерному обеспечению технических помещений за счет выноса значительно части источников выделения тепла непосредственно в область для размещения пользователей.

Коммутаторы дополнительного уровня могут размещаться

- в промежуточной точке горизонтального проброса (активная консолидационная точка [7]);

- непосредственно на пользовательских рабочих местах, где берут на себя функции пользовательских информационных розеток (т.н. инсталляционные микрокоммутаторы).

**Активная точка консолидации как пример вертикальной интеграции.** Проиллюстрируем выгодность вертикальной интеграции для массовой практики реализации ИТС на примере активной точки консолидации. Отличается от иных решений этой группы тем, что реализуется на обычных коммутаторах уровня рабочей группы.

Схема организации нижнего уровня ИТС с использованием активной консолидационной точки изображена на рисунке 3.

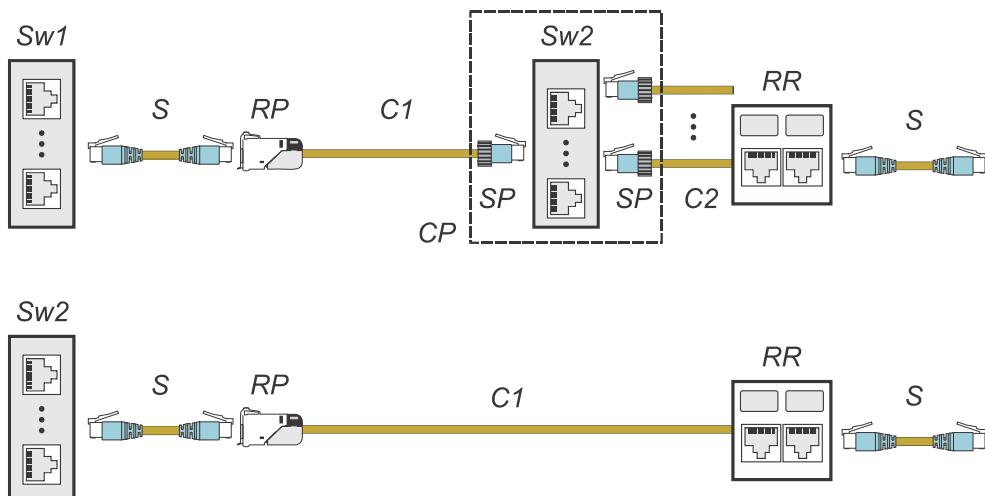


Рисунок 3 – Структура нижнего уровня ИТС в случае ее построения с применением активной точки консолидации (вверху) и при традиционном подходе (внизу):  
 $C1, C2$  – линейные кабели;  $CP$  – корпус точки консолидации;  $RP$  – розетка панели в техническом помещении;  $S$  – шнур;  $SP$  – вилка полевой установки;  
 $Sw1, Sw2$  – коммутатор ЛВС

Отметим, что в структуре с активной точкой консолидации применяется на участке  $CP$ -link, т.е. в данном случае между коммутаторами  $Sw1$  и  $Sw2$  формируется типовая линия MPTL с несимметричной по концевым элементам структурой (розетка – вилка). В отличие от этого на участке от коммутатора  $Sw2$  до информационной розетки  $RR$  строится инверсная структура MPTL вида вилка-розетка. Данное обстоятельство

- должно учитываться при проведении сертификационного и иного тестирования;
- по меньшей мере вдвое увеличивает объем работ по сертификации кабельной системы.

Предполагаем, что рассматриваемая далее структура полностью удовлетворяет выдвигаемым требованиям с технической точки зрения, т.е. вопрос о целесообразности ее внедрения переходит исключительно в экономическую плоскость. В качестве меры стоимости соответствующего компонента, необходимого

для реализации нижнего уровня ИТС, примем стоимость 1 м горизонтального кабеля категории 6, который рассматривается действующими стандартами как обязательный для использования при построении горизонтальной подсистемы СКС. Усредненная по десяти производителям стоимость отдельных компонентов, необходимых для реализации нижнего уровня ИТС приведена в таблице 1.

**Таблица 1 – Относительная стоимость оборудования и работ по монтажу компонентов категории 5e и 6 модельного тракта горизонтальной подсистемы СКС**

Компонент	Обозначение	Ед. изме- рения	Стоимость, условные. едини- цы	
			Компонент	Работы по монтажу
Кабель	C1, C2	м	1	C1, C2 × L1, L2
Порт панели	RP	шт.	5,75 ±1,40	RP
Порт розетки	RR	шт.	6,19 ±1,59	RR
Вилка полевой уста- новки	SP	шт.	7,19±1,38	SP
Шнур 2 м	S	шт.	5,67 ±1,58	-
Корпус точки консо- лидации	CP	шт.	49,11±12,6	CP
Порт коммутатора Sw1	-	шт.	9,84±2,96	-
Порт коммутатора Sw2	-	шт.	7,14±2,62	-

В качестве активного оборудования предполагается использование техники средней ценовой группы. Некоторое увеличение стоимости порта коммутатора верхнего подуровня связано с необходимостью применения в этой части ИТС более скоростного устройства для сохранения свойства неблокируемости сети.

Активную точку консолидации целесообразно применять в открытом офисе. Несмотря на известные недостатки такой схемы организации офисного пространства [2] их применение получило определенную популярность в последнее время.

В отличие от офисов традиционной кабинетной структуры, рабочая площадь открытого офиса не разрывается на отдельные фрагменты коридорами, санузлами, венткамерами и прочими техническими помещениями. Считая справедливым для данного офиса норму стандарта ANSI/TIA-569B в части максимальной рабочей площади в 1000 м<sup>2</sup> и применяя к ней зонную схему организации кабельной системы с диаметром 22 м, получаем, что

- офис делится на 10 отдельных зон;
- в каждой зоне может размещаться максимум 24 рабочих места.

Для прокладки кабеля от коммутатора активной точки консолидации может быть использовано несколько подходов, два из которых показаны на рисунке 4.

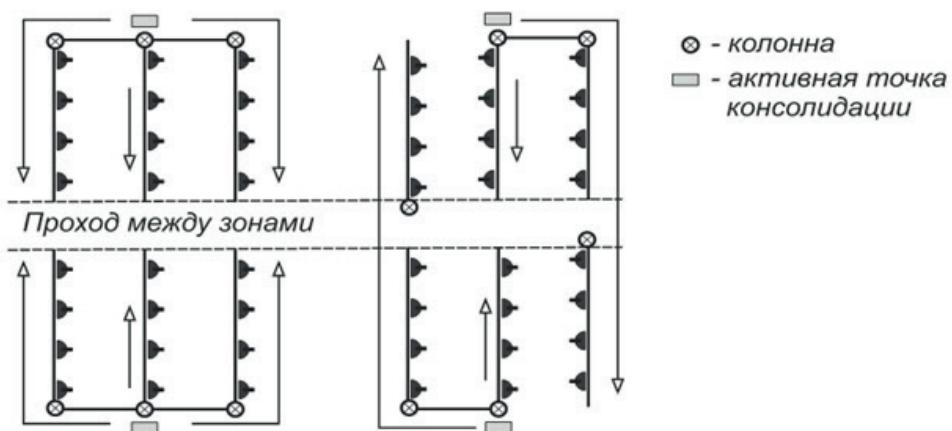


Рисунок 4 – Варианты организации горизонтальных участков прокладки кабелей на конечном участке трассы при использовании активной консолидационной точки

Стрелками обозначены направления прокладки горизонтального кабеля.

Используем в качестве модели рекомендуемую ТИА круглую форму рабочей области и предполагаем, что в рамках этой модели ИР находятся на границе области. Тогда в системе обозначений рисунка 5 можем записать

$$r^2 = \xi^2 + \eta^2.$$

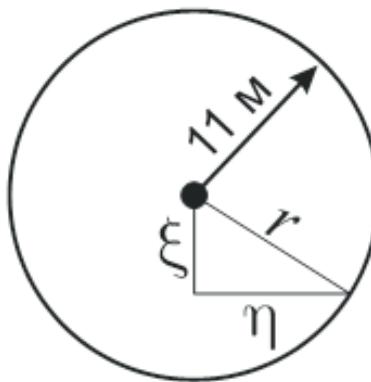


Рисунок 5 – Расчетная топологическая модель

Одновременно с учетом того, что кабель всегда прокладывается вдоль архитектурных линий здания, для любого проброса справедливо

$$L = |\xi| + |\eta| = \sqrt{\xi^2 + \eta^2}.$$

С учетом равномерного распределения  $\xi$  в интервале  $[0; r]$  среднее значение величины проброса на концевом участке составит

$$L_{cp} = \frac{1}{r} \int_0^r \sqrt{\xi^2 + \eta^2} d\xi = \frac{1}{r} \int_0^r \sqrt{r^2 - \xi^2} d\xi = 14,1 \text{ м}.$$

Добавляя к этому значению 3 м вертикального участка, приходим к значению 17,1 м.

Дальнейшие вычисления с привлечением фактических значений параметров из таблицы показывают, что применение активной точки консолидации является выгодным с финансовой точки зрения при любой протяженности тракта.

Одновременно, распространение данного подхода на общий случай, т.е. введение еще одной ступени мультиплексирования, нецелесообразно из-за ограниченного количества зон в офисе даже максимально допустимой площади последнего.

**Вертикальная интеграция на базе схемы пассивной оптической сети.** В основу подхода, который выделен в рассматриваемую далее группу, положена адаптация на уровень внутриобъектовых ИТС технических решений, отработанных при построении оптических сетей доступа. До уровня практического внедрения доведены две разновидности таких решений.

Схема PoLAN основана на прямом переносе технологии PON на новую область с учетом специфики последней в части небольших расстояний. Для полноценной реализации преимуществ мультиплексирования сплиттер как ключевой пассивный элемент этой технологии целесообразно размещать в линейной части на месте, точки консолидации традиционных СКС. Соответствующая структура изображена на рисунке 6.

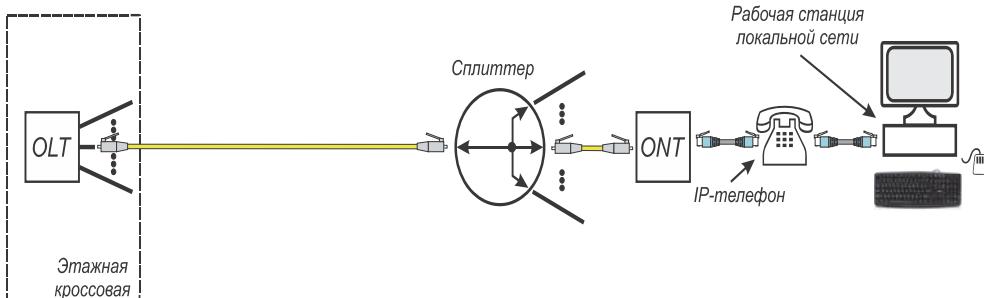


Рисунок 6 – Схема построения сети PoLAN с размещением сплиттера в консолидационной точке: *OLT* – оптический линейный терминал; *ONT* – оптический сетевой терминал

Система Beam Caster израильской компании RiT Technologies позволяет еще более приблизить групповое сетевое устройство к терминальной технике и использует организацию оконечного участка максимальной длиной 7 м на основе беспроводной оптики. Эта система реализует «растянутую» многопользовательскую розетку, в состав которой входит групповой блок IWON (англ. Indoor Wireless Optical Network) с 8 приемопередатчиками и несколько индивидуальных однопортовых блоков, которые непосредственно обслуживают пользовательское терминальное оборудование. Мультиплексирование происходит на участке от этажного коммутатора до группового блока. Схема сети показана на рисунке 7.

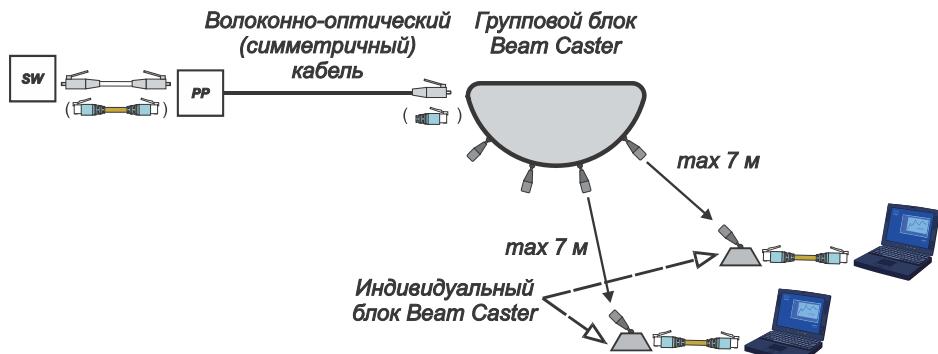


Рисунок 7 – Схема построения нижнего уровня ИТС с использованием оборудования Beam Caster: SW – коммутатор ЛВС; PP – коммутационная панель

В отличие от типовой 12-портовой многопользовательской розетки и 24-портовой активной консолидационной точки в системе Beam Caster используется 8-портовый групповой блок. Последнее означает меньший диаметр обслуживающей зоны и некоторый дополнительный выигрыш от мультиплексирования за счет приближения группового блока к терминальному оборудованию.

**СКС и однопортовые розетки.** Согласно требованиям нормативных документов пользовательская информационная розетка СКС должна содержать как минимум два порта. В основе такового подхода лежит характерная на начало 90-х гг. прошлого столетия полная технологическая несовместимость ЛВС и телефонной сети предприятия. По состоянию на сегодняшний день внутриобъектовая телефония во многом переведена на технологию Ethernet, что делает применение выделенной розетки под телефонный аппарат излишним. Телефонный аппарат и рабочая станция ЛВС как основные терминальные устройства пользователя ИТС подключаются к розеточному модулю последовательно так, как это показано на рисунке 8.

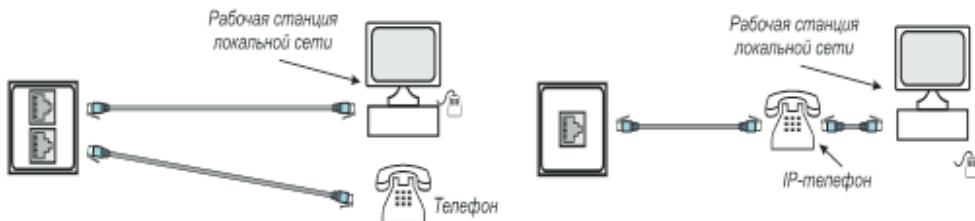


Рисунок 8 – Схемы подключения телефонного аппарата и рабочей станции ЛВС к пользовательской информационной розетке. Слева – традиционная, справа – в случае применения IP-телефонии

С системной точки зрения однопортовые розетки реализуют начальный уровень мультиплексирования типа «2 в 1». При переходе на такую конфигурацию пользовательского рабочего места в одном информационном потоке объединяются сигналы двух приложений: рабочей станции ЛВС и IP-телефона.

Подавляющее большинство пользовательских информационных розеток организуется по 2-портовой схеме. Статистика, подтверждающая это положение, приведена на рисунке 9.

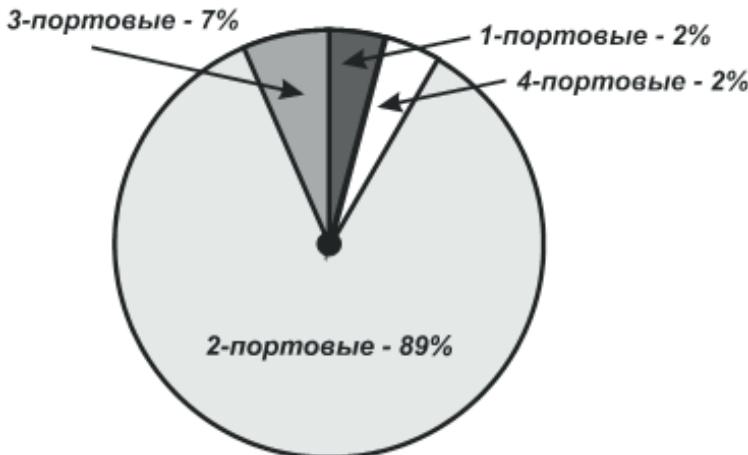


Рисунок 9 – Статистика распределения количества розеточных модулей пользовательских информационных розеток СКС офисных ИТС

Де-факто это означает, что она обеспечивает подключение к ИТС предприятия рабочей станции ЛВС и телефона внутриобъектовой сети. Таким образом, переход на IP-телефонию не только естественен, но и позволяет снизить расходы на построение СКС практически вдвое.

Сильная сторона структур на основе однопортовых розеток – возможность их реализации на любом типе сетевого оборудования.

Более подробно этот вопрос рассмотрен в [9].

### Заключение.

1. Вертикальная интеграция может быть реализована по нескольким направлениям и представляет собой перспективное средство улучшения параметра обобщенной технико-экономической эффективности СКС.

2. Основное преимуществом вертикальной интеграции – возможность полноценного использования мультиплексирования для решения задач системной оптимизации наиболее сложного и затратного нижнего уровня внутриобъектовой информационной системы.

3. В иерархическую структуру спарки ЛВС-СКС целесообразно добавить дополнительный уровень с разбиением горизонтальной подсистемы СКС на два подуровня.

4. Логическим завершением принципа вертикальной интеграции в перспективе обоснованно становится радикальное изменение структуры СКС с переводом за применения во всей кабельной системе однопортовых информационных розеток.

### Литература

1. Артюшенко В.М., Семенов А.Б. Анализ структурированных кабельных систем в системной точке бифуркации. Системные вопросы // Информационно-технологический вестник № 2(40). 2024. С. 36-48.

2. Киварина М.В., Осипов Е.И. Офисы открытого типа в государственных учреждениях: практика российских регионов // Международный научно-исследовательский журнал. № 8(134). С. 23-27.
3. Олифер В.Г., Олифер Н.А. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы: Учебник для вузов. 4-е изд. СПб.: Питер, 2010. 944 с.
4. Семенов А.Б. Как технология PoE меняет подходы к построению и эксплуатации СКС // Вестник связи. 2021. № 8. С. 24-28.
5. Семенов А.Б., Кандзюба Е.В., Руденко В.А. «Длинный» Ethernet – дальше, дальше // Первая миля. 2017. № 7(68). С. 32-36.
6. Семенов А.Б. Средства формирования терминального интерфейса линий МРТЛ // Первая миля. 2021. № 4(96). С. 40-45.
7. Семенов А.Б. Обоснование выбора площади этажных технических помещений информационно-телекоммуникационной системы «умного» офисного здания // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2022. № 6(762). С. 95-108.
8. Семенов А.Б. Активная консолидационная точка // Вестник связи. 2020. № 8. С. 20-24.
9. Семенов А.Б. Перспективы применения в СКС однопортовых розеток // Первая Миля. 2024. № 3(119). С. 26-31.

УДК 001.892: 65.012.4

**Эффективное применение методов и инструментов  
системного инжиниринга в опытно-конструкторских работах**

**Рамиль Маратович Ахтамьянов**, начальник отдела гидроагрегатов,  
АО «ОКБ «Аэрокосмические системы», г. Дубна, Московская область,

**Лейла Шарифьяновна Ахтамьянова**, специалист  
по учебно-методической работе,

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования «Самарский национальный исследовательский  
университет имени академика С.П. Королева»,  
Самарский университет, г. Самара,

**Алексей Станиславович Букатый**, руководитель проектирования  
биомеханических конструкций НИИ Бионики и персонифицированной медици-  
ны СамГМУ, доктор технических наук,

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования «Самарский государственный медицинский университет»  
Министерства здравоохранения Российской Федерации,  
ФГБОУ ВО СамГМУ Минздрава России г. Самара

*В условиях высокой потребности импортозамещения авиационных сис-  
тем увеличились объемы опытно-конструкторских работ (ОКР). Отсутствие  
аналогов в отечественной промышленности, материалов и комплектующих,  
отсутствие технологических возможностей являются существенными ограни-  
чивающими факторами реализации ОКР в сжатые сроки. Применение методов  
и инструментов системного инжиниринга позволяет снизить влияние вышеука-  
занных факторов и эффективно реализовывать проекты в заданные сроки.  
Описанные в данной статье рекомендации по применению инструментов и ме-  
тодов системного инжиниринга предлагаются к практическому применению в  
рамках ОКР.*

Системный инжиниринг, опытно-конструкторские работы, функциональный  
анализ.

**Effective application of system engineering methods and tools in research  
and development works**

**Ramil Maratovich Akhtamianov**, head of hydraulic units department,  
«Strength of Materials», JSC «OKB «Aerospace systems», Dubna, Moscow region,

**Leyla Sharifianovna Akhtamianova**, specialist in educational  
and methodological work,

Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education  
«Samara National Research University», Samara University, Samara,

**Aleksey Stanislavovich Bukaty**, Head of the Design Department at the SamSMU Research Institute of Bionics and Personalized Medicine, Doctor of Engineering Science, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Samara State Medical University» of the Ministry of Healthcare of the Russian Federation, FSBEI HE SamSMU MOH Russia, Samara

*High demand for the aircraft system import substitution has increased the scope of research and development works. Lack of analogous materials and components in the national industry, lack of engineering capabilities are significant deterrents of R&D implementation within short time frames. The use of system engineering methods and tools makes it possible to reduce the influence of the above factors and effectively implement projects within the specified time frame. The recommendations described in this article on the use of the system engineering tools and methods are proposed to be applied within R&D works.*

System engineering, research and development works, functional analysis.

Основные положения по порядку выполнения опытно-конструкторских работ, созданию изделий и их составных частей подробно описаны в серии ГОСТов РВ 15. В статье будут рассмотрены рекомендации по применению инструментов и методов системного инжиниринга в рамках ОКР.

В рамках ОКР, на первом этапе, необходимо понимать, что правильно сформированные требования влияют на конечный результат. Требования, сформированные на функциональном уровне, позволяют охватить наибольшее количество технических решений. Кроме того, особое внимание следует уделить требованиям в техническом задании (ТЗ), их достаточности, полноте и однозначности.

Одним из примеров анализа технических требований может стать анализ ключевых требований указанный в таблице 1, в которой проанализированы требования к специальному пневмодробеструйному процессу (ПДУ) по международным требованиям. Для определения требований к режимам обработки и технологическому оснащению сформируем систему на входе, у которой должны быть требования (в функциональной форме), на выходе – элементы решения. В первом столбце указываются «верхние» требования процесса ПДУ. В следующем столбце указываются требования на функциональном уровне. В крайнем правом столбце указываются элементы решения.

Таким образом, можно сформировать элементы решения, которые позволяют определить требования к режимам обработки и технологическому оснащению. Данный подход позволяет подойти к решению задачи системно, что дает возможность снизить риски срыва сроков по проекту. Недостатком данного подхода является то, что если были пропущены требования, то данные требования не будут учитываться, что может в дальнейшем привести к определенным трудностям.

**Таблица 1 – Анализ ключевых требований процесса ПДУ**

№ п/п	Требования чертежа к процессу ПДУ	Функции	Элементы решения
1	Обеспечить процесс со- гласно требованиям PCS-2300	Обработать согласно PCS- 2300	E1 – обработать деталь согласно AMS 2430 E2 – использовать дробь согласно AMS2430/2 E3 – использовать дробь фракции S230 E4 – использовать кон- троль дроби согласно AMS 2431/2 и SAEJ444 E5 – осуществить отчистку детали согласно AMS 2430 E6 – обеспечить шерохо- ватость Ra 3,2 мм
2	Обеспечить упрочнение интенсивностью 0,2-0,3 мм	Обработать поверхность интенсивно- стью 0,2-0,3 мм	E7 – использовать кон- троль интенсивности со- гласно SAEJ443 E8 – использовать пласти- ны Альмена согласно SAEJ443 (тип А) E9 – использовать прибор для контроля прогиба пла- стин Альмена согласно SAEJ442 E10 – использовать держа- тель для пластин Альмена согласно SAEJ442
3	Обеспечить покрытие обрабатываемых по- верхностей в 200%	Обработать поверхности в 200%	E11 – использовать кон- троль покрытия согласно SAEJ2277
4	Обеспечить наименьший радиус 1,2 мм	Обработать деталь с наи- меншим ра- диусом 1,2 мм	E12 – использовать дробь согласно AMS 2430 (ди- аметр min 0,6 мм)

Кроме того, снизить риски по невыполнению проекта позволяет анализ рисков, что важно на подготовительном этапе. Возможные риски при определенных условиях могут сильно повлиять на сроки, качество и стоимость реализации проекта. Для сокращения влияния рисков составим таблицу 2 наиболее значимых рисков.

Выполнив оценку рисков, можно предотвратить возникновение риска путем выполнения мероприятий, влияющих на его возникновение. Достоинством данного подхода является его доступность и простота. Недостатком же является то, что риски составляются людьми на основе личного опыта, который не всегда релевантный. Снизить ошибки при определении рисков позволяет вовлечение специалистов из различных направлений, обладающих высоким уровнем компетенций.

**Таблица 2 – Значимые риски, возникающие в проекте**

№ п/п	Риск	Веро- ят- ность	По- след- ствия	Обна- руже- ние	RPN	Мероприятия по влиянию на риск
1	Отсутст- вие необ- ходимой норма- тивной докумен- тации	8	8	6	384	Составить перечень нормативной документации, как можно быстрее приобрести
2	Непра- вильный подбор рабочей группы	3	10	4	120	Подбор специалистов по аналогичным проектам, с компетентностями в данной области, использование опыта институтов
3	Невер- ный рас- чет необ- ходимого финанси- рования	6	8	8	384	Технико- экономическое обос- нование, создание буфера
4	Нереали- стичное прогно- зирова- ние сро- ков реа- лизации проекта	5	10	7	350	Аудит план-графика, постоянная актуали- зация, передача опыта в схожих проектах
5	Некаче- ственная техноло- гическая подго- товка произ- водства	9	10	9	810	Согласование ТП, вспомогательного оборудования и мате- риалов с Заказчиком, применение опыта других организаций
8	Слабое взаимо- действие подраз- делений	7	9	8	502	Выполнение меро- приятий по мотива- ции руководителей среднего звена

Рекомендуется на этапе согласования ТЗ провести функциональный анализ, оценить значимость функций с целью возможного сокращения их количества. На основе функционального анализа определить элементы решения. Возрастающая прикладная направленность функционального анализа делает его необ-

ходимым для инженеров, использующих в своей практике современные математические методы [6]. В рамках каждого этапа важно привлекать ключевых специалистов различных направлений, которые будут участвовать в ОКР (специалисты по теоретическим расчётам, специалисты технологической, метрологической, эксплуатационной служб, испытатели и др.). Важно на каждом этапе проводить анализ технических требований и сопоставлять с проектом технического решения, проводить верификацию (лат. verus – истинный + facere – делать [1]) и валидацию (лат. validate – утверждать [2]) требований. Все технические решения, принятые на каждом из этапов, необходимо проанализировать на предмет рациональности применения. При необходимости выполняется уточнение конструкторских решений. На рисунке 1 показана конструктивная часть цилиндра демпфирующего механизма, разработанного на этапе технического проектирования. Основная функция механизма – в определённом режиме демпфировать нагрузки, возникающие при открытии и закрытии двери самолёта. Демпфирующий механизм состоит из цилиндра (1), штока (2), внутри которого установлен специальный клапан (3) с дросселирующими отверстиями, крышки (4), которая запирает жидкость и является направляющей для демпфера, компенсационного элемента (5), который позволяет компенсировать температурные расширения и сужения рабочей жидкости в демпфере, болта ушкового (6) с установленным подшипником, который крепится к кронштейну самолёта.

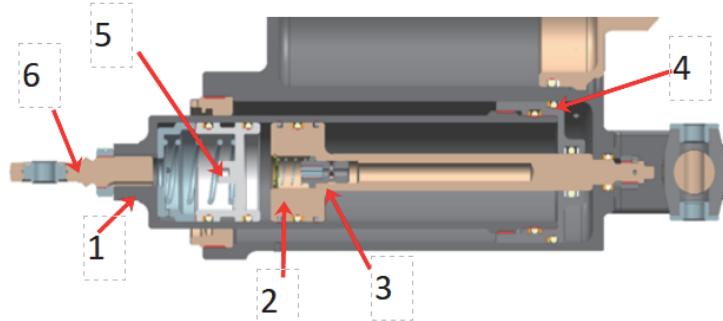


Рисунок 1 – Техническое решение на техническом этапе

Анализ технических решений позволяет выявить возможность упрощения конструкции. На рисунке 2 изображено имеющееся техническое решение и техническое решение, предложенное после проведения упрощения конструкции.

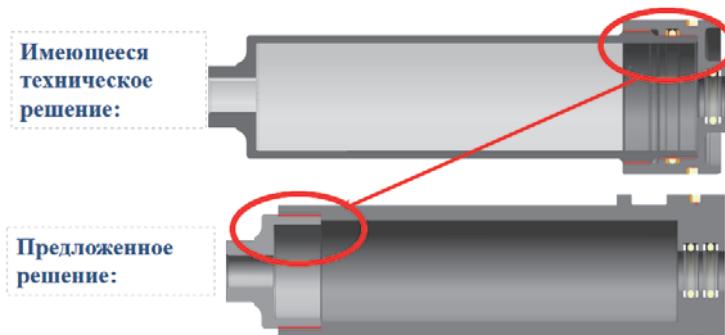


Рисунок 2 – Сравнение имеющегося и предложенного технических решений

Каждый конструктивный элемент был проанализирован с точки зрения функции, которую он обеспечивает. Был предложен альтернативный набор конструктивных решений, которые могли бы обеспечить те же функции. Сравнение конструктивных решений позволяет сделать выводы, что предложенные конструктивные решения улучшат контролепригодность и собираемость изделия. Основная суть предложенного технического решения – изменить расположение крышки на цилиндре, а место, где устанавливалась крышка, сделать единым конструктивным элементом с цилиндром. Предложенное решение позволяет исключить дополнительное уплотнение по цилинду, обеспечить лучшую соосность цилиндра и штока относительно основного корпуса, использовать освободившееся пространство для дополнительного уплотнения по штoku, доливать рабочую жидкость в демпфер при предварительных регулировках, осуществлять визуальный контроль утечек в месте уплотнения штока и цилиндра. Предложенное решение повышает надёжность и контролепригодность изделия, уменьшает количество конструктивных элементов, а также позволяет проводить широкую модернизацию без изменения ключевых характеристик демпфера. Таким образом, анализ технических решений позволяет выявить наиболее рациональное конструктивное решение и повысить тактико-технические характеристики.

В начальной стадии ОКР при процессе планирования формируется перечень работ и разрабатывается план-график с веховыми сроками реализации каждого этапа. План-график может содержать в себе основные веховые задачи по проекту. Например, в него могут быть включены этапы из ведомости исполнения. По горизонтальной шкале указываются плановые сроки выполнения веховых задач. Имея сроки выполнения веховых задач, можно построить плановую диаграмму Ганта, которая позволяет оценить загрузку по каждому из этапов. По мере реализации проекта, рядом с плановой диаграммой Ганта, указываются фактические сроки выполнения проекта. Такой подход позволяет оценить своевременность выполнения работ по этапам, спрогнозировать дальнейшую динамику проекта и своевременно внести корректировки по его реализации. Затем выполняется декомпозиция работ [1], формируется перечень документов, необходимых на каждом этапе, и составляется детальный план-график. Разработанный план-график важно контролировать и уточнять в процессе всего проекта. Пример план-графика работ показан в таблице 3. Одним из важных элементов в

план-графике является определение приоритета задач. Приоритет можно прописать в цифровом выражении от 0 до 3, где наивысший приоритет будет иметь задача с меньшим значением цифры. За каждой задачей рекомендуется закреплять ответственное лицо, которое будет отвечать за своевременность сроков выполнения задач. Напротив согласующих лиц предлагается указывать плановые даты согласования документа, разрабатываемого в рамках данного этапа. В случае невыполнения плановых сроков плановая дата вычеркивается и рядом указывается новая плановая дата.

**Таблица 3 – План-график работ в рамках ОКР**

		Согласующие лица								
	Задача (документ)	Приоритет	Ответственный	Начальник отдела	Главный технолог	Нормоконтроль	Главный инженер	ГК	ВП МО РФ	Заказчик
1	Разработка технических условий (ТУ)	0	Иванов	10.01.22	20.01.22	25.01.22	30.01.22	15.02.22	25.01.22	27.02.22
2	Разработка программы предварительных испытаний (ППИ)	1	Петров	15.01.22	15.01.22	20.01.22	25.01.22	10.02.22	16.02.22	20.02.22

Современные системы автоматизированного проектирования (Computer-aided design (CAD), Computer-aided manufacturing (CAM), Computer-aided engineering (CAE)) позволяют существенно автоматизировать процессы и сократить цикл ОКР. А такой пакет системы управления жизненным циклом изделия, как TeamcenterNX, позволяет осуществлять интенсификацию опытно-конструкторских разработок, в том числе за счёт возможности параллельного проектирования. Система TeamcenterNX позволяет выполнять согласование конструкторской документации дистанционно, что существенно может сократить сроки проектирования. Кроме того, система управления жизненным циклом изделия может обеспечивать взаимодействие между конструкторскими и технологическими службами, а также с производственной площадкой. Система TeamcenterNX позволяет обеспечивать управление конфигурацией изделия и гибко подходить к изменениям в процессе проектирования и изготовления. Однако, не стоит забывать, что вышеуказанные системы являются лишь инструментами автоматизации, их неправильное применение может усложнить процесс создания нового изделия. При применении системы автоматизации требуется

рациональный подход и постоянный анализ их влияния на процессы в ОКР с целью повышения эффективности. Важно помнить, что для обеспечения гибкости производственного процесса необходима высокая степень автоматизации, которая требует большого количества исходной информации в конструкторской части. На рисунке 3 наглядно представлено, что чем выше уровень автоматизации при проектировании мы хотим получить, тем больше требуется конструкторской информации и меньше технологической. Также можно сделать вывод, что наличие достаточного количества конструкторской информации может обеспечить более гибкий производственный процесс, что, в свою очередь, позволит реализовать опытно-конструкторские работы в кратчайшие сроки.



Рисунок 3 – Соотношение вводимой технологической и конструкторской информации в зависимости от уровня автоматизации

Недостаток высококвалифицированных специалистов в рабочей группе зачастую затрудняет своевременное выполнение ОКР. Компенсировать недостаток квалифицированных специалистов возможно за счёт применения типовых рекомендаций при проектировании, грамотного распределения текущих задач по сложности, ранжирования по приоритетам, привлечения дополнительных специалистов из смежных отделов, привлечения инжиниринговых компаний по аутсорсингу с целью оцифрования конструкторской документации, привлечения к работам специалистов из профильных университетов.

В рамках ОКР при формировании составных частей изделия рекомендуется уделять внимание техническим решениям, которые были применены в аналогичных системах. Целесообразно провести патентный поиск, а также оценить имеющийся задел конструкторских решений на возможность применения с учётом доработок. Особенно актуально применять уже имеющиеся агрегаты путем масштабирования или внесения в конструкцию минимальных доработок. Следует помнить, что консервативный подход при проектировании новых изделий может существенно сократить сроки проектирования, производства и испытаний, а также сократить возможные риски схода с испытаний. Необходимо пом-

нить всегда, что любое сочетание нескольких деталей, разработанных вновь, может существенно повлиять на сроки реализации проекта.

С целью лучшего понимания проблемы и поиска технического решения следует обратиться к задаче, сформулированной в виде противоречия. На рисунке 4 приведён пример, как был выполнен поиск технического решения в виде противоречия. Задача заключается в поиске рационального конструктивного решения оснастки для обработки деталей шасси самолёта типа «звено подкоса» в ванне травления. Основная цель заключается в обеспечении протравливаемости всех поверхностей детали, при этом обеспечив однозначное положение в ванне для травления.

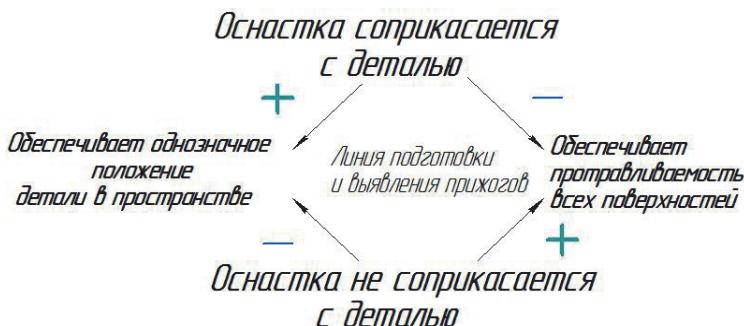


Рисунок 4 – Формирование противоречия

Техническим решением противоречия стала оснастка в виде крюка, изображённая на рисунке 5, который позволяет задавать однозначное положение детали в пространстве и обеспечивает протравливаемость всех требуемых поверхностей.

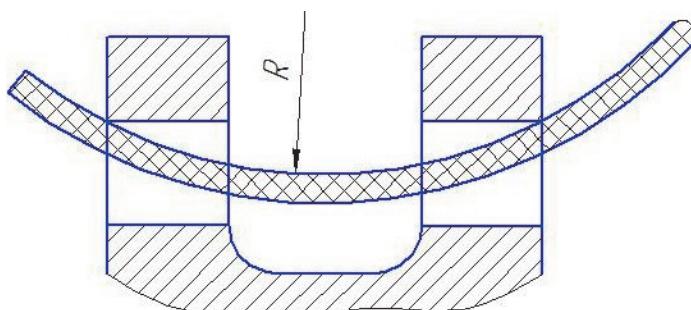


Рисунок 5 – Техническое решение в виде крюка

При оценке технических решений рекомендуется применять критерий Гермейера – сравнение нескольких технических решений по ключевым характеристикам. После определении лучшего технического решения по критерию Гермейера необходимо от лучшего значения параметра вычесть худший, полученную разность поделить на лучшее значение параметра. Таким образом, мы получим относительную разницу между двумя характеристиками. К полученному значению можно назначить весовой коэффициент, который следует умножить

на полученный результат. В результате сравнения характеристик лучшим техническим решением будет то, в котором сумма относительных значений с учётом весового коэффициента будет наименьшей.

Рассмотрим оценку технических альтернатив методом Гермейера в процессе поиска наилучшего защитного покрытия для деталей шасси типа «шток». В качестве альтернативных технических решений выступают: гальваническое хромирование (48-80 мкм), высокоскоростное газоплазменное напыление и детонационное напыление. Выпишем ключевые параметры покрытий и укажем их значения. Определим наилучшее значение для каждого параметра и выделим его. От лучшего значения параметра вычтем худший, полученную разность поделим на лучшее значение параметра. В результате получим значение относительно лучшего параметра. Затем получим сумму всех значений по всем относительно наихудшим параметрам. Это и будет являться критерием Гермейера. В таблице 4 можно увидеть сравнительную таблицу технических решений. На первом этапе оценки технических альтернатив наилучшим техническим решением стало высокоскоростное газоплазменное напыление.

**Таблица 4 – Выбор наилучшего технического решения по критерию Гермейера**

Параметры	Альтернативы		
	Гальваническое хромирование	Высокоскоростное газоплазменное напыление	Детонационное напыление
Микротвердость HV	800	1200	1100
Износстойкость поверхности при радиальной нагрузке 50 кг в мкм.	1	1,5	2
Адгезия на отрыв поверхности при толщине 70-90 мкм. в МПа	70	100	90
Пористость поверхности %	5	1	2
Коррозионная стойкость в %	80	90	95
Стоимость 1 кв. метра толщиной 70-90 мкм. в руб. при серийной программе производства	1500	3000	3500
Интегральный критерий Гермейера	4,8	1,6	3,5

С целью проведения функционально-стоимостного анализа по критерию Гермейера, предлагается эксперто назначить для каждого параметра весовой коэффициент, который будет отражать значимость параметра. Важно помнить, что сумма весовых коэффициентов должна быть равна единице. Весовой коэффициент умножается на полученное относительное значение в таблице 4. Вы-

пишем в таблицу 5 каждое полученное значение с учетом весового коэффициента. На основе результатов анализа методом Гермейера лучшим техническим решением в условиях серийного производства для высокоресурсного герметичного штока шасси самолета стал метод гальванического твердого хромирования. Таким образом, после определения наиболее значимых параметров, получения значения каждого из параметров и назначения весового коэффициента можно определить наилучшее техническое решение. Одним из достоинств определения наилучшего технического решения по критерию Гермейера является простота его применения. Наличие значений выбранных параметров позволяет достаточно быстро определить наилучшее решение. Недостатком же такого подхода является человеческий фактор, так как весовые коэффициенты назначаются экспертом.

**Таблица 5 – Выбор наилучшего технического решения по критерию Гермейера с учётом весового коэффициента**

Параметры	Альтернативы			Весовой коэф-фициент
	Гальваниче- ское хроми- рование	Высокоско- ростное газоплаз- менное на- пыление	Детонационное на- пыление	
Микротвер- дость HV	0,05	0	0,0125	0,15
Износостойкость поверхности при радиальной нагрузке 50 кг. в мкм.	0	0,025	0,05	0,05
Адгезия на отрыв поверхности при толщине 70-90 мкм. в МПа	0,045	0	0,015	0,15
Пористость поверхности %	0,4	0	0,1	0,1
Коррозионная стойкость в %	0,008	0,003	0	0,05

Параметры	Альтернативы			Весовой коэффициент
	Гальваническое хромирование	Высокоскоростное газоплазменное напыление	Детонационное напыление	
Стоимость 1 кв. метра толщиной 70-90 мкм. в руб. при серийной программе производства	0	0,5	0,67	0,5
Интегральный критерий Гермейера	0,0546	0,251	0,351	1
Результат	1	2	3	

Системы инженерного анализа САЕ позволяют проектировать математические модели с учётом условий и характера работы изделий. На основе анализа конструкции и требований, предъявляемых к системе для работы в экстремальных условиях, возможно разработать статическую и динамическую математические модели с использованием программного продукта Matlab Simulink. Возможности математической модели позволяют определить основные геометрические параметры агрегатов, спрогнозировать условия работы системы в зависимости от интенсивности, оценить влияние температурных режимов на работу системы, определить максимально допустимое количество срабатываний системы. Применение разработанной математической модели позволяет сократить сроки проектирования новых аналогичных систем и доводки изделия в процессе опытно-конструкторских испытаний. Анализ результатов математического моделирования также служит исходными данными для проектирования более сложных математических моделей и позволяет сформировать аналитические формулы. Дополнительно, в целях выработки поправок к аналитическим формулам типа «эмпирических формул» в технике можно применить метод Монте-Карло [3].

В процессе управления конфигурацией изделия рекомендуется вести учёт затраченной трудоёмкости на проектирование одной форматки А4, формировать статистику цикла процесса согласования конструкторской документации со смежными службами.

На рисунке 6 показан пример оценки среднего времени согласования конструкторской документации со службами предприятия. По представленным данным можно сделать несколько выводов:

- Во-первых, имеется высокая загрузка технологической службы относительно других служб.

- Во-вторых, можно предположить, что взаимодействие между конструкторским подразделением и технологической службой недостаточно для эффективного согласования конструкторской документации.

Наличие фактического времени одного цикла согласования и трудоёмкость разработки одной форматки А4 позволяет с большей точностью планировать работы, прогнозировать выполнение планов, своевременно вносить корректизы в общий план, а также применять описанный метод для оценки трудоёмкости аналогичных ОКР. Статистика сроков согласования конструкторской документации со смежными службами позволяет оценить качество взаимодействия смежных служб, качество чертежной документации, разработанной конкретным исполнителем. Наличие достаточной информации по циклу проектирования изделий позволяет с высокой точностью определять себестоимость ОКР, а также позволяет обосновать плановую трудоемкость проекта и правильно распределить ресурсы предприятия. В свою очередь, грамотное распределение ресурсов предприятия является важнейшим фактором повышения конкурентоспособности на рынке.



Рисунок 6 – Среднее время рассмотрения КД

Особое внимание необходимо уделять процессу управления многофункциональными командами. На начальных этапах важно довести до каждого участника рабочей группы ключевые правила работы, основные положения по взаимодействию. Обучение рабочей группы с описанием ключевых положений является эффективным инструментом, позволяющим сотрудникам быстро адаптироваться к текущим требованиям проекта. Важно, чтобы коллектив действовал командно и понимал свою роль в проекте, имел представление об индивидуальных возможностях и особенностях каждого участника рабочей группы. Необходимо понимать, что каждый человек – уникальная индивидуальность – в каждом есть сильные качества и преимущества [5]. Матрица ролей, представ-

ленная в таблице 6, позволит распределить функции каждого члена команды и снизить напряжённость в коллективе. При реализации ОКР следует обращать внимание на настрой коллектива, его утомлённость. При необходимости внедрять мотивирующие программы, делать разгрузочный день для всего коллектива. Следует помнить, что предсказуемость и планомерность работ позволяет повысить эффективность рабочей группы и исключить стрессовую обстановку.

В процессе испытаний опытных образцов возникают сложности, связанные с различными не всегда очевидными причинами. Такими причинами могут быть ошибки в конструкторской документации, производственные дефекты, возникшие при изготовлении деталей, ошибки при сборке и испытаниях. Эффективным инструментом по определению возможных причин может служить формирование диаграммы «Ишикава». Диаграмма «Ишикавы» состоит из основной «ветки», на которой сформулирована ключевая проблема, и вспомогательных «ветвей», на которых сформированы возможные ключевые факторы возникшей проблемы. На вспомогательных ветвях формируются возможные подпричины возникшей проблемы и элементы решения. На рисунке 7 показан один из примеров диаграммы «Ишикава», которая демонстрирует структуру и состав чего возможных причин. Основными причинами возникновения проблемы указаны оборудование, документы, процессы, люди (человеческий фактор). В каждой из причин есть подпричины. Например, низкая квалификация и неисполнение технологической дисциплины. Добавим, что возникшая проблема может быть связана с несколькими причинами. Диаграмма «Ишикава» позволяет графически увидеть возможные причины неработоспособности изделия, визуализирует их, упрощает процедуру выявления несоответствий.

Таблица 6 – Матрица ролей рабочей группы в рамках ОКР

№ п/п	Роль	Функция	Под- разде- ление	Дол- жность	Кол- во*	Период участия
1	Заказчик	Задание требований верхнего уровня, принятие значимых решений (финансы, сроки)	Главный заказчик	Главный конструктор	1	Веховые события
2	Куратор	Разрешение сложных вопросов, контроль вех	ОКБ	Главный конструктор	1	В случае острой необходимости

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ, КОНСТРУКЦИЯ И ПРОИЗВОДСТВО  
ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

<b>№ п/п</b>	<b>Роль</b>	<b>Функция</b>	<b>Под- разде- ление</b>	<b>Дол- жность</b>	<b>Кол- во*</b>	<b>Период участия</b>
3	Руково- дитель проекта	Контроль за своевремен- ным выпол- нением зада- ч, органи- зация проек- тировочных и расчётов работ, рабо- та с заказчи- ком, обеспе- чение взаи- модействия подразделе- ний	ОКБ	На- чальник отдела	1	На всем протяжении проекта
4	Ведущий специа- лист	Управление конфигура- цией изде- лия, подго- товка необ- ходимых документов, контроль качества конструк- торской до- кументации	ОКБ	Веду- щий конст- руктор по из- делию	1	На всем протяжении проекта
5	Прове- ряющий	Проверка конструк- торской до- кументации, расчёты работы	ОКБ	Инже- нер конст- руктор 1 кате- гории	1	На всем протяжении проекта
6	Модели- ровщик	Разработка несложных или средней сложности 3D моделей, разработка соответ- ствующей чер- тежной до- кументации	ОКБ	Инже- нер конст- руктор	1	На всем протяжении проекта

№ п/п	Роль	Функция	Под- разде- ление	Дол- жность	Кол- во*	Период участия
7	Модели- ровщик	Разработка сложных 3D моделей, разработка сложной чертежной документации	ОКБ	Инже- нер конст- руктор 2 (3) категории	1	На всем протяжении проекта
8	Расчёт- чик	Теоретиче- ские расчёты, модели- рование процессов и т.п.	ОКБ	Инже- нер- расчёт- чик (3- 1) кате- гории	1	На всем протяжении проекта
9	Специа- лист по техноло- гичности конст- рукции	Проверка изделия на технологич- ность	ОКБ/О ГТ	Инже- нер- техно- лог 1 (2) категории	1	На всем протяжении проекта

\*-количество определяется от масштабов и сложности ОКР

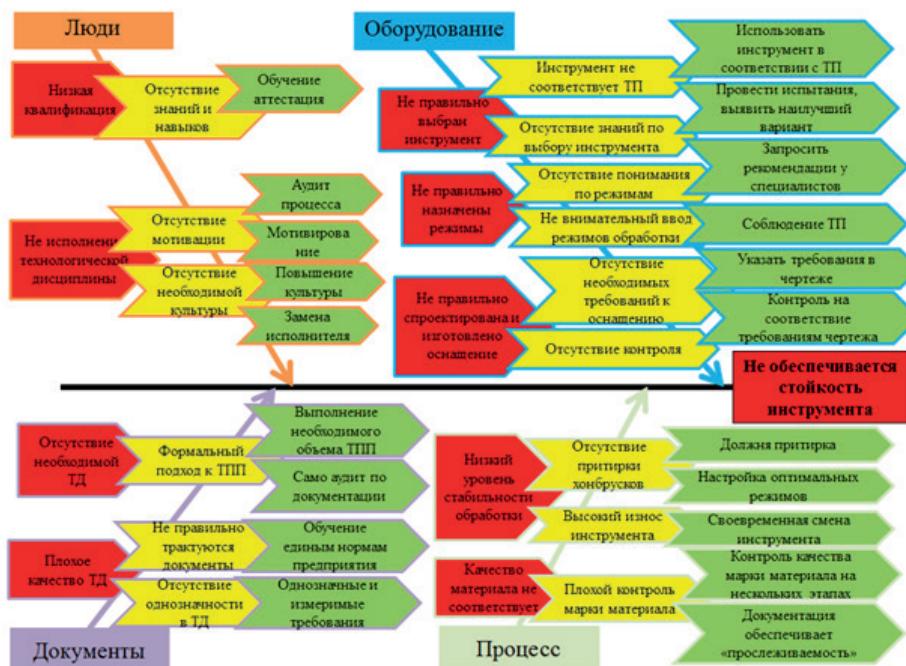


Рисунок 7 – Диаграмма «Ишикава»

Описанные выше методы и инструменты системного инжиниринга позволяют снизить риски в ОКР, а также сократить сроки реализации и затраты проекта. Освоенные навыки и знания в рамках обучения в ВШСИ МФТИ неоднократно доказывали свою эффективность в практической инженерной деятельности и позволили успешно реализовывать проекты, такие как: проектирование сложных авиационных агрегатов, техническое перевооружение предприятия, сертификация процесса упрочнения по требованиям NADCAP (National Aerospace and Defence Contractors Accreditation Program (общая программа стандартизации и аккредитации производителей в аэрокосмической и военной промышленности и родственных отраслях) [4]). Все вышеуказанные достижения были успешно реализованы с целью импортозамещения продукции на самолётах семейства SSJ-NEW, а также МС-21, и могут быть тиражированы для потребностей современной отечественной гражданской и военной авиационной отрасли.

*Литература*

1. ISO/IEC 15288-2002. Системная инженерия. Процессы жизненного цикла систем. М.: Стандартинформ, 2006. 57 с.
2. Online etymology dictionary [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.etymonline.com/> (дата обращения 03.02.2024 г.).
3. Вентцель Е.С. Исследование операций. Задачи. Принципы. Методология. М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1980. 208 с.
4. Википедия [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://ru.wikipedia.org/wiki/Nadcap> (дата обращения 03.02.2024 г.).
5. Самоукина Н.В. Эффективная мотивация персонала при минимальных затратах, или Как платить меньше, но чтобы работали лучше? М.: Феникс, 2014. 238 с.
6. Треногин В.А. Функциональный анализ. М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1980. 491 с.
7. SAE J442 Рекомендуемые методики обработки поверхности для транспортных средств. Контрольная пластина, держатель контрольной пластины и измеритель для дробеструйной обработки. 2013 г. 6 с.
8. SAE J443 Рекомендуемые методы обработки поверхности для транспортных средств. Процедуры использования стандартной пластины Альмена в дробеструйной обработке. 2010 г. 9 с.
9. SAE J444 ТУ для литой дроби и зерна для обработки и чистки. 2012 г. 6 с. 2-6.
10. SAE J2277 Определение площади охвата при дробеструйной обработке. 2013 г. 7 с.
11. SAE AMS 2431/2 Дробь стальная литая высокой твердости (55-62 HRC). Средство дробеструйной обработки ASH. 2010 г. 7 с.

УДК 629.7.036.54

## Влияние демпфирующих перегородок в баке ракетной двигательной установки на прогрев топлива

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

*Приведены результаты экспериментальных исследований естественной конвекции жидкости в цилиндрическом баке с поперечными демпфирующими перегородками. Определено влияние перегородок на изменение характера движения теплового пограничного слоя у стенки бака. Получена эмпирическая зависимость для расчётной оценки величины прогрева верхнего слоя в объёме жидкости.*

Естественная конвекция, демпфирующие перегородки, пограничный слой жидкости, температура верхнего слоя, среднеобъёмная температура.

### **The effect of damping partitions in the tank of the rocket Propulsion system fuel heating installations**

Виталий Александрович Бершадский, Doctor of Technical Sciences,  
Professor of the Department of Engineering and Technology,  
Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education  
«Technological University named after twice Hero of the Soviet Union,  
pilot-cosmonaut A.A. Leonov», Korolev, Moscow region

*The results of experimental studies of natural convection of liquid in a cylindrical tank with transverse damping partitions are presented. The influence of partitions on the change in the nature of the movement of the thermal boundary layer at the tank wall has been determined. An empirical dependence has been obtained for the calculated estimation of the amount of heating of the upper layer in the volume of liquid.*

Natural convection, damping partitions, liquid boundary layer, top layer temperature, medium volume temperature.

#### **Предварительные пояснения**

Изменение направления действующих сил на конструкцию ракетной двигательной установки (ДУ) на старте и в полёте приводят к возникновению колебаний компонентов топлива (КТ) в баках ДУ. Это обстоятельство приходится учитывать при создании ДУ из-за двух факторов, влияющих на её работоспособность:

- недопустимой генерации низкочастотных продольных колебаний корпуса ракеты и колебаний тяги ДУ, приводящих к нерасчётному увеличению напряжений в конструкции или искажению траектории полёта [4];
- недопустимой интенсификации прогрева компонентов топлива (КТ), приводящего к уменьшению кавитационного запаса насосов или увеличению остатков рабочего тела в топливных баках при окончании функционирования ДУ [4,5].

Прогнозирование прогрева КТ в баках для условий предстартовой и полётной эксплуатации ДУ осуществляют на основе экспериментальных работ [3] для определения суммарного теплопритока:  $q_{ж} = q_{мф} + q_{см}$ . В этой формуле учитывается теплоприток через поверхность раздела жидкой и газовой фаз –  $q_{мф}$  и теплоприток через поверхность стенок бака, смоченных жидкостью –  $q_{см}$ .

По результатам экспериментальных исследований прогрева жидкости за счёт  $q_{мф}$ , приведенных в работе [2], получена эмпирическая зависимость для определения интенсивности прогрева в зависимости от амплитуды и частоты вынужденных колебаний жидкого КТ в баке без установки демпфирующих перегородок. При этом возможны линейные колебания поверхности раздела жидкости и газовой фазы в баке (с соблюдением гладкой поверхности) и нелинейные колебания (со значительной деформацией поверхности).

Установлено, что при линейных колебаниях теплоприток  $q_{мф}$  может быть в 4,5 раз больше, а при нелинейных колебаниях в 30 раз больше, чем теплоприток  $q_{ж}$  в случае реализации естественной конвекции КТ в баке. Это приводит к значительной деформации поля температуры жидкости вдоль вертикальной оси и к увеличению среднеобъёмного значения температуры жидкости в баке.

Рациональным способом уменьшения колебаний жидкого КТ в баке ДУ, применяемым на практике, является установка демпфирующих перегородок [1,6].

В настоящей работе приведены результаты экспериментальных работ для оценки прогрева КТ в условиях естественной конвекции при внешнем теплопритоке –  $q_{см}$  и наличии поперечных (кольцевых) демпфирующих перегородок, установленных на боковую стенку (обечайку) цилиндрического бака.

#### Особенности проведения экспериментальных работ

Определение влияния поперечных демпфирующих (кольцевых) перегородок на прогрев жидкости за счёт внешнего теплопритока через смоченную жидкостью поверхность цилиндрического бака проводилось на экспериментальных установках (ЭУ), характеристики которых приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Характеристики ЭУ

№ п/п	Род жидкости	Объём бака, м <sup>3</sup>	Высота бака, м	Количество перегородок	Теплоприток, Вт/м <sup>2</sup>
1	Вода	0,02	0,3	0-3	750-1830
2	Жидкий азот	0,1	1,2	0-5	200-300
3	Жидкий водород	11,2	4,6	0-6	20-300

ЭУ были снабжены средствами измерений температуры жидкости с помощью датчиков, расположенных равномерно вдоль вертикальной оси бака и

стенки бака. В задачи проводимых экспериментов входило определение влияния поперечных перегородок на механизм естественной конвекции жидкости и величину её температурного расслоения по высоте объёма жидкости в баке. В качестве жидких рабочих тел использовались вода, жидкий азот и жидкий водород.

При использовании воды на ЭУ с прозрачными стенками бака решались две указанные выше задачи. При этом характер движения теплового пограничного слоя жидкости изучался по траектории движения подкрашенных мелких частиц, находящихся в жидкости. Тепловое расслоение жидкости определялось по результатам одновременных измерений температуры в различных точках вдоль вертикальной оси бака.

При экспериментах на криогенных жидкостях (азот и водород) определялось только тепловое расслоение жидкости по результатам измерений температуры вдоль вертикальной оси бака. Величина теплового расслоения определялась после вывода конструкции на установившийся режим теплопритока после наддува бака газом до величины, превышающей давление, соответствующее состоянию кипения криогенной жидкости.

### Результаты экспериментальных исследований

Физическая картина механизма естественной конвекции при подводе тепла через смоченную стенку бака приведена на рисунке 1. На рисунке 1 показан наблюдавшийся в экспериментах характер движения теплового пограничного слоя у гладкой стенки бака (вид А) и у стенки бака с установленными перегородками (вид Б).

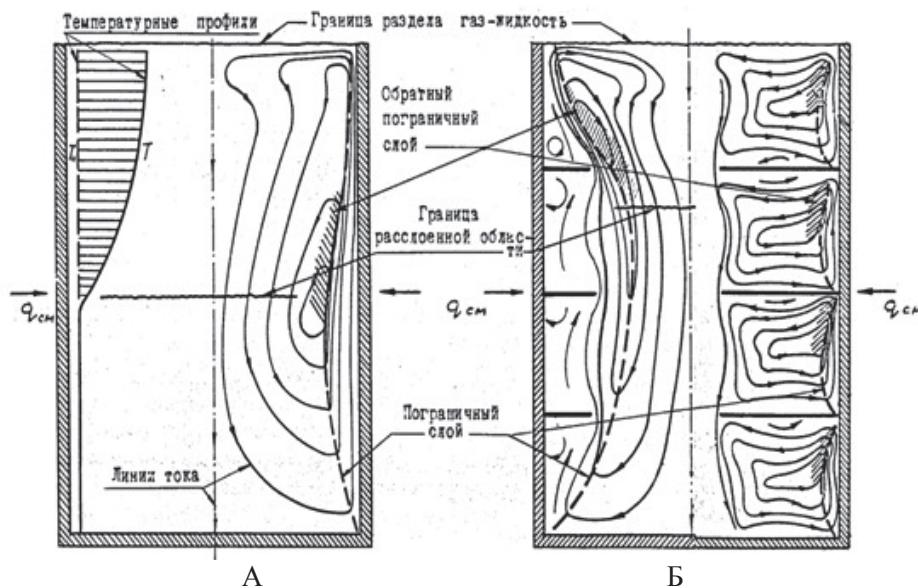


Рисунок 1 – Влияние поперечных перегородок на механизм естественной конвекции

Вид А является иллюстрацией образования теплового пограничного слоя у гладкой стенки бака и его движения. Из-за разницы плотностей прогретая жидкость поднимается к свободной поверхности жидкости на границе раздела с газовым объёмом в баке и отражаясь от неё образует прогретый слой в верхней части объёма жидкости.

Вид Б является иллюстрацией движения пограничного слоя при установке на стенках поперечных перегородок разной ширины. В случае, когда ширина перегородок меньше ширины пограничного слоя, свободное конвективное движение жидкости не нарушается, так как жидкость обтекает поочередно перегородки и устремляется к границе раздела фаз, а затем поворачивает к оси сосуда. Небольшое уменьшение теплового расслоения жидкости в этом случае можно объяснить турбулизацией пограничного слоя и увеличением теплопередачи в основной объём жидкости.

Установка поперечных перегородок, ширина которых превышает толщину пограничного слоя на гладкой стенке, приводит к формированию пограничных локальных слоёв под перегородками. При взаимодействии с перегородками поток у стенки замедляется, изменяет направление и движется вниз. Часть нагретой жидкости направляется в основной объём, а затем всплывает. Это интенсифицирует перемешивание основного объёма жидкости и уменьшает тепловое расслоение по высоте объёма жидкости по сравнению с  $q_{\text{см}}$  без перегородок.

На рисунке 2 приведены результаты обобщения экспериментальных данных в части прогрева верхнего слоя в объёме жидкости на основе проводившихся на ЭУ измерений температуры.

В результате экспериментальных работ по определению прогрева верхнего слоя жидкости в баке с поперечными равномерно установленными кольцевыми перегородками в условиях свободной конвекции (без влияния инерционных сил) получена эмпирическая зависимость:

$$\Theta = 1,75 \cdot U^{-0,27} \cdot Ra^{-0,24}. \quad (1)$$

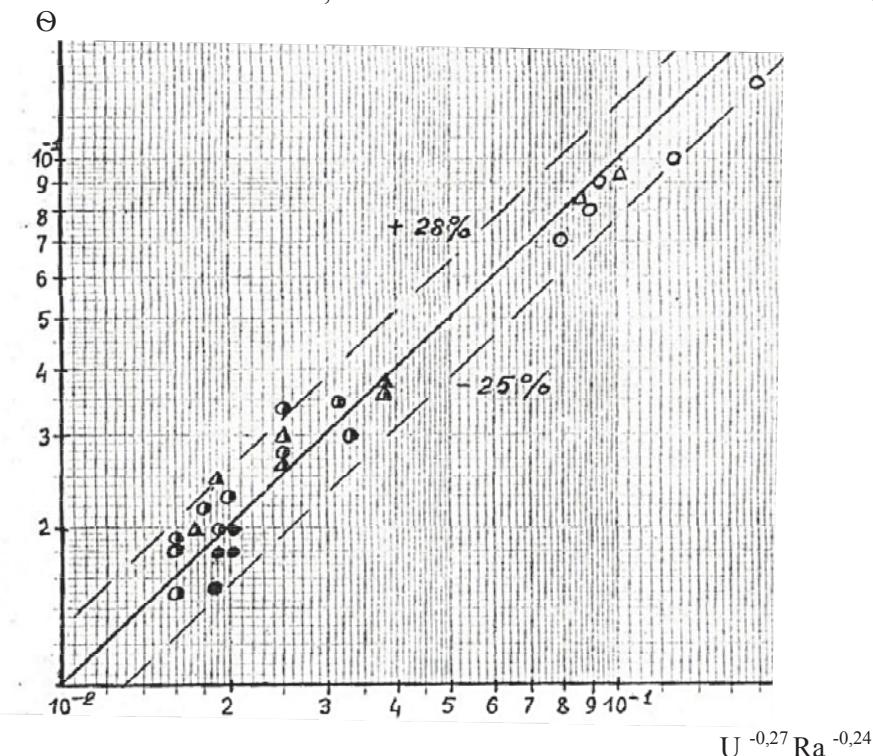


Рисунок 2 – Определение влияющих факторов на прогрев жидкости

На рисунке (2) и в зависимости (1) приняты следующие условные обозначения:  $\Theta = \Delta T_{ж} \lambda_{ж} / (q_{см} H_{ж})$  – безразмерная величина прогрева верхнего слоя жидкости в баке;  $\Delta T_{ж}$  – увеличение температуры верхнего слоя по сравнению с начальным значением в объёме жидкости;  $\lambda_{ж}$  – коэффициент теплопроводности жидкости;  $U = (V_{пер} / V_{ж}) (n + 1)$  – безразмерная величина, характеризующая количество перегородок –  $n$  и относительный объём, занятый перегородками в баке –  $V_{пер} / V_{ж}$ ;  $H_{ж}$  – высота столба жидкости;  $Ra$  – безразмерный критерий Релея, характеризующий интенсивность теплопередачи при естественной конвекции в зависимости от физических свойства жидкости.

На рисунке 3 продемонстрировано хорошее совпадение результатов расчёта по зависимости (1) с экспериментальными данными. Близкое совпадение результатов расчёта с экспериментальными данными, показанное на рисунке 3, подтверждает возможность практического применения зависимости (1) для проведения оценочных расчётов по прогреву криогенного топлива при предстартовых операциях.

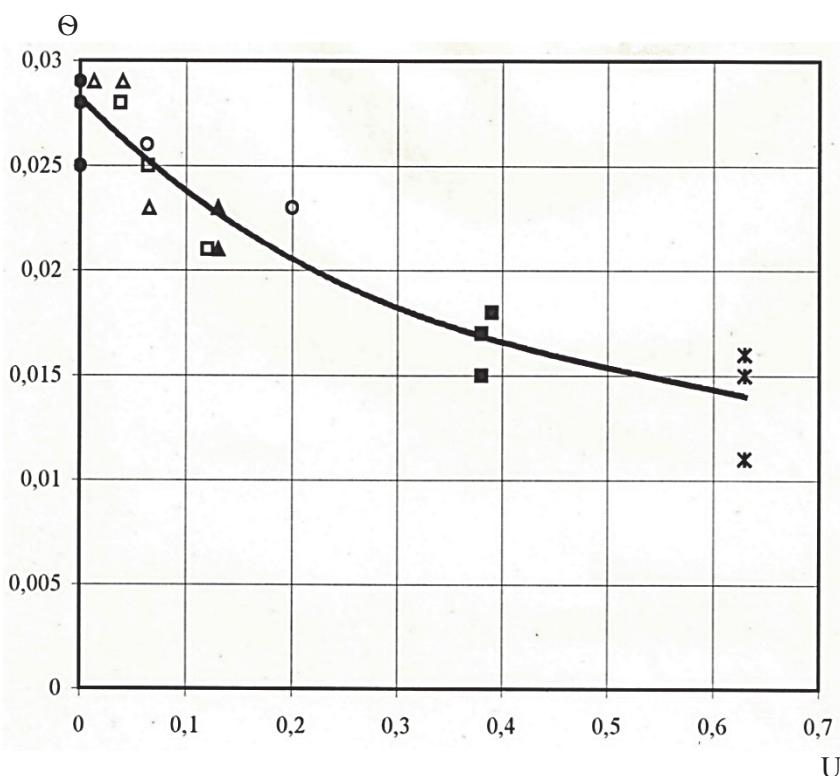


Рисунок 3 – Сопоставление результатов расчёта по зависимости (1) с экспериментальными данными, полученными на жидком азоте

На основе проведения экспериментов было установлено, что при одинаковых размерах перегородок и увеличении их числа заметное влияние на прогрев жидкости происходит до определённого их количества. Например, в баке с тремя перегородками на длине смоченной поверхности в 1 метр температурное рас-

слоение уменьшается на 30%, но дальнейшее увеличение числа перегородок не оказывает существенного влияния.

### Заключение

В результате экспериментальных исследований определены особенности влияния поперечных демпфирующих перегородок на механизм естественной конвекции в части характера движения теплового пограничного слоя у стенки бака и прогрева верхнего слоя в объёме жидкости.

Изменение характера движения теплового пограничного слоя при установке поперечных перегородок приводит к уменьшению величины прогрева верхнего слоя жидкости и увеличению среднеобъёмной температуры жидкости.

На основе обобщения экспериментальных данных предложена эмпирическая зависимость для расчётной оценки прогрева верхнего слоя жидкого компонента топлива при предстартовых операциях двигательной установки.

### Литература

1. Беляев Н.М. Расчёт пневмогидравлических систем ракет. М: Машиностроение, 1983. 219 с.
2. Бершадский В.А. Прогрев криогенного топлива при вынужденных колебаниях в баке ракетной двигательной установки // Информационно-технологический вестник. 2021. № 1(27). С. 16-23.
3. Бершадский В.А., Петров В.И., Соколов Б.А., Туманин Е.Н. Способы регулирования теплового состояния криогенного топлива в баках двигательной установки при предстартовых операциях // Известия Российской академии наук «Энергетика». 2017. № 4. С. 95-105.
4. Козлов А.А., Новиков В.Н., Соловьёв Е.В. Системы питания и управления жидкостных ракетных двигательных установок: учебник. М: Машиностроение, 1988. 352 с.
5. Петров В.Н., Чебаевский В.Ф. Кавитация в высокооборотных лопастных насосах. М: Машиностроение, 1982. 192 с.
6. Elliot Ring. Двигательные установки ракет на жидком топливе: перевод с английского. М: Изд-во «Мир», 1966. 404 с.

УДК 621.4

**Применение шестикулачкового самоцентрирующего  
спирально-реечного патрона для механической обработки  
зубчатых колёс малой технологической жёсткости, применяемых  
в летательных аппаратах**

**Александр Сергеевич Серков**, ведущий инженер-конструктор  
АО «Омсктрансмаш», г. Омск

*В работе рассмотрено применение шестикулачкового самоцентрирующего спирально-реечного патрона для закрепления за эвольвентный профиль зубчатых колёс малой технологической жёсткости для последующей их механической обработки в условиях мелкосерийного и среднесерийного производства. Подробно рассмотрена работа и конструкция шестикулачкового самоцентрирующего спирально-реечного патрона, также рассмотрены конструкции известных трёхкулачковых и шестикулачковых самоцентрирующих патронов, приведены их недостатки.*

Шестикулачковый самоцентрирующий спирально-реечный патрон, закрепление за эвольвентный профиль зубчатых колёс малой технологической жёсткости летательных аппаратов, технологические упругие деформации зубчатых колёс, втулок, колец.

**The use of a six-cam self-centering spiral rack chuck for machining  
gears of low technological rigidity used in aircraft**

**Alexander Sergeyevich Serkov**, Leading Design Engineer  
JSC Omsktransmash, Omsk

*The paper considers the use of a six-cam self-centering spiral rack chuck for fixing gears of low technological rigidity to the involute profile for their subsequent machining in conditions of small-scale and medium-scale production. The work and design of the six-cam self-centering spiral rack chuck are considered in detail, the designs of the well-known three-cam and six-cam self-centering cartridges are also considered, and their shortcomings are given.*

Six-cam self-centering spiral rack chuck, attachment to the involute profile of gears of low technological rigidity of aircraft, technological elastic deformations of gears, bushings, rings.

При изготовлении зубчатых колёс малой технологической жёсткости, в процессе их механической обработки, возникают проблемы, связанные с обеспечением точности размера и формы центрального (базового) отверстия, эвольвентного профиля (эвольвента) и их расположения друг относительно друга. При цементации или закалке зубчатых колёс малой технологической жёсткости, воз-

никает коробление их поверхностей, смещаются оси центрального (базового) отверстия и окружности делительного диаметра друг относительно друга, возникает погрешность эксцентричности. С целью устранения данной погрешности в технологический процесс после термической или химико-термической обработки вводят финишные операции (точение, шлифование). Если не выполнять эти операции, то в процессе эксплуатации зубчатые колёса малой технологической жёсткости в большей степени будут подвержены повышенному износу, вследствие этого будет сокращаться срок службы изделий.

В работах [1-7] рассматривается метод использования универсальных 3-х кулачковых самоцентрирующих патронов для закрепления и последующей механической обработки зубчатых колёс.

В работах [8-10] представлены результаты исследования напряженно-деформированного состояния, вызванного действием сил закрепления приспособления, исследование проведено при помощи компьютерного моделирования. В работе [11] приведены исследования технологических упругих деформаций, вызванных силами закрепления. По результатам работ [8-11] был сделан следующий вывод: перераспределение силы закрепления на наибольшее количество точек ее приложения уменьшает величину хода технологических упругих деформаций, а также минимизирует искажение формы от круглости, а вследствие минимизирует погрешность закрепления.

В результате выполненных работ [1-11] была разработана полезная модель – шестикулачковый самоцентрирующий спирально-реечный патрон (рисунок 1) [12].

Полезная модель относится к станкостроению и может быть применима для закрепления зубчатых колёс, втулок, колец и других деталей преимущественно малой технологической жёсткости.

Из существующего уровня техники известен шестикулачковый самоцентрирующий патрон [13], который имеет в себе корпус патрона, рейки, накладные кулачки, размещённые в радиальных пазах корпуса патрона, а также коническую передачу и спиральный диск, которые необходимы для радиального перемещения накладных кулачков.

Недостатком конструкции [13] является сложность изготовления конической передачи и сложной конструкции спирального диска, но главным недостатком является наличие люфтов в соединениях деталей патрона, участвующих в центрировании и закреплении, что в свою очередь отрицательно скажется на точности механической обработки деталей.

Также известен самоцентрирующий патрон [14], который содержит в своей конструкции корпус патрона, шесть реек, шесть накладных кулачков, рычаги, ведущие рычаги, шток, цапфы, парные кулачки.

Недостатком такой конструкции [14] является большое количество сложных, деталей, а также для закрепления-раскрепления деталей необходим силовой пневматический или гидравлический привод. Применение такого патрона будет нерациональным в условиях мелкосерийного и среднесерийного производств.

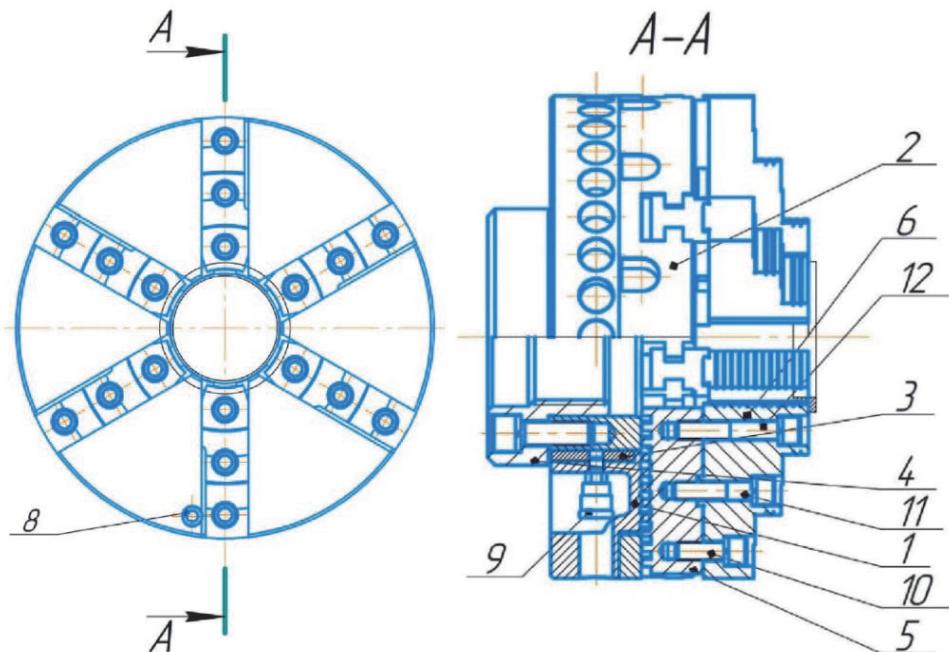


Рисунок 1 – Шестикулачковый самоцентрирующий спирально-реечный патрон

Наиболее близким является самоцентрирующий кулачковый спирально-реечный патрон [15], который имеет в своей конструкции три цельных кулачка, спиральный диск, корпус патрона, ограничительный упор и двузубый ключ для закрепления-раскрепления механически обрабатываемых деталей.

Недостатком данной конструкции является недостаточное наличие цельных кулачков из-за чего распределение силы закрепления будет происходить по трём точкам контакта цельных кулачков с обрабатываемыми деталями, в результате чего возникнут достаточно большие их технологические упругие деформации (о чём подробно написано в работах [8-11]), следовательно существенно снизится точность и качество механической обработки, также ещё одним недостатком конструкции [15] является повышенный износ трущихся поверхностей центрального отверстия спирального диска о корпус патрона, участвующего в процессе центрирования и закрепления деталей, что в результате по мере износа понизит точность их центрирования, а значит понизит и точность их механической обработки.

Технический результат полезной модели [12] направлен на увеличение точности механической обработки деталей преимущественно малой технологической жёсткости.

Распределение силы закрепления происходит по шести точкам накладных кулачков, тем самым снижаются технологические упругие деформации закрепляемых деталей, следовательно, это приводит к увеличению точности и качеству их механической обработки. Промежуточная втулка выполнена из износостойкого материала, это значительно уменьшает износ трущихся поверхностей, и в процессе работы способствует сохранению точностных характеристик шестику-

лачкового самоцентрирующего спирально-реечного патрона на длительный срок, а в случае ремонта промежуточная втулка выпрессовывается и заменяется на новую.

На рисунке 2 показаны две проекции двустороннего двузубого ключа 7, который необходим для закрепления-раскрепления обрабатываемых деталей в шестикулачковом самоцентрирующем спирально-реечном патроне.

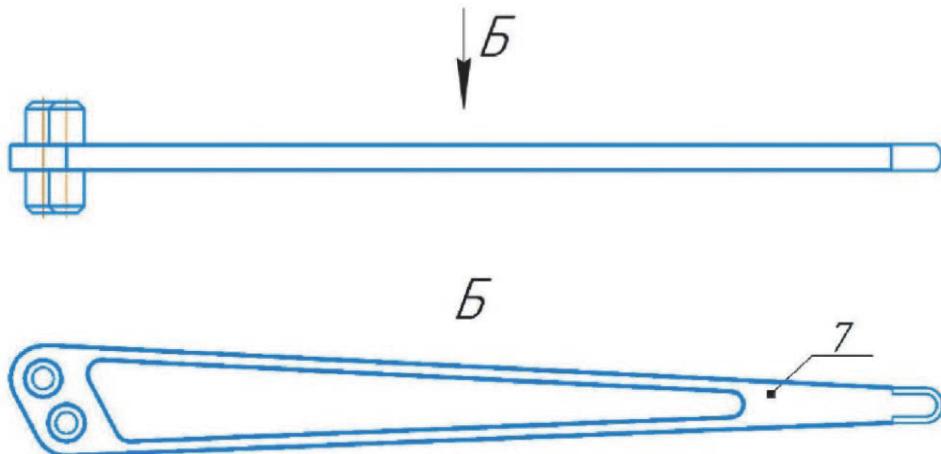


Рисунок 2 – Двухсторонний двузубый ключ

Шестикулачковый самоцентрирующий спирально-реечный патрон состоит из корпуса 2, в котором установлен спиральный диск 1 с промежуточной втулкой 3 цилиндрической формы, выполненной из износостойкого материала, промежуточная втулка 3 запрессована в центральное базовое отверстие спирального диска 1 соосно ему и корпусу 2, наружная цилиндрическая поверхность спирального диска 1, выполнена ровно встык с корпусом 2 и имеет радиальные отверстия, корпус 2 в месте стыка с наружной цилиндрической поверхностью спирального диска 1 снабжён, расположенными на наружной цилиндрической поверхности радиальными пазами. Радиальные пазы и радиальные отверстия выполняют функцию одновременного их захвата двусторонним двузубым ключом 7. Рейки 5 находятся в направляющих радиальных пазах корпуса 2, а накладные кулачки 6 зафиксированы при помощи винтов 10, 11, 12 к рейкам 5. Спиральный диск 1 с промежуточной втулкой 3, установлены на корпусе 2 с помощью фланца 4. Рядом с одним из радиальных пазов корпуса 2 расположен ограничительный винт 8, который предотвращает выпадение или вылет реек 5 с накладными кулачками 6 из направляющих радиальных пазов корпуса 2 при их свободном состоянии. Маслёнка 9 размещена на спиральном диске 1.

Работа шестикулачкового самоцентрирующего спирально-реечного патрона происходит следующим образом.

Фланцем 4 фиксируют спиральный диск 1 с промежуточной втулкой 3 на корпусе 2 и устанавливают шестикулачковый самоцентрирующий спирально-реечный патрон на шпинделе станка.

Для поворота спирального диска 1, с запрессованной в него соосно промежуточной втулкой 3 и перемещения реек 5, с зафиксированными на них накладными кулачками 6 посредством винтов 10, 11, 12, по направляющим радиальным пазам корпуса 2 один из зубьев двустороннего двузубого ключа 7 вводится в радиальное отверстие на наружной цилиндрической поверхности спирального диска 1, а другой зуб вставляется в радиальный паз корпуса 2 (рисунок 3), после чего при повороте двустороннего двузубого ключа 7 одновременно поворачивается спиральный диск 1 с промежуточной втулкой 3 относительно корпуса 2, и рейки 5 с накладными кулачками 6 начинают перемещаться радиально перпендикулярно оси вращения шпинделя станка, в результате чего зубчатое колесо малой технологической жёсткости через установочные калиброванные ролики закрепляется за эвольвентный профиль.

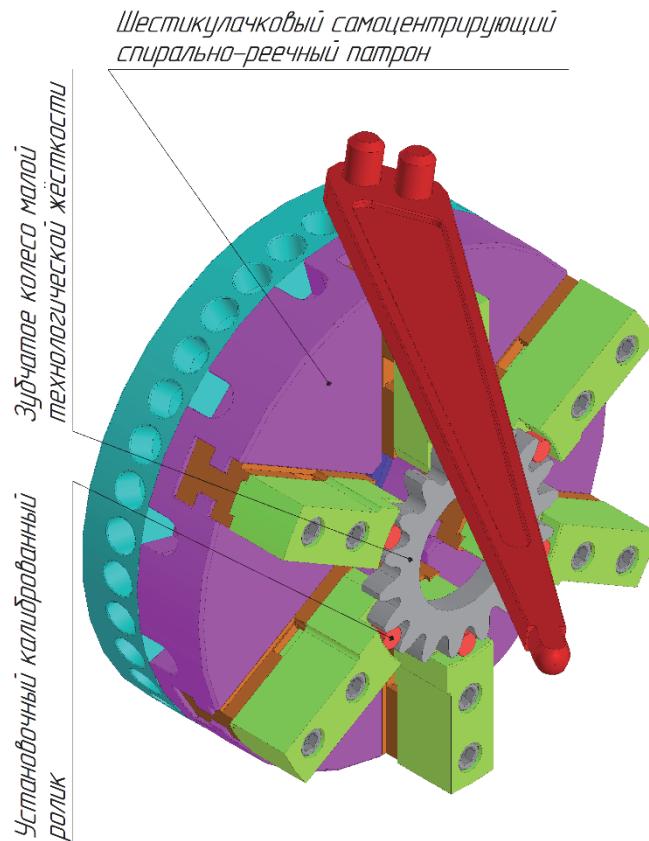


Рисунок 3 – Схема работы шестикулачкового самоцентрирующего спирально-реечного патрона на примере закрепления за эвольвентный профиль зубчатого колеса малой технологической жёсткости

Быстрое радиальное перемещение накладных кулачков 6 на новый диаметр закрепления осуществляется непосредственным поворотом спирального диска 1 с помощью закруглённой части рукоятки двустороннего двузубого ключа 7. Рабочие поверхности промежуточной втулки 3 и корпуса 2 смазываются при помощи маслёнки 9 путем залива технического масла в резьбовое отверстие в промежуточной втулки 3. Ограничительный винт 8 препятствует выпадению реек 5 с накладными кулачками 6 из направляющих радиальных пазов корпуса 2.

Количество радиальных отверстий на наружной цилиндрической поверхности спирального диска 1 подбирается таким образом, чтобы при любом положении спирального диска 1 относительно корпуса 2 в непосредственной близости от каждого радиального паза корпуса 2 всегда находилось одно из радиальных отверстий спирального диска 1, которое даёт возможность одновременно зацепить двусторонним двузубым ключом 7 спиральный диск 1 и корпус 2.

Такое конструктивное решение является простым в эксплуатации, обслуживании и технологичным при его изготовлении, а также даёт возможность с высокой точностью механически обрабатывать зубчатые колёса малой технологической жёсткости, применяемых в летательных аппаратах.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-38-90226.

#### *Литература*

1. Серков А.С., Сайфулин И.И., Палина О.В. [и др.] Снижение себестоимости шлифования посадочных отверстий и торцов цилиндрических прямозубых зубчатых колес за счёт внедрения универсальной оснастки // Инновации, качество и сервис в технике и технологиях: сб. тр. конф. Курск: Университетская книга. 2017. С. 323-328.
2. Серков А.С., Антропова Л.Б. Внедрения универсальной оснастки в операцию шлифования центральных отверстий цилиндрических прямозубых зубчатых колёс // Метрология, стандартизация и управление качеством: сб. тр. конф. Омск: Изд-во ОмГТУ. 2018. С. 105-108.
3. Серков А.С., Антропова Л.Б. Шлифование центрального отверстия цилиндрического прямозубого зубчатого колеса с помощью универсальной оснастки // Проблемы эффективного использования научного потенциала общества: сб. ст. В 3 ч. Стерлитамак: АМИ. 2019. Ч. 2. С. 178-181.
4. Серков А.С., Антропова Л.Б. Обработка отверстия и торца цилиндрического прямозубого зубчатого колеса с помощью универсальной оснастки методом шлифования // Научные революции: сущность и роль в развитии науки и техники: сб. ст. В 2 ч. Стерлитамак: АМИ. 2019. Ч. 1. С. 33-36.
5. Серков А.С., Серкова Л.Б., Елецкая С.Ф. Применение универсальных трёхкулачковых патронов для шлифования отверстий в цилиндрических прямозубых зубчатых колёс // Метрология, стандартизация и управление качеством: сб. тр. конф. Омск: Изд-во ОмГТУ. 2019. С. 81-84.

6. Серков А.С. Внедрение универсальной оснастки в процесс шлифования отверстия и торца заготовки сателлита // Известия Тульского Государственного Университета. Технические Науки. 2020. № 4. С. 316-320.
7. Серков А.С., Серкова Л.Б., Жданова Ю.Е., Масягин В.Б. Внедрение универсальной оснастки в процесс шлифование отверстия и торца заготовки сателлита // Молодёжь и системная модернизация страны: сборник научных статей 5-й Международной научной конференции студентов и молодых учёных. Курск: Юго-Западный Государственный Университет. 2020. С. 320-323.
8. Серков А.С., Масягин В.Б., Серкова Л.Б. Анализ напряжённо-деформированного состояния заготовки шестерни при различных схемах закрепления // Метрология, стандартизация и управление качеством: Материалы V Всероссийской научно-технической конференции. Омск: Омский Государственный Технический Университет. 2020. С. 190-203.
9. Серков А.С., Масягин В.Б., Серкова Л.Б. Исследование напряжённо-деформированного состояния заготовки зубчатого колеса на математических моделях // Известия Тульского Государственного Университета. Технические Науки. 2020. № 5. С. 362-373.
10. Серков А.С., Масягин В.Б., Артиюх Р.Л., Серкова Л.Б., Акимов В.В. Исследование напряжённо-деформированного состояния заготовки зубчатого колеса с применением математических моделей в зависимости от сил зажима в 3-х и 6-ти кулачковых самоцентрирующих патронах // Омский научный вестник. 2020. № 4(172). С. 13-18.
11. Серков А.С. Исследование упругих деформаций центральных отверстий зубчатых колёс, вызванных силами закрепления // Известия Тульского Государственного Университета. Технические Науки. 2023. № 9. С. 3-19.
12. Серков А.С., Серкова Л.Б., Масягин В.Б. Шестикулачковый самоцентрирующий спирально-реечный патрон // Патент на полезную модель 201747U1, 31.12.2020. Заявка № 2020132025 от 29.09.2020.
13. Бенин Л.А., Евстафьев К.Б., Кравец С.Г., Слободянюк В.П. Шестикулачковый самоцентрирующий патрон // Патент на изобретение 908545, 28.02.1982. Заявка № 2933863 от 05.06.1980.
14. Здановский М.Р., Михаевич С.Л., Дридзе Л.С. Самоцентрирующий патрон // Патент на изобретение 656745A1, 15.04.1979. Заявка № 2160377 от 28.07.1975.
15. Бабенко И.Ф. Самоцентрирующий кулачковый спирально-реечный патрон // Патент на изобретение 94330, 01.01.1952. Заявка № 444890 от 03.05.1951.

УДК 629.783

**Повышение эффективности приборного радиооборудования изделий  
ракетно-космической техники посредством оценки атмосферных  
затуханий радиосигнала на трассе «Космос – Земля»**

Алексей Романович Фалько, инженер,  
Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С.П. Королева,  
г. Королёв, Московская область

*В настоящее время существует ряд исследований влияния отдельных типов атмосферных потерь на энергетику радиосигналов «Космос – Земля», обеспечивающую приборным составом изделий ракетно-космической техники. Наиболее подробными среди данных работ являются рекомендации по расчету, приведенные в документации Международного союза электросвязи.*

*В статье предлагается обобщенная методика определения совокупного влияния потерь при затухании радиосигнала в атмосфере. Предложенная методика включает в себя рекомендации по расчету, приведенные в документах Международного союза электросвязи.*

Спутниковая связь, радиосвязь «Земля – космос», затухание в атмосфере из-за облаков, поглощение в газах, рассеяние в гидрометеорах и при тропосферных мерцаниях.

**Improvement of instrumental radio equipment efficiency for rocket and space technology products by atmospheric attenuation calculation of the Space-Earth radio signals**

Alexey Romanovich Falko, engineer,  
S.P. Korolev Rocket and Space Corporation «Energia», Korolev, Moscow region

*Nowdays, there are the number of studies assessing the impact of certain types of atmospheric losses on the energy characteristics of Earth-Space radio-communications provided by the instrumental equipment of rocket and space technology products. Most detailed among these studies are the calculation recommendations of International Telecommunication Union.*

*The article presents a generalized method for determining losses during attenuation of a radio signal in the atmosphere. The proposed methodology includes calculation methods given in recommendations of International Telecommunication Union.*

Satellite communications, Earth-Space radio-communications, attenuation in the atmosphere due to clouds, absorption in gases, scattering in hydrometeors and during tropospheric scintillation.

## Введение

Проектирование, производство и эксплуатация изделий ракетно-космической техники на всех стадиях жизненного цикла предусматривает необходимость проведения расчётов энергетики радиолинии. Особую ценность представляют наиболее полные расчёты, учитывающие непосредственное влияние земной атмосферы и позволяющие уже на ранних проектных стадиях снижать вероятность последующих коррекций требований к техническим характеристикам применяемой аппаратуры. Подобные исследования представляют собой последовательные решения задач многокритериального выбора параметров радиолиний, обеспечивающих возможность нивелировать влияние контролируемых потерь, обусловленных проектными решениями. К таким потерям относят: потери в свободном пространстве, на поляризацию, вследствие ошибок наведения. Помимо вышеперечисленных существуют атмосферные потери при ослаблении напряженности поля из-за облачности, за счет поглощения в газах, рассеяния в гидрометеорах и при тропосферных мерцаниях, которые также целесообразно учитывать на стадии проектирования. В большинстве случаев совокупность перечисленных атмосферных ослаблений приводит к потерям на один или несколько порядков меньшим, чем аналогичная совокупность контролируемых потерь, что зачастую воспринимается исследователями в качестве фактора, допускающего возможность пренебречь ими в ходе определения расчетных значений. Кроме того, анализ существующих публикаций в данной области позволяет сделать вывод о том, что в настоящее время не существует обобщенной методики определения совокупного влияния потерь при затухании радиосигнала в атмосфере на характеристики связи «Космос – Земля», в то время как влияние отдельных атмосферных ослаблений наиболее полно представлено в рекомендациях Международного союза электросвязи (МСЭ).

В рамках настоящей статьи предложена методика определения потерь при затухании радиосигнала в атмосфере, позволяющая без лишних упрощений осуществлять расчёт в максимальном соответствии с рекомендациями МСЭ и обеспечивать минимальную вероятность последующих коррекций требований к техническим характеристикам применяемой аппаратуры.

## Ослабление из-за облачности

Расчетная формула ослабления из-за облачности имеет вид [1, С. 3]:

$$\begin{cases} A_c = 0 \text{ при } f < 10 \text{ ГГц} \\ A_c = L \cdot \frac{K_l}{\sin \varphi} \text{ при } f \geq 10 \text{ ГГц, [дБ]} \end{cases} \quad (1)$$

где  $f$  – расчетная частота радиосвязи, ГГц;

$L$  – общий столбчатый объем жидкой воды в облаках, превышаемый в 0,1% времени за год,  $\text{кг}/\text{м}^2$ ;

$K_l$  – коэффициент погонного ослабления,  $(\text{дБ}/\text{км})/(\text{г}/\text{м}^3)$ ;

$\varphi$  – угол места, град.

Для вычисления значения  $K_l$  для частот до 1000 ГГц можно использовать математическую модель, основанную на Релеевском рассеянии, в которой применяется двумерная модель Дебая для диэлектрической проницаемости  $\epsilon(f)$  во-

ды [1, С. 2]:

$$\begin{cases} \varepsilon''(f) = \frac{f \cdot (\varepsilon_0 - \varepsilon_1)}{f_p \cdot [1 + \left(\frac{f}{f_p}\right)^2]} + \frac{f \cdot (\varepsilon_1 - \varepsilon_2)}{f_p \cdot [1 + \left(\frac{f}{f_s}\right)^2]} \\ \varepsilon'(f) = \frac{(\varepsilon_0 - \varepsilon_1)}{[1 + \left(\frac{f}{f_p}\right)^2]} + \frac{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)}{[1 + \left(\frac{f}{f_s}\right)^2]} + \varepsilon_2 \end{cases}, \quad (2)$$

где  $\varepsilon_0 = 77,6 + 103,3 \cdot (\theta - 1)$ ,  $\varepsilon_1 = 5,48$ ,  $\varepsilon_2 = 3,51$ ,  $\theta = \frac{300}{273,15}$  – коэффициенты математической модели;

$f_p = 20,09 - 142 \cdot (\theta - 1) + 294 \cdot (\theta - 1)^2$  – главная частота релаксации, ГГц;

$f_s = 590 - 1500 \cdot (\theta - 1)$  – вторичная частота релаксации, ГГц.

Общий столбчатый объем жидкой воды в облаках, превышаемый в 0,1% времени за год определим для разных широт из контурной карты распределения столбчатого объема жидкости в облаках [1, С. 4].

Примем в качестве значений общего столбчатого объема жидкой воды для 0,1% времени для различных диапазонов широт его средние показатели на данных территориях планеты (в соответствии с [1, С. 4]):

Получим приблизительное значение:

$$\begin{cases} L = 2 \text{ для высоких широт } (> 45^\circ) \\ L = 3 \text{ для средних широт } (22^\circ..45^\circ), \left[ \frac{\text{кг}}{\text{м}^2} \right] \\ L = 4 \text{ для малых широт } (< 22^\circ) \end{cases} \quad (3)$$

Коэффициент погонного ослабления получим из формулы [2, С. 4]:

$$K_l = \frac{0,819 \cdot (1,9479 \cdot 10^{-4} \cdot f^{2,308} + 2,9424 \cdot f^{0,7436} - 4,9451)}{\varepsilon''(f) \cdot \left( 1 + \left( \frac{2 + \varepsilon'(f)}{\varepsilon''(f)} \right)^2 \right)}, \text{ [дБ/км]} \quad (4)$$

Для частоты радиосвязи  $f = 15$  ГГц величина ослабления в облаках равна:

$$A_c = L \cdot \frac{K_l}{\sin \varphi}, \text{ [дБ]} \quad (5)$$

Данное значение в расчете определяется для трех типов территорий планеты: малых, средних и высоких широт при подстановке (4) в (5).

### Ослабление за счет гидрометеоров

Ослабление за счет гидрометеоров (влияние дождя) определяется следующим образом [3, С. 7]:

$$A_r = A_{0,01} \cdot \left( \frac{p}{0,01} \right)^{-(0,655+0,033 \ln(p)-0,045 \ln(A_{0,01})-\beta(1-p)\sin\varphi)}, \text{ [дБ]} \quad (6)$$

где  $A_{0,01}$  – значение ослабления, превышаемого для 0,01% времени года, дБ;

$p$  – процент времени среднего года, для которого ведется расчет, %;  
 $\beta$  – коэффициент для расчета вследствие ослабления за счет влияния дождя.

Прогнозируемое значение ослабления, превышающее в течение 0,01% времени среднего года [3, С. 7]:

$$A_{0,01} = \gamma_R \cdot L_E, [\text{дБ}] \quad (7)$$

где  $\gamma_R$  – удельное затухание, дБ/км;

$L_E$  – эффективная длина наклонной трассы, км.

Удельное затухание можно определить по формуле [3, С. 6]:

$$\gamma_R = k \cdot R_{0,01}, \left[ \frac{\text{дБ}}{\text{км}} \right] \quad (8)$$

где  $k$  – суммарный частотно-зависимый коэффициент, дБ;

$R_{0,01}$  – норма осадков для 0,01% времени, 1/км.

$R_{0,01}$  определяется из карты осадков для 0,01% времени [4, С. 5].

В качестве нормальных значений осадков для 0,01% времени для различных диапазонов широт примем их средние показатели на данных территориях планеты (в соответствии с [4, С. 5]):

$$\begin{cases} R_{0,01} = 30 \text{ для высоких широт } (> 45^\circ) \\ R_{0,01} = 60 \text{ для средних широт } (22^\circ..45^\circ), \left[ \frac{1}{\text{км}} \right] \\ R_{0,01} = 90 \text{ для малых широт } (< 22^\circ) \end{cases} \quad (9)$$

Дальнейший расчет производится по отдельности для каждого из значений нормы осадков.

Суммарный частотно-зависимый коэффициент равен [5, С. 3]:

$$k = \frac{(k_H + k_V + (k_H - k_V) \cdot \cos^2 \varphi \cos (2 \cdot \tau))}{2}, [\text{дБ}] \quad (10)$$

где  $k_H$  и  $k_V$  – горизонтальная и вертикальная составляющие частотно-зависимого коэффициента, получаемые из таблиц [5, С. 6-9], дБ;

$\tau$  – угол наклона оси поляризации по отношению к горизонту (при вертикальной поляризации  $\tau = 90^\circ$ , при горизонтальной –  $\tau = 0^\circ$ , при круговой –  $\tau = 90^\circ$ ).

Эффективная длина наклонной трассы [3, С. 7]:

$$L_E = L_R \cdot \nu_{0,01}, [\text{км}] \quad (11)$$

где  $L_R$  – вертикальная проекция длины наклонной трассы, км;

$\nu_{0,01}$  – коэффициент вертикальной поправки для 0,01% времени.

Вертикальная проекция длины наклонной трассы вычисляется исходя из выражения:

$$\begin{cases} L_R = L_G \cdot \frac{r_{0,01}}{\cos \varphi} \text{ при } \zeta > 0 \\ L_R = \frac{h_R - h_S}{\sin \varphi} \text{ при } \zeta \leq 0 \end{cases}, [\text{км}] \quad (12)$$

где  $L_G$  – горизонтальная проекция длины наклонной трассы, км;

$r_{0,01}$  – горизонтальный понижающий коэффициент для 0,01% времени;

$h_R = 2,5$  км – высота дождя (высота облаков нижнего и среднего ярусов, не превышающая 2500 м);

$h_S = 0,875$  км – высота станции над уровнем моря (средняя высота обитаемой поверхности планеты над уровнем моря – 875 метров).

Горизонтальная проекция длины наклонной трассы [3, С. 6]:

$$L_G = L_S \cdot \cos \varphi, [\text{км}] \quad (13)$$

где  $L_S$  – длина наклонной трассы, км.

Длина наклонной трассы вычисляется исходя из условия:

$$\begin{cases} L_S = 2 \cdot \frac{h_R - h_S}{\left( \sin^2 \varphi + 2 \left( \frac{h_R - h_S}{R_e} \right)^2 + \sin \varphi \right)} \text{ при } \varphi < 5 \\ L_S = \frac{h_R - h_S}{\sin \varphi} \text{ при } \varphi \geq 5 \end{cases}, [\text{км}] \quad (14)$$

Горизонтальный понижающий коэффициент для 0,01% времени:

$$r_{0,01} = \frac{1}{1 + 0,78 \cdot \sqrt{\frac{L_G \cdot \gamma_R}{f}} - 0,38 \cdot (1 - e^{-2 \cdot L_G})} \quad (15)$$

Коэффициент вертикальной поправки для 0,01% времени:

$$\nu_{0,01} = \frac{1}{1 + \sqrt{\sin \varphi} \cdot (31 \cdot \left( 1 - e^{-\left( \frac{\varphi}{1+\chi} \right)} \right) \cdot \frac{\sqrt{L_R \cdot \gamma_R}}{f^2} - 0,45)}, \quad (16)$$

где  $\chi$  – коэффициент для нахождения  $\nu_{0,01}$ , град.

Выражение для нахождения  $\chi$  имеет следующий вид:

$$\begin{cases} \chi = 36 - \theta \text{ при } |\theta| < 36 \\ \chi = 0 \text{ при } |\theta| \geq 36 \end{cases}, [\text{град}] \quad (17)$$

где  $\theta$  – широта расположения наземной приемной станции, град (для расчета возьмем средние значения: для малых широт –  $11^\circ$ , для средних –  $33,5^\circ$ , для высоких –  $67,5^\circ$ ).

Подставив (8)..(17) в (7) получим прогнозируемое значение ослабления, превышаемое в течение 0,01% времени среднего года.

Полученное значение подставим в (6) и получим ослабление за счет гидрометеоров (влияние дождя) для всех групп широт нахождения наземной приемной станции (НПС).

### Затухание в атмосферных газах

Анализ затуханий под влиянием атмосферных газов заключается в определении погонного затухания и протяженности трассы радиосигнала в каждом отдельном атмосферном слое, дальнейшем вычислении затухания радиосигнала в каждом конкретном слое, и последующем нахождении результирующего значения по всем слоям.

Толщина слоев определяется экспоненциальной зависимостью с 10 см на уровне Земли до 1 км на высоте 100 км. При таком разбиении снижается общее количество ошибок в расчете для общей протяженности трассы. Толщина  $i$ -го слоя вычисляется по формуле [6, С. 13] (от 1 до 100 км присутствует 922 слоя):

$$\delta_i = 0,0001 \cdot e^{\frac{i-1}{100}} \quad (18)$$

Высота каждого слоя высчитывается по формуле:

$$h_i = \sum_{j=1}^{j=i} \delta_j \quad (19)$$

При дальнейшем расчете для каждого слоя необходимо использовать актуальные значения параметров атмосферы, соответствующие его высоте. За немимением точных данных было принято решение использовать методику [7, С. 4-6], из которой были получены параметры эталонной атмосферы, с учетом широты нахождения НПС и времени года.

1) Для высоких широт ( $> 45^\circ$ ) в зимнее время:

$$T_i(h_i) = \begin{cases} 257,4345 - 2,3474 \cdot h_i - 1,5479 \cdot h_i^2 + 0,08473 \cdot h_i^3 & \text{при } 0 \leq h_i < 8,5 \\ 217,5 \text{ при } 8,5 \leq h_i < 30 \\ 217,5 + (h_i - 30) \cdot 2,125 \text{ при } 30 \leq h_i < 50 \\ 260 \text{ при } 50 \leq h_i < 54 \\ 260 - (h_i - 54) \cdot 1,667 \text{ при } 54 \leq h_i \leq 100 \end{cases}, \quad (20)$$

где  $T_i$  – температура на высоте  $i$ -го слоя, К.

$$P_i(h_i) = \begin{cases} 1010,8828 - 122,2411 \cdot h_i + 4,554 \cdot h_i^2 \text{ при } 0 \leq h_i \leq 10 \\ P_i(10) \cdot e^{-0,147^\circ(h_i-10)} \text{ при } 10 < h_i \leq 72 \\ P_i(72) \cdot e^{-0,150 \cdot (h_i-72)} \text{ при } 72 < h_i \leq 100 \end{cases}, \quad (21)$$

где  $P_i$  – давление на высоте  $i$ -го слоя, гПа.

$$\rho_i(h_i) = \begin{cases} 1,2319 \cdot e^{0,07481 \cdot h_i - 0,0981 \cdot h_i^2 + 0,00281 \cdot h_i^3} \text{ при } 0 \leq h_i \leq 10 \\ 0 \text{ при } 10 < h_i \end{cases}, \quad (22)$$

где  $\rho_i$  – плотность водяного пара на высоте  $i$ -го слоя,  $\text{г}/\text{м}^3$ .

2) Для высоких широт ( $> 45^\circ$ ) в летнее время:

$$T_i(h_i) = \begin{cases} 286,8374 - 4,7805 \cdot h_i - 1,1402 \cdot h_i^2 \text{ при } 0 \leq h_i < 10 \\ 225 \text{ при } 10 \leq h_i < 23 \\ 225 \cdot e^{(h_i-23) \cdot 0,008317} \text{ при } 23 \leq h_i < 48 \\ 277 \text{ при } 48 \leq h_i < 53 \\ 277 - (h_i - 53) \cdot 4,0769 \text{ при } 53 \leq h_i < 79 \\ 171 \text{ при } 79 \leq h_i \leq 100 \end{cases} \quad (23)$$

$$P_i(h_i) = \begin{cases} 1008,0278 - 113,2494 \cdot h_i + 3,9408 \cdot h_i^2 \text{ при } 0 \leq h_i \leq 10 \\ P_i(10) \cdot e^{-0,140^\circ(h_i-10)} \text{ при } 10 < h_i \leq 72 \\ P_i(72) \cdot e^{-0,165 \cdot (h_i-72)} \text{ при } 72 < h_i \leq 100 \end{cases} \quad (24)$$

$$\rho_i(h_i) = \begin{cases} 8,988 \cdot e^{-0,3614 \cdot h_i - 0,05402 \cdot h_i^2 - 0,001955 \cdot h_i^3} & \text{при } 0 \leq h_i \leq 15 \\ 0 & \text{при } 15 < h_i \end{cases} \quad (25)$$

3) Для средних широт ( $22^\circ..45^\circ$ ) в зимнее время:

$$T_i(h_i) = \begin{cases} 272,7241 - 3,6217 \cdot h_i - 0,1759 \cdot h_i^2 & \text{при } 0 \leq h_i < 10 \\ 218 & \text{при } 10 \leq h_i < 33 \\ 218 + (h_i - 33) \cdot 3,3571 & \text{при } 33 \leq h_i < 47 \\ 265 & \text{при } 47 \leq h_i < 53 \\ 265 - (h_i - 53) \cdot 2,0370 & \text{при } 53 \leq h_i < 80 \\ 210 & \text{при } 80 \leq h_i \leq 100 \end{cases} \quad (26)$$

$$P_i(h_i) = \begin{cases} 1010,8627 - 124,2954 \cdot h_i + 4,8307 \cdot h_i^2 & \text{при } 0 \leq h_i \leq 10 \\ P_i(10) \cdot e^{-0,147 \cdot (h_i - 10)} & \text{при } 10 < h_i \leq 72 \\ P_i(72) \cdot e^{-0,165 \cdot (h_i - 72)} & \text{при } 72 < h_i \leq 100 \end{cases} \quad (27)$$

$$\rho_i(h_i) = \begin{cases} 3,4742 \cdot e^{-0,2697 \cdot h_i - 0,03604 \cdot h_i^2 + 0,0004489 \cdot h_i^3} & \text{при } 0 \leq h_i \leq 10 \\ 0 & \text{при } 10 < h_i \end{cases} \quad (28)$$

4) Для средних широт ( $22^\circ..45^\circ$ ) в летнее время:

$$T_i(h_i) = \begin{cases} 294,9838 - 5,2159 \cdot h_i - 0,07109 \cdot h_i^2 & \text{при } 0 \leq h_i < 13 \\ 215,15 & \text{при } 13 \leq h_i < 17 \\ 215,15 \cdot e^{(h_i - 17) \cdot 0,008128} & \text{при } 17 \leq h_i < 47 \\ 275 & \text{при } 47 \leq h_i < 53 \\ 275 + (1 - e^{(h_i - 53) \cdot 0,06}) \cdot 20 & \text{при } 53 \leq h_i < 80 \\ 175 & \text{при } 80 \leq h_i \leq 100 \end{cases} \quad (29)$$

$$P_i(h_i) = \begin{cases} 1012,8186 - 111,5569 \cdot h_i + 3,8646 \cdot h_i^2 & \text{при } 0 \leq h_i \leq 10 \\ P_i(10) \cdot e^{-0,147 \cdot (h_i - 10)} & \text{при } 10 < h_i \leq 72 \\ P_i(72) \cdot e^{-0,165 \cdot (h_i - 72)} & \text{при } 72 < h_i \leq 100 \end{cases} \quad (30)$$

$$\rho_i(h_i) = \begin{cases} 14,3542 \cdot e^{-0,4174 \cdot h_i - 0,02290 \cdot h_i^2 + 0,001007 \cdot h_i^3} & \text{при } 0 \leq h_i \leq 15 \\ 0 & \text{при } 15 < h_i \end{cases} \quad (31)$$

5) Для малых широт ( $< 22^\circ$ ) круглый год:

$$T_i(h_i) = \begin{cases} 300,4222 - 6,3533 \cdot h_i + 0,005886 \cdot h_i^2 & \text{при } 0 \leq h_i < 17 \\ 194 + (h_i - 17) \cdot 2,533 & \text{при } 17 \leq h_i < 47 \\ 270 & \text{при } 47 \leq h_i < 52 \\ 270 - (h_i - 52) \cdot 3,0714 & \text{при } 52 \leq h_i < 80 \\ 184 & \text{при } 80 \leq h_i \leq 100 \end{cases} \quad (32)$$

$$P_i(h_i) = \begin{cases} 1012,0306 - 109,0338 \cdot h_i + 3,6316 \cdot h_i^2 & \text{при } 0 \leq h_i \leq 10 \\ P_i(10) \cdot e^{-0,147 \cdot (h_i - 10)} & \text{при } 10 < h_i \leq 72 \\ P_i(72) \cdot e^{-0,165 \cdot (h_i - 72)} & \text{при } 72 < h_i \leq 100 \end{cases} \quad (33)$$

$$\rho_i(h_i) = \begin{cases} 19,6542 \cdot e^{-0,2313 \cdot h_i - 0,1122 \cdot h_i^2 + 0,01351 \cdot h_i^3 - 0,0005923 \cdot h_i^4} & \text{при } 0 \leq h_i \leq 15 \\ 0 & \text{при } 15 < h_i \end{cases} \quad (34)$$

Найдем давление водяного пара для каждой высоты слоя [6, С. 7]:

$$P_{\text{вод.пар}_i}(h_i) = \frac{\rho_i(h_i) \cdot T_i(h_i)}{216,7} \quad (35)$$

В таблицах, приведенных в рекомендации МСЭ [6], представлены значения резонансных частот, которые влияют на погонное затухание радиосигналов в слоях атмосферы, где  $f_0$  – резонансная частота, остальное – коэффициенты для сухого воздуха и водяного пара. Количество резонансных частот для кислорода равно  $N = 43$ , а для водяного пара –  $M = 34$ , что соответствует количеству строк в каждой из таблиц [6].

Количество слоев атмосферы, учитываемых в расчете  $K = 922$ .

Величина погонного затухания может быть выражена [6, С. 14]:

$$\gamma_i = \gamma_{\text{кисл}_i} + \gamma_{\text{вод.пар}_i} = 0,1820 \cdot f \cdot (N''_{\text{кисл}}(f)_i + N''_{\text{вод.пар}}(f)_i), \left[ \frac{\text{дБ}}{\text{км}} \right] \quad (36)$$

где  $\gamma_{\text{кисл}_i}$  – погонное затухание за счет влияния кислорода для  $i$ -ого слоя,  $\frac{\text{дБ}}{\text{км}}$ ;

$\gamma_{\text{вод.пар}_i}$  – погонное затухание за счет влияния водяного пара для  $i$ -ого слоя,  $\frac{\text{дБ}}{\text{км}}$ ;

$f$  – частота радиосвязи, ГГц;

$N''_{\text{кисл}}(f)_i$  и  $N''_{\text{вод.пар}}(f)_i$  – мнимые части частотно-зависимой комплексной рефракции кислорода и водяного пара.

Составляющие уравнения (36) получим из следующих выкладок:

$$N''_{\text{кисл}}(f)_i = \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^N S_{\text{кисл}_{i,j}} \cdot F_{\text{кисл}_{i,j}} + \sum_{i=1}^K N''_D(f)_i \quad (37)$$

где  $S_{\text{кисл}_{i,j}}$  – интенсивность спектральных линий кислорода;

$F_{\text{кисл}_{i,j}}$  – коэффициент формы спектральных линий кислорода;

$N''_D(f)_i$  – мнимая часть частотно-зависимой комплексной рефракции азота.

$$N''_{\text{вод.пар}}(f)_i = \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^M S_{\text{вод.пар}_{i,j}} \cdot F_{\text{вод.пар}_{i,j}} \quad (38)$$

где  $S_{\text{вод.пар}_{i,j}}$  – интенсивность спектральных линий кислорода;

$F_{\text{вод.пар}_{i,j}}$  – коэффициент формы спектральных линий кислорода.

Далее  $a_{1..6,j}$ ,  $b_{1..6,j}$ ,  $f_{0,j}$  принимать как коэффициенты из таблиц [6, С. 8-9], где  $j$  соответствует номеру строки (определенной резонансной частоты  $f_{0,j}$ ) соответствующей таблицы (для кислорода и водяного пара этот диапазон отличается, т.к.  $N = 43$ , а  $M = 34$ ).

Интенсивности спектральных линий:

$$S_{\text{кисл}_{i,j}} = a_{1j} \cdot 10^{-7} \cdot P_i \cdot \theta_i^3 \cdot e^{a_{2j} \cdot (1-\theta_i)}, \quad (39)$$

где  $\theta_i = 300/T_i$  – коэффициент для подстановки.

$$S_{\text{вод.пар}_{i,j}} = b_{1j} \cdot 10^{-1} \cdot P_{\text{вод.пара}_i} \cdot \theta_i^3 \cdot e^{b_{2j} \cdot (1-\theta_i)} \quad (40)$$

Коэффициенты формы спектральных линий:

$$F_{\text{кисл}_{i,j}} = \frac{f}{f_{0j}} \cdot \left[ \frac{\Delta f_{\text{кисл}_{i,j}} - \delta_{i,j} \cdot (f_{0j} - f)}{(f_{0j} - f)^2 + \Delta f_{\text{кисл}_{i,j}}^2} + \frac{\Delta f_{\text{кисл}_{i,j}} - \delta_{i,j} \cdot (f_{0j} + f)}{(f_{0j} + f)^2 + \Delta f_{\text{кисл}_{i,j}}^2} \right] \quad (41)$$

где  $\Delta f_{\text{кисл}_{i,j}}$  – ширина спектральных линий для кислорода;

$\delta_{i,j}$  – коэффициент смещения линий для кислорода.

$$F_{\text{вод.пар}_{i,j}} = \frac{f}{f_{0j}} \cdot \left[ \frac{\Delta f_{\text{вод.пар}_{i,j}}}{(f_{0j} - f)^2 + \Delta f_{\text{вод.пар}_{i,j}}^2} + \frac{\Delta f_{\text{вод.пар}_{i,j}}}{(f_{0j} + f)^2 + \Delta f_{\text{вод.пар}_{i,j}}^2} \right], \quad (42)$$

где  $\Delta f_{\text{вод.пар}_{i,j}}$  – ширина спектральных линий для водяного пара.

Значения ширины спектральных линий для кислорода и водяного пара рассчитываются следующим образом:

$$\begin{cases} \Delta f_{\text{кисл}_{0i,j}} = a_{3j} \cdot 10^{-4} \cdot \left( P_i \cdot \theta_i^{0.8-a_{4j}} + 1,1 \cdot P_{\text{вод.пара}_i} \cdot \theta_i \right) \\ \Delta f_{\text{кисл}_{i,j}} = \sqrt{\Delta f_{\text{кисл}_{0i,j}}^2 + 2,25 \cdot 10^{-6}} \end{cases}, \quad (43)$$

где  $\Delta f_{\text{кисл}_{0i,j}}$  – ширина спектральных линий для кислорода без учета доплеровского расширения.

$$\begin{cases} \Delta f_{\text{вод.пар}_{0i,j}} = b_{3j} \cdot 10^{-4} \cdot \left( P_i \cdot \theta_i^{b_{4j}} + b_{5j} \cdot P_{\text{вод.пара}_i} \cdot \theta_i^{b_{6j}} \right) \\ \Delta f_{\text{вод.пар}_{i,j}} = 0,535 \cdot \Delta f_{\text{вод.пар}_{0i,j}} + \\ + \sqrt{0,217 \cdot \Delta f_{\text{вод.пар}_{0i,j}}^2 + 2,1316 \cdot 10^{-12} \cdot \frac{\Delta f_{\text{вод.пар}_{0i,j}}^2}{\theta_i}} \end{cases}, \quad (44)$$

где  $\Delta f_{\text{вод.пар}_{0i,j}}$  – ширина спектральных линий для водяного пара без учета доплеровского расширения.

Коэффициент смещения линий для кислорода:

$$\delta_{i,j} = (a_{5j} + a_{6j} \cdot \theta_i) \cdot 10^{-4} \cdot (P_i + P_{\text{вод.пара}_i}) \cdot \theta_i^{0.8} \quad (45)$$

Полоса непрерывного поглощения в сухом воздухе является следствием существования нерезонансного спектра, также называемого дебаевским, на частотах ниже 10 ГГц и, при определенном давлении, затухания за счет азота на частотах выше 100 ГГц.

Минимальная часть частотно-зависимой комплексной рефракции азота:

$$N''_D(f)_i = f \cdot P_i \cdot \theta_i^2 \cdot \left[ \frac{6,14 \cdot 10^{-5}}{d_i \cdot \left[ 1 + \left( \frac{f}{d} \right)^2 \right]} + \frac{1,4 \cdot 10^{-12} \cdot P_i \cdot \theta_i^{1,5}}{1 + 1,9 \cdot 10^{-5} \cdot f^{1,5}} \right], \quad (46)$$

где  $d_i = 5,6 \cdot 10^{-4} \cdot (P_i + P_{\text{вод.пар}_i}) \cdot \theta_i^{0,8}$  – ширина дебаевского спектра для учета влияния азота.

Также необходимо принять во внимание отклонение линии трассы при прохождении через слои атмосферы [6, С. 11-13]. Геометрическое представление этого процесса показано на рисунке 1.

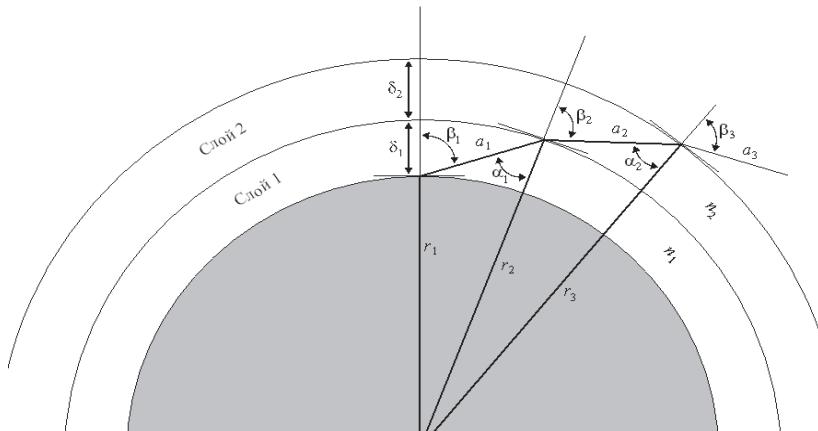


Рисунок 1 – Геометрическое отклонение линии трассы

$$\left\{ \begin{array}{l} r_i = r_{i-1} + \delta_{i-1} \\ a_i = -r_i \cdot \cos \beta_i + \frac{1}{2} \cdot \sqrt{4 \cdot r_i^2 \cdot \cos^2 \beta_i + 8 \cdot r_i \cdot \delta_i + 4 \cdot \delta_i^2} \\ \alpha_i = \pi - \arccos \left( \frac{-a_i^2 - 2 \cdot r_i \cdot \delta_i - \delta_i^2}{2 \cdot a_i \cdot r_i + 2 \cdot a_i \cdot \delta_i} \right) \\ \beta_{i+1} = \arcsin \left( \frac{n_i}{n_{i+1}} \sin \alpha_i \right) \end{array} \right. , \quad (47)$$

где  $r_i$  – радиус-вектор из центра Земли до точки вхождения радиосигнала в  $i$ -ый слой, км;

$\delta_i$  – толщина слоя, км;

$a_i$  – длина отрезка линии трассы в  $i$ -ом слое, км;

$\alpha_i, \beta_i$  – углы, определяющие геометрию вхождения радиосигнала в  $i$ -ый слой, град;

$n_i$  – индекс рефракции радиоволн в  $i$ -ом слое.

Индекс рефракции радиоволн:

$$n_i = 1 + N_i \cdot 10^{-6}, \quad (48)$$

где  $N_i$  – рефракция радиоволн  $i$ -ого слоя.

$$N_i = 77,6 \cdot \frac{P_i}{T_i} + 72 \cdot \frac{P_{\text{вод.пар}i}}{T_i} + 3,75 \cdot 10^5 \cdot \frac{P_{\text{вод.пар}i}}{T_i^2} \quad (49)$$

Суммарное затухание радиосигнала в атмосферных газах определяется по формуле:

$$A_g = \sum_{i=1}^K a_i \cdot \gamma_i, [\text{дБ}] \quad (50)$$

После подстановки (18)..(49) в (50) с учетом погодных условий и широт расположения НПС получаем суммарное затухание радиосигнала в атмосферных газах для широкого диапазона случаев нахождения космических аппаратов (КА) и НПС.

### Ослабление из-за тропосферных мерцаний

Амплитудные мерцания, вызывающие замирания радиосигнала, представляют собой явления, возникающие вследствие изменения амплитуды волны радиосигнала, происходящего ввиду неоднородности индекса рефракции вдоль пути ее распространения. Возникает эффект многолучевости, когда на приемную антенну поступает не только сам сигнал, но и его переотраженные и преломленные копии, что также может играть роль в замирании и ослаблении волны. Однако при углах места, больших или равных  $5^\circ$ , вклад эффекта многолучевости, в отличие от мерцаний, является несущественным.

Далее приведенный метод расчета позволяет оценить величину замираний для углов места, больших или равных  $5^\circ$ . Расчет ослабления сигнала вследствие тропосферных мерцаний будет произведен по методике, изложенной в [8].

Эмпирическая формула стандартного отклонения, описывающая мерцание радиосигнала:

$$\sigma_{ref} = 3,6 \cdot 10^{-3} + 10^{-4} \cdot N_{wet}, [\text{дБ}] \quad (51)$$

где  $N_{wet}$  – влажностная составляющая индекса рефракции.

Влажностная составляющая индекса рефракции определяется по формуле, изложенной в [9, С. 1]:

$$N_{wet} = \frac{3,732 \cdot 10^5 \cdot P_{\text{вод.пар}1}}{T_1^2} \quad (52)$$

где индекс  $i = 1$  обозначает слой атмосферы у поверхности земли.

Эффективная длина трассы радиосигнала:

$$L = \frac{2 \cdot h_L}{\sqrt{\sin^2 \varphi + 2,35 \cdot 10^{-4} + \sin \varphi}}, [\text{м}] \quad (53)$$

где  $\varphi$  – угол места НПС;

$h_L = 1000$  м – высота турбулентного слоя (округлено до 1000 м ввиду отсутствия точных данных [3, С. 18]).

Значение эффективного диаметра передающей антенны:

$$D_{\text{ЭФ}} = \sqrt{\eta} \cdot D_{\text{ЭКВ}}, [\text{м}] \quad (54)$$

где  $D_{\text{экв}} \sim 1,4$  м. – эквивалентный диаметр передающей антенны;  
 $\eta = 0,5$  – КПД передающей антенны (ввиду отсутствия точных данных принят равным 50%).

Коэффициент усреднения мерцаний:

$$g(x) = \sqrt{3,86 \cdot (x^2 + 1)^{11/12} \cdot \sin\left(\frac{11}{6} \operatorname{tg} \frac{1}{x}\right) - 7,08x^{5/6}} \quad (55)$$

где  $x = 1,22 \cdot D_{\text{экв}}^2 \cdot (f/L)$ , в которой  $f$  – частота радиосигнала.

Пересчет стандартного отклонения с учетом коэффициента усреднения, превышаемый для процента времени  $p = 0,01\%$ :

$$\sigma = \sigma_{\text{ref}} \cdot f^{7/12} \cdot \frac{g(x)}{\sin^{1,2} \varphi}, [\text{дБ}] \quad (56)$$

Коэффициент процента времени:

$$a(p) = -0,061 \lg^3 p + 0,072 \cdot \lg^2 p - 1,71 \cdot \lg p + 3,0 \quad (57)$$

Ослабление вследствие замирания радиосигнала:

$$A_s(p) = a(p) \cdot \sigma \quad (58)$$

После подстановки (56) и (57) в (58) с учетом погодных условий и широт расположения НПС получаем суммарное затухание радиосигнала вследствие замирания для широкого диапазона случаев нахождения КА и НПС.

### Результаты расчета затуханий канала радиосвязи в атмосфере

Суммарные потери радиосигнала в атмосфере [8]:

$$A_{\Sigma} = A_g + \sqrt{(A_c + A_r)^2 + A_s}, [\text{дБ}] \quad (59)$$

Получаемые результаты предлагаются для наглядности сводить к виду, схожему с приведенным в таблице 1.

Таблица 1 – Полученные результаты расчета атмосферных затуханий

Время года	Параметр	Значение		
		Малые широты ( $0^{\circ} \leq \theta < 22^{\circ}$ )	Средние широты ( $22^{\circ} \leq \theta < 45^{\circ}$ )	Высокие широты ( $45^{\circ} \leq \theta$ )
Зима	Ослабление из-за облачности $A_c$ , [дБ]	–	–	–
	Ослабление за счет гидрометеоров $A_r$ , [дБ]	–	–	–
	Ослабление в атмосферных газах $A_g$ , [дБ]	–	–	–
	Ослабление из-за троп. мерцаний $A_s$ , [дБ]	–	–	–
	<u>Суммарные атмосферные потери <math>A_{\Sigma}</math>, [дБ]</u>	–	–	–
Лето	Ослабление из-за облачности $A_c$ , [дБ]	–	–	–
	Ослабление за счет гидрометеоров $A_r$ , [дБ]	–	–	–
	Ослабление в атмосферных газах $A_g$ , [дБ]	–	–	–

Время года	Параметр	Значение		
		Малые широты ( $0^\circ \leq \theta < 22^\circ$ )	Средние широты ( $22^\circ \leq \theta < 45^\circ$ )	Высокие широты ( $45^\circ \leq \theta$ )
	Ослабление из-за троп. мерцаний $A_s$ , [дБ]	–	–	–
	Суммарные атмосферные потери $A_\Sigma$ , [дБ]	–	–	–

### Заключение

В данной статье предложена методика оценки совокупного влияния атмосферных потерь на характеристики радиосвязи «Земля – Космос», за счет определения составляющих данных потерь для разных времен года и широт нахождения НПС. Математические выкладки, основанные на рекомендациях МСЭ, в рамках описанного исследования приведены в систематизированный вид, позволяющий заинтересованному специалисту подготовить расчетный файл в любой доступной программной среде, либо вручную осуществить вычисления перечисленных потерь, потребных для последующего определения энергетического бюджета рассматриваемого радиоканала.

### Литература

1. Ослабление из-за облачности и тумана: рекомендация МСЭ-R P.840-5. Женева, 2012. 8 с.
2. Ослабление из-за облачности и тумана: рекомендация МСЭ-R P.840-7. Женева, 2017. 4 с.
3. Данные о распространении радиоволн и методы прогнозирования, необходимые для проектирования систем связи Земля-космос: рекомендация МСЭ-R P.618-13. Женева, 2017. 27 с.
4. Характеристики осадков, используемые при моделировании распространения волн: рекомендация МСЭ-R P.837-7. Женева, 2017. 6 с.
5. Модель погонного ослабления в дожде, используемая в методах прогнозирования: рекомендация МСЭ-R P.838-3. Женева, 2005. 9 с.
6. Затухание в атмосферных газах: рекомендация МСЭ-R P.676-11. Женева, 2016. 22 с.
7. Эталонные стандарты атмосферы: рекомендация МСЭ-R P.835-6. Женева, 2017. 10 с.
8. Кувалкин Е.С., Захаров А.И., Пец А.В. Оценка затухания радиосигнала для построения трассы связи «Земля – космос» // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Сер.: Физико-математические и технические науки. 2019. № 3. С. 99-109.
9. ITU-R Recommendations. P.453-7. The radio refractive index: its formula and refractivity data. Geneva, 1999. 10 p.

УДК 004.896

## Концепция применения искусственного интеллекта при изготовлении крупногабаритных деталей ракетных двигателей по технологии прямого лазерного выращивания

Александр Викторович Афонин, начальник отдела цифровых технологий,  
АО «Композит», г. Королев, Московская область

*В работе представлен обзор современного состояния проблемной области, основанной на свойствах, качестве, дефектах и оптимизации процессов аддитивного производства, сформирован список внешних датчиков, оборудования и типов материалов, необходимых для проведения экспериментов, сформулированы подходы к процессам машинного обучения, а также приведены результаты работы, позволяющие понять перспективы применения искусственного интеллекта в процессах изготовления изделий методами аддитивного производства.*

Аддитивные технологии, прямое лазерное выращивание, искусственный интеллект, машинное обучение.

### **The concept of using artificial intelligence in the manufacture of large-sized rocket engine parts using direct laser deposition technology**

Aleksandr Viktorovich Afonin, the head of the digital technology department,  
JSC «Kompozit» Korolev, Moscow region

*The paper provides an overview of the current state of the problem area based on the properties, quality, defects and optimization of additive manufacturing processes, a list of external sensors, equipment and types of materials necessary for conducting experiments is formed, approaches to machine learning processes are formulated, and the results of the work are presented to understand the prospects for the use of artificial intelligence in product manufacturing processes additive manufacturing methods.*

Additive technologies, direct laser deposition, artificial intelligence, machine learning.

#### **Введение**

Аддитивное производство (АП) получило значительное развитие за последнее десятилетие и стало центром внимания исследователей в междисциплинарных областях. Благодаря технологии послойного изготовления, АП позволяет значительно сократить отходы материалов, складские запасы и количество производственных этапов [1]. АП широко используется в различных отраслях промышленности и научных исследованиях, включая производство крупногабаритных деталей ракетных двигателей [2]. АП является ключом к развитию инженерных дисциплин и дает конструктору пространство для творчества и улучшение тактико-технических характеристик конечного изделия.

Среди множества видов процессов АП прямое энергетическое осаждение (от англ. Direct Energy Deposition, далее DED), к которому относится и рассматриваемый частный случай – метод прямого лазерного выращивания (ПЛВ) порошковыми материалами, занимает лидирующую позицию благодаря своим механическим свойствам, сопоставимым с традиционными процессами. DED – это процесс АП в котором сфокусированная тепловая энергия (лазер, электронный луч или плазменная дуга) используется для расплавления осаждаемых материалов с целью создания плотных трехмерных (3D) структур слой за слоем [3]. По сравнению с субтрактивным производством, DED позволяет создавать сложные детали быстрее и дешевле, и в то же время повышать коэффициент использования дорогостоящих материалов. Кроме того, DED может эффективно применяться при ремонте и восстановлении деталей [4]. Существуют различные схемы, применяемые в работе установок ПЛВ, как показано на рисунке 1.

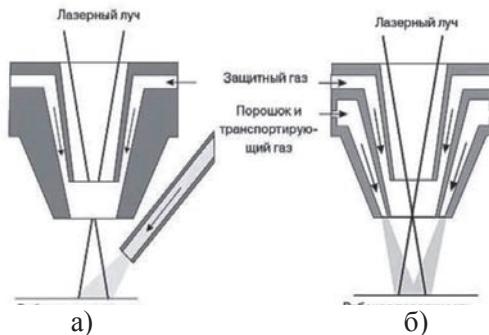


Рисунок 1 – Схема наплавки DED

а) – с боковой подачей порошка, б) – с коаксиальной подачей порошка

По сравнению с DED с проводной подачей, DED с порошковой подачей имеет лучшее разрешение печати, но относительно низкую скорость печати. Хотя DED имеет ряд преимуществ по сравнению с другими технологиями металлического АП, изготовление деталей с хорошей чистотой поверхности и уменьшение пористости и трещин в деталях остается сложной задачей [6]. Дефектная микроструктура может быть вызвана множеством причин, образуя газовые включения, отсутствие проплавления, быстрая кристаллизация и неполное расплавление порошка [7]. Для развивающейся отрасли АП одной из важнейших проблем является непостоянство качества изготовленных деталей, которое зависит от многих факторов, таких как параметры процесса, взаимодействие лазера с материалом и образование дефектов, связанных с подбором режимов. Многофакторные эксперименты или применение программных комплексов имитационного моделирования могут помочь улучшить качество печати, однако это занимает много времени и/или несет за собой большие финансовые затраты. Качество деталей, полученных методами АП можно оптимизировать с помощью онлайн-контроля качества. Тем не менее, это крайне сложно из-за закрытых камер и высокой температуры расплава (до 3000 °C). Для решения этой проблемы одним из решений является мониторинг процесса на месте, но он генерирует большой набор данных о процессе в режиме реального времени.

**Постановка задачи применения ИИ в предиктивной аналитике DED**

Чтобы извлечь полезную информацию и дать рекомендации по организации процесса DED, необходимы более совершенные и эффективные инструменты и методы анализа данных, основанных на больших данных. К таким технологиям относятся технологии искусственного интеллекта (ИИ), машинного обучения (Machine learning, ML), цифровые двойники и облачные вычисления. Быстрое развитие технологий, таких как АП, в сочетании с экспоненциальным ростом доступных производственных данных в эпоху Индустрии 4.0 позволило реализовать методы ИИ и МО, требующие больших объемов данных, в беспредельных масштабах. Методы ИИ и ML широко используются во многих областях для решения проблем и извлечения выгоды из имеющихся данных. Настоящая статья направлена на обзор этой относительно новой области для исследований и практиков и рассмотреть использование методов ИИ и ML в области DED АП путем обзора имеющихся исследований в этой области.

ML является подмножеством ИИ и определяется как метод, способный автоматически обнаруживать закономерности в данных, при этом такие закономерности могут быть использованы для принятия решений в условиях неопределенности, таких как прогнозирование будущего и классификация данных [12].

ML выявляет своего рода «правила» для выполнения задач по обработке данных. Эти задачи могут быть решены с помощью четырех видов подходов к обучению: контролируемое обучение, полуконтролируемое обучение, неконтролируемое обучение и усиленное обучение. Основное различие между этими разновидностями методов обучения заключается в прогнозировании или выводе, который пользователь намеревается сделать.

Глубокое обучение (Deep Learning, DL) – это особая область ML, в которой обучение происходит на последовательных слоях представлений признаков в структуре нейронной сети. В последние годы методам глубокого обучения уделяется особое внимание во всех приложениях ML, и многие исследователи рассматривают методы искусственных нейронных сетей (Artificial Neural Networks, ANN) в совокупности с DL как отдельную категорию. Одной из причин такого подхода может быть возможность автоматического извлечения признаков в методах глубокого обучения, в то время как в традиционных методах ML, перед выполнением любой задачи необходимо сначала построить и рассчитать признаки вручную. На рисунке 3 приведена различная классификация задач ML, определяемая как группа методов и алгоритмов, не относящихся к ANN и DL, которые используют в процессе обучения признаки, созданные вручную, и, в отличие от алгоритмов ANN/DL, не способны к автоматическому обучению признаков. Следует также отметить, что, согласно [13], из-за разнообразия исследований и публикаций, посвященных ML в различных областях, отраслях и приложениях, возникло множество методов классификации алгоритмов ML, что привело к отсутствию консенсуса. Эта проблема решается разработкой и внедрением нормативов, устанавливающих терминологию.

Сбор и предварительная обработка данных – самая важная часть ML-моделирования. Формат доступных данных оказывает огромное влияние на выбор подхода ML. Таким образом, создание правильного набора данных (Dataset) играет существенную роль при разработке и внедрении решений на основе ИИ.

Процесс DED с точки зрения сбора данных можно разделить на три фазы: входную, технологическую и выходную. Данные могут быть собраны с каждой из фаз в соответствии с требованиями, приведенными на рисунке 2. Первые три ячейки представляют фазы процесса DED. Стрелки начала и конца указывают на начало и конец каждой фазы. В последней рамке представлены данные, собранные на каждой из фаз. Жирным шрифтом выделена процедура сбора данных.



Рисунок 2 – Связь процесс-структура-свойства с процедурой сбора данных для ПЛВ

При этом на диаграмме Исикавы, приведенной на рисунке 3, данные могут быть помечены следующими образом: в виде изображений, сигналов или визуальных графиков для подачи в контролируемы ML-модели или для кластеризации на основе сходства свойств. Определено, что независимо от типа источника энергии DED не существует заметного различия между входными и выходными данными.



Рисунок 3 – Данные процесса ПЛВ для ML

Данные, необходимые для алгоритмов ML на различных этапах процесса, имеют значительный вклад в обучение ИИ. Например, для определения пористости напечатанной детали, необходимо провести обнаружение аномалий в ванне расплава с помощью бесконтрольного обучения [6], а уже затем свойства расплава можно напрямую соотнести с конечными внутренними дефектами. Однако ванна расплава не является статичной, [5] и ее движение коррелирует с движением лазера, после чего происходит быстрая кристаллизация, поэтому и данные о ванне расплава собираются в виде тепловых изображений. Эти изображения в реальном времени группируются на основе распределения температуры и морфологической информации, которую они предоставляют для обнаружения аномалий. При этом проводить классификацию этих изображений предлагается с помощью сверточной нейронной сети (Convolutional neural network, CNN) для определения класса параметров процесса.

Оценка алгоритма ML – один из важнейших этапов построения эффективной модели ML. Для этой цели в литературе предлагается множество метрик оценки производительности, которые могут помочь количественно оценить эффективность разработанной модели или сравнить различные модели между собой. Выбор метрики зависит от характеристик рассматриваемой проблемы и задачи реализуемого ML.

#### Концепция решения задачи применения ИИ в предиктивной аналитике DED

В этом разделе отражена концепция решения задачи применения ИИ в предиктивной аналитике DED в части преобразования ключевых идей в практические рекомендации.

Первый шаг – определение проблемы в изучаемой области. При формулировании проблемы уровень абстракции, на котором она определяется, должен соответствовать предполагаемой процедуре решения проблемы. Следующие шаги зависят от того, насколько хорошо мы определили проблему и вариант использования. Полная формулировка проблемы приведет к лучшему проектному решению в области модификации экспериментальной установки ПЛВ к взаимодействию с устройствами контроля и потенциальными задачами ML, необходимым для решения проблемы АП. Выделено четыре основных класса проблем в области DED АМ. В каждом классе существует несколько различных подзадач, которые также могут повлиять на процесс изготовления изделий по технологии ПЛВ, как показано в таблице 1.

Таблица 1 – Проблемные области процессов АП

Проблемная область	Применение
Прогнозирование свойств и качества	Распределение температуры, температура ванны расплава, размер ванны расплава, плотность, высота конструкции, шероховатость поверхности, структура зерна, онлайн-оценка глубины ванны расплава температурная модель, не зависящая от геометрии, прочность на растяжение, твердость, усталостная прочность, геометрия детали и термические деформации, угол наклона границы зерна

Проблемная область	Применение
Классификация свойств и качества	Мониторинг качества на основе визуального контроля качества проплавления, мониторинг нанесения порошка
Обнаружение дефектов	Онлайн-обнаружение и количественная оценка пористости, поверхностные аномалии, онлайн-мониторинг ванны расплава
Оптимизация и мониторинг процессов	Оптимизация процесса за счет качественной геометрии детали, мониторинг процесса на основе различных условий процесса, важность параметров процесса

После формулировки проблематики, следующим шагом будет модернизация экспериментальной установки для ее решения, с потребностью установки внешних датчиков для сбора данных о работе установки в режиме реального времени. Для оценки ML-модели необходимо учитывать конструктив деталей и их печать с различными параметрами. Планирование матрицы эксперимента позволит минимизировать количество образцов для печати. Использование математического моделирования для имитации процессов изготовления деталей, позволит сократить срок подготовки изделия к изготовлению, а также позволит сравнить результаты моделирования с моделями ML. Далее по тексту отражен перечень возможных к использованию средств контроля процессов при модернизации установки ПЛВ: пирометр, инфракрасная камера, лазерный линейный сканер, Датчик акустической эмиссии CMOS-камера, данные облака точек обработка (Point cloud data processing, SOMS) плазменно-эмиссионная спектроскопия (ПЭС), энергодисперсионная спектроскопия (ЭДС). На этом этапе осуществляется сбор данных, при этом качество выходных данных является прямым результатом того, насколько хорошо проведена модернизация экспериментальной установки ПЛВ.

Формулировка решения – сложная многоитерационная задача, при этом этапы могут выполняться в разном порядке, а некоторые – многократно, т.е. итеративно.

Первым шагом в формулировке решения является формулировка и выбор последовательности задач. Это могут быть как задачи ML, так и задачи другого рода, а порядок задач может варьироваться от решения к решению. Каждая задача выполняет определенную часть решения и генерирует выход для окончательного понимания. Например, авторы работы [10] использовали алгоритм пространственной кластеризации приложений с шумом на основе плотности перед классификатором ANN для устранения шумовых точек данных, создаваемых искрами и порошками, остающимися на осажденной поверхности DED. Это позволяет повысить производительность классификатора.

Предварительная обработка – еще один очень важный и, как правило, трудоемкий этап в каждом ML-проекте, который может существенно повлиять на результат предсказания в предиктивной аналитике. Данные, полученные на предыдущих этапах, могут содержать пропуски, недостающие значения, избыточные значения, разную длину и разные масштабы. Задачу предварительной обработки также можно рассматривать как шаг по очистке данных, и на выходе мы получаем набор данных более высокого качества, который может быть подан непосредственно в алгоритм ML или пройти через этап разработки признаков.

Например, авторы работы [11] использовали 3D-график необработанных эмиссионных спектров сигналов, собранных в процессе печати образца методами АП, в качестве инструмента визуализации, чтобы найти спектр с эмиссионными линиями, который содержит больше информации. Затем они обрезали длину волны из 2048 спектральных переменных во всем диапазоне длин волн и нормализовали переменные, прежде чем использовать их для классификации.

Вместо того чтобы подавать алгоритму необработанные данные, в качестве альтернативы можно применить методы инженерии признаков, чтобы усилить дискриминационные признаки и потенциально повысить качество решения. Основная идея заключается в том, чтобы достичь нового представления данных таким образом, чтобы признаки в новом представлении были достаточно дискриминативными, чтобы прогностическая задача (например, классификация или регрессия) могла решаться с помощью простого алгоритма и низких вычислительных затрат. Инженеринг признаков можно разделить на извлечение признаков, преобразование признаков и выбор признаков. Например, авторы работы [33] использовали алгоритмы CNN для извлечения скрытых признаков из статической информации ключевых параметров процесса DED, включая мощность лазера, скорость подачи порошка, скорость сканирования АМ, индекс слоя осаждения и индекс изображения. А авторы в работе [9] использовался пакет «tsfresh» Python для извлечения нескольких характеристик из временных рядов измерений DED.

Следующий шаг – выбор алгоритма ML для выполнения задачи и получения желаемых результатов. Здесь сначала нужно выбрать подход к ML (т.е. контролируемое обучение, полуавтоматическое обучение и неконтролируемое обучение). Выбор подхода зависит от того, является ли набор данных маркированным или нет, и есть ли у нас доступ к знаниям о домене, чтобы маркировать данные. Также необходимо учесть вероятность применения DL для поиска решения.

Заключительным этапом является оценка эффективности решения. Это зависит от конкретного подхода к ML и поставленной задачи. Для подходов с контролируемым обучением цель состоит в том, чтобы сравнить результат работы алгоритма прогнозирования с базовой истиной (т.е. метками). Для подходов, основанных на обучении без надзора, тема Метрики оценки не получили значительного внимания или обсуждения в изученной литературе, поэтому мы посчитали, что эта тема не входит в рамки данного обзора. Однако этот вопрос может быть рассмотрен в рамках будущих исследований.

### **Заключение**

В статье представлен обзор применения ML предиктивной аналитике процесса DED. Анализ литературных данных, областей применения позволяет определить взаимосвязь проблемной области, основанной на различных приложениях, предоставлении компактного списка установленных внешних датчиков или оборудования, составлении таблицы необходимых типов данных для конкретных подходов ML, используемых в работах, с формулировкой концепции будущей работы. В данном обзоре применение ML в DED было разделено на методы обучения и подходы ML. Для каждой конкретной задачи, найденной в проблемной области, обсуждаются популярные алгоритмы ML, использованные в

работах, и на основе оценки делаются выводы о рекомендациях для будущей работы. Данная статья призвана помочь исследователям структурировать сложную систему «процесс-структура-свойство» (PSP) DED для включения ML.

Обнаружено, что в большинстве случаев используются методы контролируемого обучения ИИ исходя из факторов эргономики контролируемого обучения к пользователю, а также более высокая точность с точки зрения достоверности благодаря участию человека и использованию истории сделали его лучшим выбором для подходов DED ML [8,14]. Однако, учитывая сложную структуру производственных данных, маркировка остается сложной задачей, а недостаточный объем данных порой сдерживает процесс обучения, необходимый для контролируемого обучения. Поэтому методы неконтролируемого обучения ИИ и активные методы обучения имеют потенциал для преодоления этих проблем применительно к DED.

#### *Литература*

1. Campbell T. Could 3D printing change the world? // Technologies, potential, and implications of additive manufacturing. 2011. № 1.
2. Ngo T.D., Kashani A., Imbalzano G., Nguyen K. T., Hui, D. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges // Composites Part B: Engineering. 2018. № 143.
3. ASTM International. (2012). ASTM committee F42 on additive manufacturing technologies.
4. Liu Z., Jiang Q., Li T., Dong S., Yan S., Zhang H., Xu B. Environmental benefits of remanufacturing: A case study of cylinder heads remanufactured through laser cladding // Journal of Cleaner Production. 2016. № 133.
5. Ahn D.G. Directed energy deposition (DED) process: state of the art // International Journal of Precision Engineering and Manufacturing – Green Technology. 2021. № 8(2).
6. Khanzadeh M., Chowdhury S., Tschoop M.A., Doude H.R., Marufuzzaman M., Bian L. Directed energy deposition (DED) process: state of the art // IISE Transactions. 2019. № 51(5).
7. Thompson S.M., Bian L., Shamsaei N., Yadollahi A. An overview of Direct Laser Deposition for additive manufacturing; Part I: Transport phenomena, modeling and diagnostics // Additive Manufacturing. 2015. № 8.
8. Farahani M.A., McCormick M.R., Giaminy R., Hudacheck F., Harik R., Liu Z., Wuest T. Time-Series Pattern Recognition in Smart Manufacturing Systems: A Literature Review and Ontology // Journal of manufacturing systems. 2022.
9. Marko A., Bähring S., Raute J., Biegler M., Rethmeier, M. Quality Prediction in Directed Energy Deposition Using Artificial Neural Networks Based on Process Signals // Applied Sciences. 2022. № 12(8).
10. Jeon I., Yang L., Ryu K., Sohn H. Online melt pool depth estimation during directed energy deposition using coaxial infrared camera, laser line scanner, and artificial neural network // Additive Manufacturing. 2021. № 47.
11. Ren W., Wen G., Zhang Z., Mazumder J. Quality monitoring in additive manufacturing using emission spectroscopy and unsupervised deep learning // Materials and Manufacturing Processes. 2022. № 37(11).

12. Era I.Z., Liu Z. Effect of process parameters on tensile properties of SS 316 prepared by directional energy deposition // Procedia CIRP. 2021. № 103.
13. Wuest T., Weimer D., Irgens C., Thoben K.D. Machine learning in manufacturing: advantages, challenges, and applications // Production & Manufacturing Research. 2016. № 4(1).
14. Lu S.C. Machine learning approaches to knowledge synthesis and integration tasks for advanced engineering automation // Computers in Industry. 1990. № 15.

УДК 621

## Электроэррозионная обработка при 3D печати

**Анна Владимировна Ащеурова**, преподаватель,  
**Сергей Евгеньевич Сабо**, кандидат технических наук, доцент,  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза,  
летчика-космонавта А.А. Леонова», г. Королев, Московская область,  
**Никита Александрович Кузнецов**, рабочий по комплексному  
обслуживанию оборудования,  
**Артем Дмитриевич Тимошенко**, рабочий по комплексному  
обслуживанию оборудования,  
ОАО «Композит», г. Королев, Московская область

*В статье приведены результаты анализа процесса аддитивного производства, рассмотрена актуальность SLS метода, выявлены ключевые проблемы связанные с SLS методом производства и установлено решение данных проблем. Проведены исследования качества, пористости структуры и шероховатости поверхностей деталей, изготовленных методом селективного лазерного спекания. Рассмотрен метод устранения нужды в постобработке образцов, изготовленных методом SLS. Проведен анализ образцов по физико-химическим процессам, возникающими в результате сплавления порошкового материала и влиянии термообработки.*

Селективное лазерное сплавление, технологическая наследственность, сплав, шероховатость поверхности.

## Electroerosion treatment in 3D printing

**Anna Vladimirovna Ashcheulova**, lecturer,  
**Sergey Evgenievich Sabo**, Associate professor,  
Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education  
«Technological University named after twice Hero of the Soviet Union,  
pilot-cosmonaut A.A. Leonov», Korolev, Moscow region,  
**Nikita Alexandrovich Kuznetsov**, Complex equipment maintenance worker,  
**Artyom Dmitrievich Timoshenko**, Complex equipment maintenance worker,  
JSC «Composite», Korolev, Moscow region

*The article presents the results of an analysis of the additive manufacturing process, discusses the relevance of the SLS method, identifies key issues related to the SLS production method, and establishes solutions to these problems. Research on the quality, porosity of the structure, and surface roughness of parts manufactured using selective laser sintering (SLS) is conducted. A method for eliminating the need for post-processing of samples produced by the SLS method is examined. An analysis of samples is carried out regarding the physic-chemical processes arising from the melting of*

*powdered material and the influence of heat treatment.*

Selective laser sintering, technological inheritance, alloy, surface roughness.

Аддитивное производство считают одним из главных открытий конца двадцатого века. В отличии от классических технологий получение изделий, они основаны не на удалении части материала при обработке заготовки, а на прибавлении к подложке, или основе дополнительных элементов в соответствии с имеющейся компьютерной моделью. Изделия созданные благодаря послойным добавлением или наложением материала вошли в двадцать первом веке во все сферы жизнедеятельности человека. Основными методами производства изделий методами аддитивных технологий являются: послойная заливка экструдируемым составом, избирательное лазерное сплавление (SLS), лазерная стереолитография, лазерная наплавка. Селективное сплавление получило наибольшее распространение за счет универсальности, способности воспроизводить сложные по конфигурации изделия и универсальности.

Привлекательной альтернативной технологией для создания изделий сложной формы, выполняемой на 3D принтере является инновационный метод лазерного спекания посредством электроэррозионной обработки с внедренной в принтер системой фиксации деталей посредством замораживания жидкостей. В SLS методе печати устойчивость и качество поверхностей детали становятся ограничивающими факторами достижения максимальной результативности в печати. Замораживание же порошка слоями, увеличивает стабильность и точность построения. Чем больше устойчивость – тем более предсказуемым становится результат. Также, для более детальной обработки труднодоступных или сложных поверхностей детали, где традиционные методы спекания могут столкнуться с ограничениями, было решено использовать электроэррозионный метод спекания, позволяющей к тому же снизить требования к материалам порошка и улучшить качество готового изделия. Температура при обработке электроэррозионным методом начинается от 4 тысяч градусов.

3D-устройства, работающие по SLS-технологии, обладают гибкими настройками, что позволяет добиться необходимых параметров материала трехмерной модели. Производители оборудования, основываясь на опыте эксплуатации своих установок предлагают заводские настройки параметров рабочего процесса, такие как время воздействия, температура, и толщина спекаемого слоя.

Более подробно о каждом из параметров:

Глубина воздействия (Depth of Fusion) – глубина, на которую лазерный пучок проникает в слой порошка. Увеличение глубины может улучшить адгезию между слоями, но слишком глубокое воздействие может привести к избыточному плавлению и потере детализации, менее точной печати.

Время воздействия (Exposure Time) – время, в течение которого лазер воздействует на каждый слой порошка. Увеличение времени может улучшить прочность, однако слишком долгое воздействие может привести к избыточному нагреву и деформации.

Температура печати (Build Chamber Temperature) – температура внутри камеры печати, воздействующая на весь процесс. Влияет на тепловое расширение

ние материала и качество конечной модели. Высокая температура может способствовать более полному сплавлению порошка, но требует аккуратного управления избыточным теплом для предотвращения деформации.

Кроме того, может быть, выбрана как работа лазерного спекания с переходными границами, так и по всей глубине изготавливаемой модели. Процесс SLS-печати выглядит следующим образом:

Ожидается, что детали, производимые SLS, будут иметь высокое качество поверхности из-за точной природы лазера, что приводит к его широкому использованию для удовлетворения функциональных потребностей. С другой стороны, компоненты, произведенные с помощью SLS, обычно имеют большую шероховатость поверхности, чем другие методы полимерного АМ. Шероховатость поверхности влияет на некоторые функциональные свойства, включая фрикционные свойства, теплопередачу и усталостную прочность полимеров, а также возможность рассыпания порошка, например, в качестве медицинского имплантата в организме человека. Вовремя SLS рабочая платформа равномерно нагревается до температуры, точно ниже точки плавления материала; это очень эффективный метод повышения скорости сборки. Однако это может привести к нежелательному «слеживанию» порошка на внешней поверхности детали. Лампа предварительного нагрева для поддержания температуры ниже температуры плавления снижает термические напряжения, приводящие к деформации детали, усадке и снижению точности размеров на поверхности. Из-за захваченного воздуха внутри упакованного порошка может образоваться множество зернистых элементов, пустот и пор. Таким образом, пористость является присущим дефектом SLS-объектов, который может появиться на поверхности.

2D-изображение лазерного сканирования детали из РА6, демонстрирующее типичную текстуру поверхности образцов твердых деталей, напечатанных с помощью системы EOS P500 FDR.

SLS обычно печатает детали размером 0,1-0,5 мм, что делает их отличным выбором для печати сложных решетчатых конструкций с тонкими стенками и балками. Хотя детали SLS не нуждаются в поддержке из-за слоя порошка, температурные градиенты во время печати могут деформировать деталь и создать проблемы с очень тонкой поверхностью. Кроме того, из-за более толстых слоев (90-150 мкм) в SLS этот метод более чувствителен к ступенчатому эффекту. Этот эффект в объекте SLS наиболее распространен на полугоризонтальных поверхностях. В аналогичном методе SLM, поскольку зона расплава обычно более обширна, чем лазерное пятно, контурные дорожки сканирования естественным образом смещаются внутрь, чтобы учесть эту проблему и, следовательно, сделать поверхность более шероховатой. В таких случаях PPFT обычно улучшают качество больших поверхностей, но для более сложных и мелких деталей это будет более требовательно.

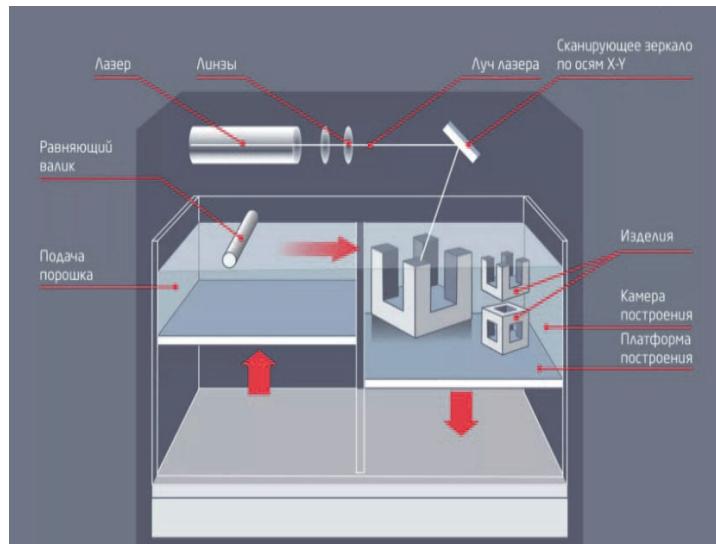


Рисунок 1 – Схема работы SLС-принтера

Изготовленные на SLС-принтере (рис. 1) трехмерные модели обладают практически изотропными механическими свойствами. Готовые изделия отличаются повышенной упругостью и прочностью на растяжение.

Существует прямая корреляция между величиной пористости детали и свойствами материала, такими как форма и распределение порошка по размерам, а также условиями обработки детали. По сравнению с полукристаллическими термопластами аморфные термопласти позволяют получить более пористые детали, что может быть как преимуществом, так и недостатком в зависимости от желаемых свойств детали. Основными проблемами спекания являются пористость и усадка деталей. Однако их можно преодолеть за счет оптимальной плотности упаковки (по пористости) и тщательного выбора параметров спекания.

Низкая пористость требуется, если важны внешний вид и механические свойства. Распределение по размерам, уменьшенная пористость и улучшенное качество поверхности влияют на сыпучесть порошка и плотность упаковки. Использование инфракрасных ламп или окружающего отопления помогает предотвратить неравномерную усадку, поддерживая температуру полимера выше температуры стеклования, что позволяет контролировать процесс усадки. Это требует медленного охлаждения после завершения сборки и должно учитываться при расчете времени обработки каждой детали. С другой стороны, полукристаллические термопласти уменьшаются в объеме при охлаждении из-за кристаллизации, что делает аморфные термопласти лучшим выбором.

Плохое качество поверхности – частая жалоба при работе с порошкообразным сырьем. Обычный диапазон шероховатости (обозначаемый Ra) PBF составляет 5-25 мкм. Помимо параметров печати, на качество поверхности может влиять сама 3DP-машина. В зависимости от машины SLС Ra может варьироваться от 10 до 20 мкм с расстоянием между пиком и впадиной до 0,2 мм. Механические свойства, особенно усталость, могут зависеть от различной шероховатости поверхности.

Процедура на основе порошка АМ включает в себя полурасплавленные зерна, прилипающие к внешней поверхности, с редкими острыми канавками между ними, склонными к образованию трещин (рис. 2) изображает три состояния, влияющие на качество поверхности PBF.

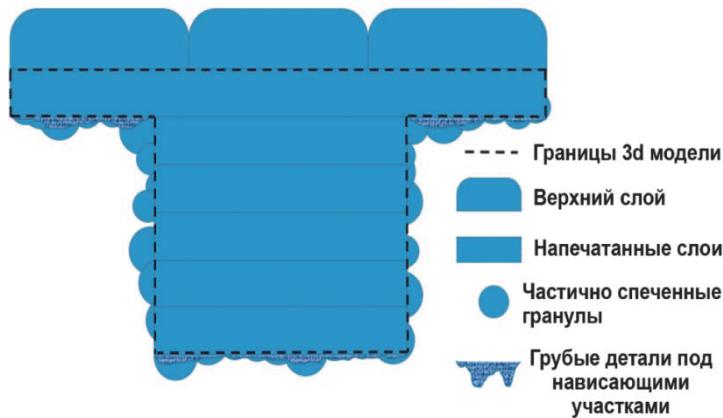


Рисунок 2 – Состояния слоёв печати

Типичные конфигурации поверхности PBF, влияющие на качество поверхности

Неполный состав порошковых материалов может привести к появлению на поверхности «апельсиновой корки». Неправильное повторное использование порошка или неоднородное смешивание являются основной причиной проблем с поверхностью в технике SLM.

#### Параметры процесса

На производительность систем SLM влияет несколько факторов. Точность и разрешение ограничены сочетанием размера частиц порошка, толщины слоя и диаметра лазерного пятна. Селективное плавление порошка осуществляется с помощью двух основных дорожек, включая контурную и штриховку. При контурном отслеживании расплавляется внешний слой требуемого профиля, а штриховая дорожка используется для плавления внутренней области, ограниченной контурной дорожкой.

Значения шероховатости поверхности, напечатанные SLS, значительно различаются в зависимости от метода подготовки, используемого оборудования и положения поверхности образца относительно накопления слоя [3]. Параметры процесса SLS (рис. 3) широко исследовались в инженерных областях. Их можно разделить на три основные категории: лазерные, материальные и камерные. Средний размер порошка, толщина слоя и ориентация поверхности влияют на шероховатость поверхности. Важна также физика плавления и затвердевания. На него влияют скорость сканирования, мощность лазера, расстояние между

штрихами (расстояние) или расстояние между лазерными сканированиями, вязкость материала, поверхностное натяжение и температурные граничные условия, такие как температура слоя. Исследования показали, что материалы, которые разлагались в течение достаточного времени, отрицательно влияют на качество поверхности и увеличивают вязкость расплавленного порошка. Несколько факторов определяют точность детали и минимальный размер элемента, включая размеры порошка, размеры лазерного пятна, ориентацию элемента, соотношение сторон, возможность контролировать расплавленную область и результирующую затвердевшую геометрию сканируемых областей. Тонкий слой нерасплавленного порошка прилипает к поверхности детали из-за рассеивания тепла в окружающий порошок, который необходимо устранить во время постобработки для достижения наилучшего качества поверхности. В целом, основные факторы SLS-печати, влияющие на шероховатость поверхности, можно разделить на дизайн, лазер, материал и камеру печати.

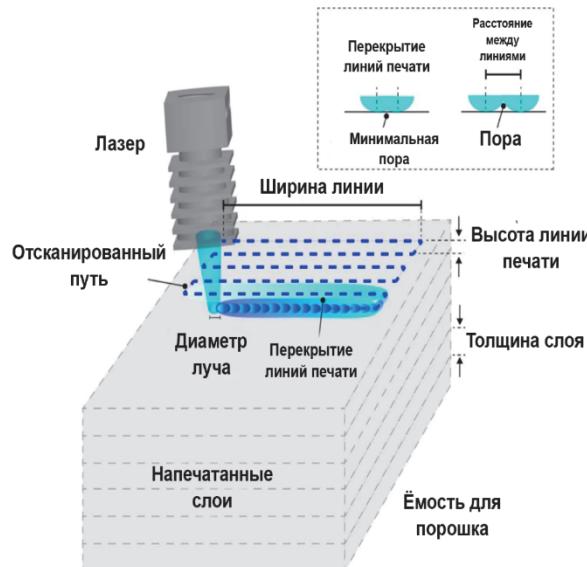


Рисунок 3 – Схема процесса 3D-печати SLS

Распределение частиц по размерам и форма частиц могут влиять на качество и прочность изготавливаемых объектов. Эти процедуры продолжаются до тех пор, пока деталь не будет изготовлена полностью. Процессы SLS сталкиваются со многими трудностями из-за сложности тепловых взаимодействий, что требует технологического проектирования и планирования процессов. Относительные напряжения, формирование микроструктуры и качество поверхности представляют собой некоторые трудности, приводящие к деформации или разрушению детали [10]. Чтобы избежать термической деформации, деталь остается в слое порошка на протяжении всей фазы медленного охлаждения [10].

### Дизайн

Положение и ориентация камеры SLS имеют решающее значение при использовании 3D-нестининга на этапе проектирования. В результате более низкой

температуры платформы нижняя часть строительного объема не такая теплая, как верхняя. Из-за высокой температуры в верхней половине объема сборки эта область с большей вероятностью будет подвержена налипанию порошка. Моделирование процесса спекания порошков может помочь спрогнозировать важные аспекты, которые необходимо учитывать на ранней стадии проектирования.

Было обнаружено, что размер геометрических элементов является важным фактором, определяющим объем частично спеченных порошков, прилипающих к поверхности детали из-за интенсивного нагрева, что серьезно влияет на точность изготовления. Критерии проектирования SLS должны учитывать массивные горячие массы – хорошо известное явление. Как правило, при проектировании деталей SLS следует учитывать приблизительную точность детали  $\pm 200$  мкм для малых размеров и  $\pm 0,1\text{-}1\%$  для больших размеров, а также минимальный размер элемента 0,5-1 мм. SLS демонстрирует чувствительность к размеру объекта, где имеется отчетливая область разделения, с использованием конструкции на основе градиентной решетки.

Поперечное сечение деталей SLS показывает, как локальные и глобальные особенности конструкции влияют на качество детали. Микромасштабная часть содержит частицы порошка плавленого полимера диаметром от 10 до 100 мкм. Лазер нагревает частицы, сплавляя их вместе перед затвердеванием. Однако неполное сплавление может привести к образованию пор внутри детали, что приведет к снижению прочности, долговечности и неоднородности поверхности.

Детали SLS имеют грубую текстуру поверхности на мезомасштабе из-за полидисперсности размеров частиц и адгезии нерасплавленного порошка, основанной на диффузии тепла в окружающий порошок. Невертикальные элементы ступенчато зависят от толщины и ориентации слоя.

Размер лазерного пятна и рассеивание тепла в порошке ограничивают минимальный размер элемента на этапе проектирования. С SLS возможны произвольная геометрия, внутренние полости (с отверстиями для сыпучих порошков) и тонкие решетчатые структуры. Также можно разработать «живые» петли, защелки и взаимосвязанные детали. Затем внутренние элементы должны быть сконструированы так, чтобы сыпучий порошок мог эвакуироваться при формировании детали.

Поскольку не требуется никаких опорных конструкций, а коробление при охлаждении минимально, неподдерживаемые стены и горизонтальные мосты более гибкие, чем система MEX. Тем не менее, при проектировании и определении допусков необходимо учитывать температурные градиенты во время усадки при печати. В противном случае очень тонкие детали могут деформироваться из-за колебаний температуры в среде печати. SLS не может достичь такого же качества поверхности, как другие полимеры AM, такие как фотополимеризация (SLA). В общем, процессы PBF AM, включая SLS, нарезают в направлении Z с постоянной или адаптивной толщиной слоя, тогда как метод нарезки в AM на основе нитей является строго ограничивающим фактором из-за более низкой точности размеров из-за ступенчатого эффекта, требуемого опорные конструкции для выступов, и плохая производительность из-за анизотропной конструкции, вызванной методом нарезки.

## Материалы

SLS универсален, поскольку может обрабатывать многие типы полимеров, доступных в форме порошка, как термопластичных, так и термореактивных. Порошок имеет жизненно важное значение для плотности упаковки, на которую влияют другие параметры, включая гранулометрический состав, форму частиц и систему распределения. Бимодальное распределение порошка может улучшить плотность упаковки, которая определяется другими параметрами, такими как форма частиц, ширина размера, показатель распределения и режим упаковки. Форма частиц может влиять на распределение порошка по размерам, поскольку более мелкий порошок может способствовать достижению более высокой плотности упаковки и улучшать текучесть и растекаемость. Система распределения также отвечает за оптимизацию плотности упаковки. Неправильный метод нанесения порошка на стол может привести к дефектам в процессе упаковки и повлечь за собой появление артефактов или дыр в спеченной детали. Наиболее распространенными материалами, используемыми в SLS, являются полукристаллические полимеры PA12 и PA11 из-за их четко определенной температуры плавления и термического гистерезиса при замерзании. По сравнению с аморфными термопластами эти полимеры обеспечивают более благоприятные условия обработки и улучшенную переработку порошка. В Таблице 1 перечислены распространенные полимеры, используемые в SLS, и их применение.

**Таблица 1 – Полимерные порошки SLS AM, классифицированные по структуре и характеристикам**

Класс приложения	Состав	
	Аморфный	Полукристаллический
Высоко эффективные полимеры	–	ПЕК, ПИК, ПЕКК
Инженерные полимеры	ПК *	PA6, PA11, PA12, TPE, POM * , PCL * UHMWPE * , PLA *
Товарные полимеры	ПС, САН * ПММА	ПП, ПНД

SLS позволяет изготавливать сложные внутренние полости с трехмерной решетчатой структурой, но при этом должны быть предусмотрены функции слива нерасплавленного порошка. Параметры порошка, такие как диаметр, морфология, распределение по размерам, точка кристалличности, текучесть и температура плавления, также существенно влияют на метод SLS и качество детали. В результате растет спрос на порошки, способные выполнять SLS.

Порошки были описаны как параметры предварительной обработки, но их также можно включить в качестве параметров печати. Поскольку лазеры и порошок связаны, то, прежде чем взять в руки лазер, необходимо изучить и определить мощность исходя из порошка, который будет плавиться.

Полимеры необходимо рассматривать с точки зрения их нагревательных

свойств, чтобы они были пригодны для SLS. Кроме того, оптические характеристики порошков определяют длину волны света, поглощаемую материалами. Полукристаллические полимеры являются предпочтительными из-за их технологичности (например, PA12). Для этих полимеров существует четкий температурный диапазон: от температуры стеклования до температуры плавления, с окном гистерезиса между плавлением и рекристаллизацией. Тип порошка, включая переработанный и первичный, может повлиять на качество поверхности. Как правило, переработанные порошки повышают нестабильность свойств сырья, что приводит к более высокой шероховатости поверхности. Высокая текучесть является важнейшим свойством материалов, используемых в технологии SLS. Порошки должны обладать высокой текучестью, чтобы свести к минимуму сильно зазубренные и микроскопические частицы с сильными силами между частицами, которые приводят к агломерации и проблемам с поверхностью. Сообщается, что 45 и 90 мкм являются наиболее подходящим диапазоном размера порошка для SLS 3DP.

В процессах PBF рассыпчатый порошок обычно удаляется вручную. Однако его можно более агрессивно удалить с помощью ударно-волновой очистки или струйной обработки сухим льдом, что значительно изменяет шероховатость поверхности. Низкотемпературная термообработка будет полезна для улучшения качества поверхности. Это позволит снять напряжение, возникающее во время лазерного спекания, и улучшить механические свойства.

Модификация поверхности порошков может увеличить поглощение лазерного света, текучесть и растекаемость. Улучшение исходного сырья, может быть, использовано для исследования различных порошковых смесей с различными или мультимодальными распределениями частиц по размерам (PSD) и создания моделей на основе частиц для прогнозирования параметров осаждения (например, скорости распределения) и упаковки порошкового слоя (например, межчастичного взаимодействия, трение). Термическая история полимеров также важна, поскольку молекулярная масса полимера может меняться во время тепловых циклов, влияя на его поведение при плавлении и затвердевании. Условия труда существенно влияют на этот порошок, и спеченный осадок не может быть переработан рядом с деталью. Свежий порошок необходимо смешать с оставшимся порошком от предыдущей процедуры 3D-печати, чтобы точно соответствовать спецификациям [3].

Эта технология работает с большей толщиной слоя (90-150 мкм), что делает ее более восприимчивой к ступенчатому эффекту. Из-за спеченных зерен на поверхности очистка затруднена [3].

Системы с порошковым слоем подвергаются воздействию силы трения со слоем и силы между частицами, которая ограничивает их движение. По этой причине в порошок можно добавлять химические добавки, чтобы обеспечить более высокую растекаемость. Лазерный луч меняется по всей рабочей пластины. Угол падения может существенно повлиять на результат детали. Поэтому в настоящее время доступны новые машины с двумя лазерными лучами. Однако наличие двух разных источников питания приводит к несколько разному процессу спекания. Более того, на участках сцены, где два лазера работают почти одновременно, появляются точки или линии плохого спекания или его отсутст-

вия.

### Лазер

Механическая прочность и плотность объектов SLS сильно зависят от плотности энергии лазерного луча. Поскольку лазер растеризует слой порошка, стратегия и направление его движения имеют важное значение. Как правило, более высокая плотность энергии лазерного луча приводит к более высокой плотности и большей механической прочности конечной детали до определенного момента. Если частицы порошка переплавятся за пределы этого порога, свойства детали могут начать ухудшаться. Наиболее часто используемые принтеры SLS используют диодные лазеры. Мощность лазера ( $P$ ), скорость лазерного сканирования ( $v$ ), диаметр фокуса и расстояние штриховки (расстояние линии сканирования) влияют на плотность энергии ( $ED$ ). Расстояние штриховки включает в себя два параметра: толщину слоя ( $t$ ) и пространство сканирования ( $s$ ). В зависимости от мощности лазера ( $P$ ) и движения луча по материалу слой порошка получает необходимое тепло для плавления. Соответственно,  $ED$  – это входная энергия лазерного луча на единицу площади ( $\text{Дж}/\text{мм}^2$ ), и ее можно рассчитать по формуле:

$$ED = \frac{P}{v * t * s}$$

В этом уравнении, если расстояние штриховки (в  $\text{мм}$ ) больше эффективного диаметра лазера (в  $\text{мм}$ ), будет учитываться эффективный размер лазерного пятна.

Для спекания требуется определенная мощность лазера из-за взаимодействия лазера с порошком, которая зависит от материала и толщины слоя. Поскольку диаметр лазерного луча и состав материала влияют на поглощение, они могут повышать или понижать температуру спекания/плавления. Это влияет на длину волны лазера, необходимую для спекания. Кроме того, длительность импульса (для импульсных лазеров), геометрия и частота могут влиять на качество поверхности.

Более короткая длительность импульса может привести к более точному плавлению и меньшему выделению тепла, что приводит к получению более гладких поверхностей с меньшей пористостью. Обычно между лазером и границей проекта существует смещение из-за светового пятна, которое необходимо учитывать. В процессе спекания лазер малой мощности используется для размазывания частиц, которые могут остаться прикрепленными по контуру.

Точность размеров печатной продукции обеспечивает превосходную точность процесса SLS. Усадка является одним из важнейших факторов, влияющих на точность, и ее величина во многом зависит от материалов и источников лазера. Мощность лазера и длина сканирования оказывают существенное влияние на сжатие в направлении  $X$ , тогда как скорость луча и мощность лазера оказывают существенное влияние на сжатие в направлении  $Y$ . Напротив, температура слоя, скорость луча и расстояние между луками значительно влияют на усадку в направлении  $Z$ .

### Камера

Типичная массовая система SLS имеет средние размеры  $340 \times 340 \times 600$  (мм). Если изделие превышает объем сборочной платформы, его необходимо

разделить на несколько частей, спроектировав плоскости разделения и продумав последующие процедуры сборки, влияющие на качество поверхности. Размер детали ограничен в верхней части, ограничен объемом печати принтера и способностью оптической системы сканировать всю область. Этот объем обычно колеблется от 10 до 1000 л (0,01-1 м<sup>3</sup>). Однако в некоторых конструкциях можно достичь и меньшего размера – 0,005 м<sup>3</sup>. Благодаря минимальным остаточным напряжениям весь объем сборки можно использовать, складывая детали друг на друга, без необходимости в опоре для соединения деталей со сборочной платформой. Размер мелких деталей ограничен минимальным размером элемента, соответствующей точностью и разрешением, а также сборкой компонентов. Частицы порошка и размер лазерного пятна ограничивают точность менее заметных деталей. Все эти переменные в сочетании с материалом порошка и термическими граничными условиями влияют на кинетику затвердевания и, следовательно, на точность размеров. Что касается глубины и длины, правило «больше – лучше» применяется к размеру детали для получения желаемого объекта, тогда как шероховатость и геометрическая точность определяются по правилу «номинально – лучше».

На процесс SLS влияют несколько параметров камеры сборки, такие как толщина слоя, скорость роликов, скорость нагрева и охлаждения, размер сборки, а также температура слоя порошка и подачи. Необходимо учитывать несколько градиентов температуры в рабочей камере.

Помимо оси Z, где температура детали в верхних слоях снижается при движении сцены вниз, платформа имеет некоторое повышение температуры по диагоналям, а центр, может быть, вызван наличием нагревателей или механических компонентов под ней. Форма лезвия, используемого для нанесения порошка, также влияет на качество поверхности. Продемонстрировано, что форма плоского дна более выгодна, чем острые или слегка закругленные края. Благодаря большей горизонтальной зоне контакта между слоем порошка и лезвием порошковый материал сжимается равномерно, в результате чего образуется более плотный и однородный слой порошка.

### **Исследования и обсуждение шероховатости поверхности**

SLS позволяет производить компоненты высокого уровня сложности, практически без геометрических ограничений и без необходимости использования инструмента или пресс-формы. Полученные детали имеют повышенную шероховатость поверхности за счет оптимизации параметров обработки, ориентации сборки и характеристик порошка. Хотя шероховатость невозможно полностью устраниТЬ, несколько исследователей попытались уменьшить этот недостаток, изменив параметры процесса печати и работая на разных уровнях параметров.

Во многих случаях PPFT в первую очередь влияют на шероховатость поверхности, полученную с помощью SLS. Тем не менее, в нескольких исследованиях были предприняты попытки оптимизировать параметры процесса. Измерение CLSM дает диапазоны шероховатости Ra : ~ 24-31 мкм и R z : ~ 157-181 мкм, тогда как метод XMT дает Ra : ~ 22-27 мкм и R z : ~ 128-148 мкм для Порошок PA12. Большинство исследований было сосредоточено на PA12 в качестве исходного материала для определения оптимальных параметров обработки на

основе условий шероховатости. Однако по другим материалам было проведено ограниченное исследование.

Хотя детали SLS обычно имеют более высокую шероховатость поверхности ( $10 \text{ мкм} < Ra < 20 \text{ мкм}$ ) по сравнению с FFF ( $1 \text{ мкм} < Ra < 10 \text{ мкм}$ ), SLS предлагает множество преимуществ по сравнению с другими методами АМ на основе полимеров. Начнем с того, что во время процесса SLS не нужны никакие опорные конструкции или фундаменты, поскольку неиспользованные порошки поддерживают компоненты. Таким образом, шероховатости, вызванной удалением опоры, не возникает. Несмотря на то, что SLS использует неиспользованные порошки для поддержки печатаемых компонентов, этого обычно недостаточно для предотвращения всех типов деформаций. В результате для уменьшения остаточных напряжений и деформаций могут потребоваться такие этапы последующей обработки, как снятие напряжений и отжиг.

Добавки, такие как инициаторы, связующие и катализаторы, не требуются, а это означает, что компоненты с большей вероятностью будут использоваться в области медицины, поскольку добавки могут вызывать токсичность. Более того, хотя разрешение SLS не так превосходно, как у других методов АМ, таких как SLA, механические свойства компонентов SLS обычно превосходят, что делает поверхность этих компонентов более стабильной с течением времени. Проблема разрешения может быть решена путем улучшения лазерной системы. Теоретически технология SLS не ограничена материалом, и большинство порошков могут использоваться в SLS при условии, что длина волны и мощность лазера соответствуют требованиям к спекаемому материалу. Однако этот вид лазерной/точечной технологии (например, SLA или SLS) имеет общий недостаток – низкую скорость обработки из-за методологии «точка → линия → лицо (рез) → тело».

Для более полной и обстоятельной картины современного SLS принтера приведена Таблица 2, кратко указывающая все плюсы и минусы данного принтера, тем самым подводя итог его анализа.

**Таблица 2 – Плюсы и минусы 3D печати методом селективного лазерного спекания**

Плюсы	Минусы
Устройства, работающие по SLS-технологии, обеспечивают гибкие параметры материала для достижения необходимых характеристик трехмерных моделей.	Готовые детали могут иметь шероховатую поверхность, требующую дополнительной обработки.
Возможность выбора между работой лазерного спекания с переходными границами и по всей глубине изготавливаемой модели.	Большое потребление материала
Готовые модели обладают практически изотропными механическими свойствами, включая повышенную упругость и прочность на растяжение.	Промышленные системы SLS могут быть дорогостоящими в приобретении и обслуживании.
SLS не требует материала поддержки для сложных геометрических моделей, что	Процесс SLS может занимать до 12 часов из-за сложности спекания тон-

Плюсы	Минусы
облегчает процесс печати.	ких слоев порошка.
Разнообразие доступных материалов позволяет изготавливать модели различной сложности.	Возможные неоднородности в материале, влияющие на механические свойства детали.
Отсутствие поддержек уменьшает риск повреждения изделий, сокращая время сборки и затраты на материалы.	Требуется полировка и шлифовка готовых изделий после процесса.
Возможность печати крупногабаритных моделей или небольших партий деталей благодаря увеличенной вместимости камеры.	Необходимость соответствующих условий в помещении из-за возможного токсичного воздействия порошка.
SLS-принтеры обладают высокой коростью печати благодаря частичному расплавлению материала.	Сложность извлечения остаточных материалов

Изучив технологию SL-принтера, мы обнаружили проблему повышенной шероховатости и нестабильности процесса производства детали. Порошок спекается без жесткой формы, с неравномерной структурой, из-за чего при спекании стенки изделия получаются шероховатыми, и если снаружи мы можем механически обработать, то внутренняя структура остаётся без непосредственного доступа, что затрудняет как доработку, так и избавление от остаточного материала. Решение данной проблемы обнаружилось экспериментальным путем во внедрении некоторых дополнительных функций в принтер.

Это особенно важно при создании деталей с высокой точностью и сложной геометрией, где даже минимальные ошибки могут существенно повлиять на конечный продукт. Кроме того, замороженный порошок служит дополнительной поддержкой для строящегося объекта в процессе печати. Это позволяет избежать деформаций или обрушений деталей, что может возникнуть из-за отсутствия поддержки в критических моментах строения. После завершения печати замороженная жидкость легко удаляется, что упрощает последующие шаги постобработки и придает готовому объекту чистый и профессиональный внешний вид.

Электроэррозионный метод обработки материала дополнительно усиливает функциональность принтера, предоставляя возможность создания сложных форм и структур на поверхности объекта с высокой точностью и качеством. В Таблице 3 представлены преимущества и недостатки метода. Базируется обработка металлов электроискровым способом на основе электрического тока переносить вещество при пробое.

Таблица 3 – Преимущества и недостатки электроэррозионного метода

Преимущества электроэррозионного метода	Недостатки электроэррозионного метода
Высокая точность и детализация изделий благодаря малому размеру электродов и малой ширине рабочего канала.	Необходимость тщательного контроля и управления процессом для избежания дефектов и искажений.

Преимущества электроэррозионного метода	Недостатки электроэррозионного метода
Возможность создания деталей с сложной геометрией и мелкими деталями без необходимости в поддерживающих структурах.	Высокие затраты на оборудование и электроды, что делает процесс дорогим и недоступным для небольших производств.
Возможность создания изделий с высокой степенью точности и повторяемости, что особенно важно для производства прецизионных деталей.	Ограничения по масштабу и размерам изготавливаемых деталей из-за ограниченной рабочей зоны электроэррозионной машины.
Возможность обработки твердых и труднообрабатываемых материалов без значительной потери качества изделия.	Возможность возникновения тепловых деформаций и напряжений в изделиях из-за теплового воздействия процесса электроэррозии.
Малое воздействие на окружающую среду, так как процесс электроэррозии не требует применения химических реагентов или опасных отходов.	Необходимость специальных условий для работы с некоторыми материалами, такими как твердые сплавы или керамика, что может увеличить сложность и стоимость процесса.
Высокая точность и детализация изделий благодаря малому размеру электродов и малой ширине рабочего канала.	Необходимость тщательного контроля и управления процессом для избежания дефектов и искажений.

Тонкий слой порошкообразного рабочего материала, находящегося в соответствующей камере, переносится на рабочую платформу равномерным тонким слоем, на который воздействует лазерный луч – является сфокусированный источник тепла, производящий спекание гранул материала.

В качестве исходных, были выбраны образцы порошка жаропрочного сплава ЭП648 отечественного производства на основе никеля, с добавлением Cr – 32...35%; Al – 0,5...1,1%; Ti – 0,5...1,1%; Nb – 0,5...1,1%; Mo – 2,3...3,3%; W – 4,3...5,3%; C – до 0,1%.

Жаропрочный никелевый сплав ЭП648, характеризующийся высоким содержанием хрома, представляет собой важный инженерный материал с уникальными свойствами, что делает его предпочтительным выбором для широкого спектра технических приложений, особенно в условиях высоких температур и агрессивных сред.

Сфераодизированный порошок фракции 10...63 мкм применялся для изготовления образцов. Образцы (рис. 4) сплавлялись методом SLS печати оптоволоконным лазером, работающим в непрерывном режиме с длинной волны 1 069 нм и максимальной мощностью 400 Вт, на станке Concept Laser M2 cusing (рис. 5).

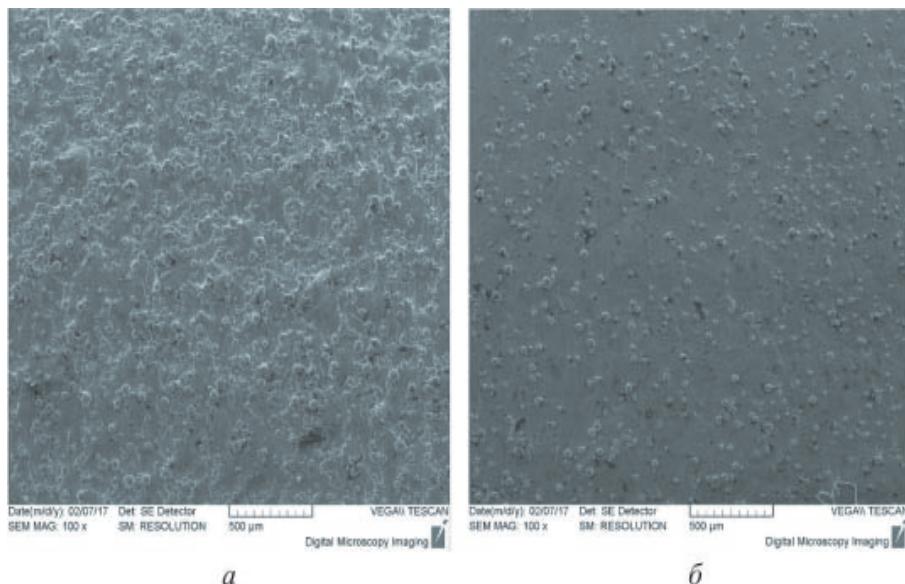


Рисунок 4 – Образцы, изготовленные по технологии SLS



Рисунок 5 – Установка для 3D-печати

Для получения оптимальных параметров шероховатости были использованы данные исследования с использованием порошков разных фракций и изменением скорости сканирования лазера в диапазоне 960...1124 мм/с, что позволило выбрать оптимальные параметры порошка и скорости сканирования [3].



**Рисунок 6 – Влияние электророзии на поверхность образца**  
**а – до электроэррозионной обработки; б – после обработки**

Таким образом, экспериментальное исследование позволило получить важные данные о влиянии различных факторов на шероховатость поверхности при 3D SLS печати и определить оптимальные параметры процесса для достижения требуемого качества поверхности изделий [3].

На представленных образцах «До электророзии» (а) и «После электророзии» (б) (рис. 6). На образце, представленном на рисунке а) до электроэррозионной обработки – шероховатость составила  $R_a = 10$  мкм, на образце после электроэррозионной обработки – рисунок б) – шероховатость составила  $R_a = 6$  мкм, что позволяет сделать вывод о том, что электроэррозионная обработка почти в два раза улучшает параметр шероховатости детали.

Исследование шероховатости образцов, полученных методом СЛС, осуществлялось с помощью профилографа-профилометра ПРОФИ-130. Микроструктура традиционно изготовленного сплава ЭП648 имеет шероховатости  $R_a = 10$  мкм.

Для повышения качества поверхности после селективного сплавления порошка были рассмотрены методы химического и электрохимического травления. Для улучшения качества внутренних и внешних поверхностей изделий, полученных методом SLS предложен новый технологический подход на основе уже имеющихся методик.

#### *Литература*

1. Рудской А.И., Попович А.А., Григорьев А.В., Каледина Д.Е. Аддитивные технологии: учебное пособие; Министерство образования и науки Российской Федерации, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. Санкт-Петербург: Изд-во Политехнического ун-та, 2017. 251 с.: ил., табл., цв. ил.; 26 см.; ISBN 978-5-7422-5589-5: 100 экз.

2. Деменок В.А., Балякин А.В., Носова Е.А. Исследование влияния термической обработки на поведение образцов, полученных методом селективного лазерного сплавления, при испытаниях на одноосное растяжение // Синергия наук 2018. № 21. 427-437 с.
3. Балякин А.В., Жученко Е.И., Смирнов Г.В., Проничев Н.Д. Исследование проблем появления негативной технологической наследственности при изготовлении деталей ГТД методом селективного лазерного сплавления // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2019. Т. 21. № 1(87). С. 61-70. EDN XHSWIU.
4. Кравченко Е.Г., Верещагина А.С., Верещагин В.Ю. Аддитивные технологии в машиностроении: учебное пособие / Комсомольск-на-Амуре: КНАГУ, 2018. 140 с.
5. Курицын Д.Н., Бойцов А.Г., Курицына В.В. Технологическое обеспечение сварки трением с перемешиванием в производстве аэрокосмических конструкций // Москва: Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), 2021. 160 с. ISBN 978-5-4316-0844-5 EDN SCINQO.
6. Попович А.А. Анизотропия механических свойств изделий, изготовленных методом селективного лазерного плавления порошковых материалов // Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2013. № 3. С. F4-11.
7. Преображенская Е.В., Зуев В.В., Мышечкин А.А. Технологии, материалы и оборудование аддитивных производств: учебное пособие / Е.В. Преображенская, Москва: РТУ МИРЭА, 2021. 164 с.
8. Скуратов Д.Л., Балякин А.В., Жученко Е.И., Швецов А.Н. Химическое полирование изделий из титанового сплава ВТ6, изготовленных методом селективного лазерного сплавления // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2018. Т. 20. № 4. С. 61-69.
9. Ащеурова А.В., Грибков Д.Н., Мамаева Е.А., Ниматуллаев М.М. Использование 3D-моделирования для повышения качества подготовки бакалавров в области социально-культурной деятельности. Вестник РУДН по информатизации образования. 2023;20(3):316-327.
10. Агаповичев А.В., Кокарева В.В., Смелов В.Г., Зотов А.В. Селективное лазерное плавление титанового сплава: исследование механических свойств и микроструктуры // IOP Conf., 2016. Серия: Материаловедение и инженерия. Том. 156 стр.

УДК 005.6

**Повышение качества и скорость внедрения технологического процесса изготовления деталей за счёт применения координатно-измерительных машин**

**Ольга Александровна Войко**, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Управление качеством и стандартизации», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

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

**Татьяна Андреева Суворова**, инженер отдела Главного метролога, Акционерное Общество «Корпорация «Тактическое Ракетное Вооружение», г. Королев, Московская область,

**Юлия Александровна Пруданцева**, инженер по качеству отдела технического контроля,

Общество с ограниченной ответственностью «Иплана», г. Москва,

**Игорь Дмитриевич Райцис**, инженер-технолог, АО «Композит», г. Королев, Московская область

*В данной статье исследуется изготовлении детали по изначально необоснованному технологическому процессу, который позволяет избежать влияния внутренних напряжений материала и получить на конечной операции деталь с заданными конструкторской документацией требованиями точности.*

Технологический процесс, координатно-измерительные машины (КИМ), механическая обработка, подтверждения гипотезы, качество изготовления.

**Improving the quality and speed of introduction of the technological process of manufacturing parts due to the use of coordinate measuring machines**

**Olga Alexandrovna Voeyko**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Quality Management and Standardization,

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Technological University named after twice Hero of the Soviet Union, pilot-cosmonaut A.A. Leonov», Korolev, Moscow region,

**Tatyana Andreevna Suvorova**, Engineer, Department of the Chief Metrologist, Joint Stock Company «Corporation «Tactical Missile Armament», Korolev, Moscow region,

**Yulia Alexandrovna Pridantseva**, Quality Engineer, Technical Control Department, Iplana Limited Liability Company, Moscow,

**Igor Dmitrievich Raitsis**, Technological engineer, JSC «Kompozit», Korolev, Moscow region

*This article examines the manufacture of a part according to an initially unreasonable technological process, which allows you to avoid the influence of internal stresses of the material and obtain a part with the accuracy requirements specified in the design documentation at the final operation.*

Technological process, coordinate measuring machines (CMM), mechanical processing, hypothesis confirmation, manufacturing quality.

В настоящее время на современных машиностроительных предприятиях для контроля качества изготавливаемых деталей применяют координатно-измерительные машины (КИМ).

КИМ применяется для контроля деталей сложной пространственной конфигурации, размеры и параметры которой возможно контролировать только с применением дорогостоящей специализированной контрольной оснасткой. КИМ предназначены для измерения всех параметров деталей, указанных в конструкторской документации, за исключением отверстий и поверхностей малого размера, где из-за размера контактного щупа нет возможности выполнить касание, а также КИМ не может заменить калибр для контроля параметров резьбовых отверстий [4].

Операции контроля с использованием координатно-измерительной машины при описании технологических процессов назначаются технологами.

Обязательному контролю при наладке станка подвергаются первые детали из партии. При получении фактических размеров изготовленной детали производится корректировка металлообрабатывающего оборудования, и только в том случае, если детали соответствуют всем требованиям конструкторской документации, в производство запускаются остальные партии деталей. Это позволяет гарантировать качество изготавливаемой продукции, при условии, что остальные технологические требования были учтены при разработке технологического процесса [5].

При разработке технологических процессов на детали с высокими требованиями к расположению и качеству поверхностей в технологический процесс проводится обязательный промежуточный контроль. Межоперационный контроль изделий чаще всего выполняют выборочным способом с измерением только высокоточных параметров детали. Это позволяет контролировать выполнение отдельных операций и, в случае обнаружения брака, быстро и точно узнать, что послужило его причиной, и, как следствие, быстро эту причину устранить [3].

На предприятиях военно-промышленного комплекса на законодательном уровне запрещён выборочный контроль 20% из общего числа механически обработанных деталей. Но допустимо выборочно контролировать такие параметры деталей, как межосевые расстояния отверстий, угловые размеры, размеры с высоким допуском изготовленные в одной операции и одним инструментом с другим размером, имеющий более точный квалитет и т.п. [1].

При обнаружении недопустимого отклонения только у какого-то одного размера или параметра деталей выборки, остальные детали партии проверяются только по этому размеру или параметру, что позволяет быстро выявить бракованные детали и определить характер брака.

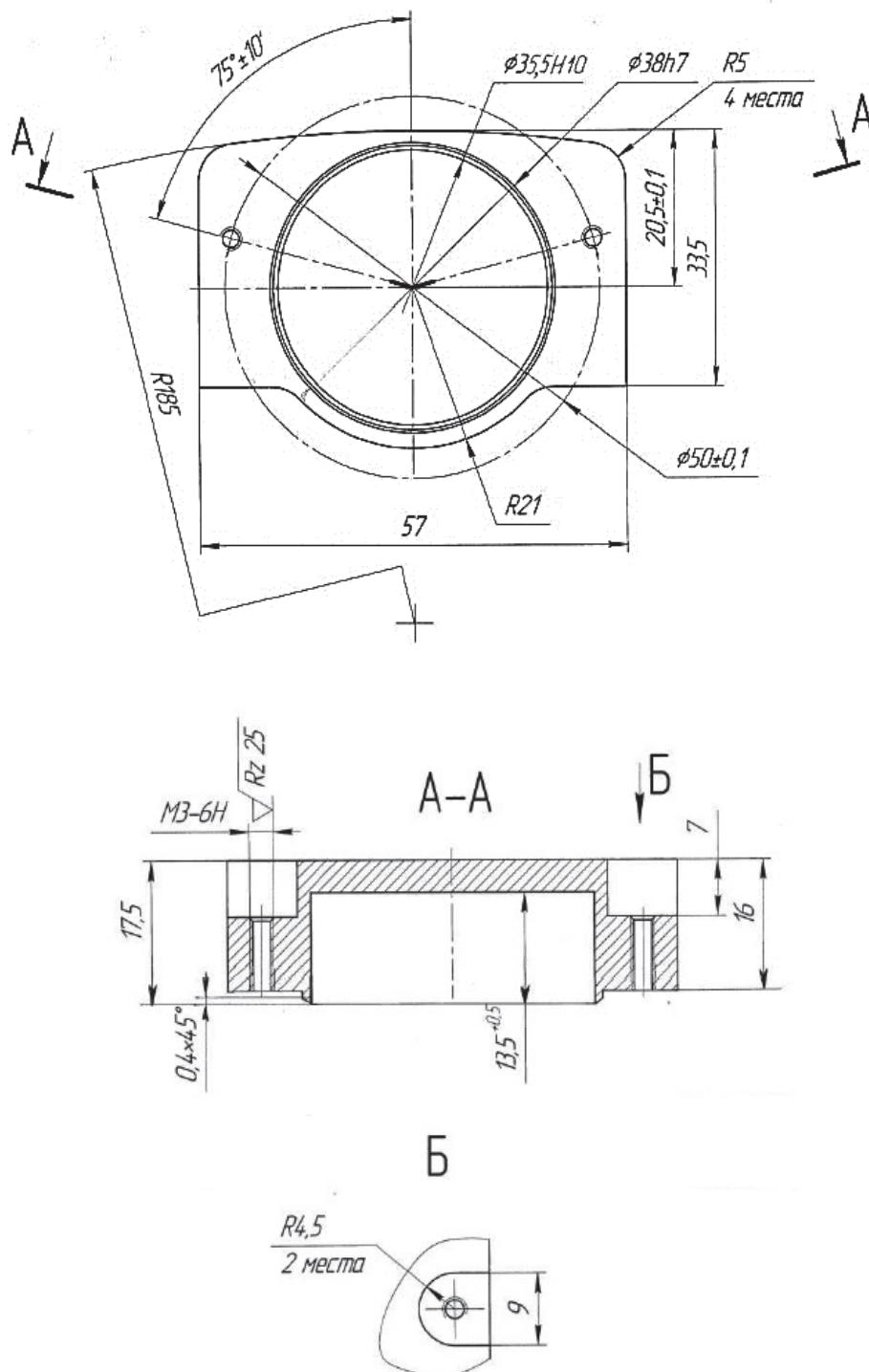


Рисунок 1 – Эскиз детали

Разрабатывая технологический процесс по механической обработке деталей, инженеру технологу приходится решать комплекс задач, выстраивая алгоритм обработки детали таким образом, чтобы на последней операции получить деталь, соответствующую всем требованиям конструкторской документации. Главной сложностью при механической обработке деталей является наличие множества факторов влияющих на качество готовых деталей. В большинстве случаев влиянием некоторых факторов можно пренебречь, но некоторые технологические процессы даже на стандартные детали неоднократно анализируются, с целью учёта всех действующих факторов.

В связи с тем, что КИМ обладает возможностью выполнять измерения с точностью в 5 мкм, создавая облако точек, которое позволяет визуально оценить в каком месте технологического процесса пошло отклонение формы и размеров поверхностей деталей от заданного [2].

Предлагаемая для рассмотрения «Крышка» (рис. 1), предназначена для герметизации масляного бака. Она обеспечивает сохранность масла, находящегося под высоким давлением, и защищает его от воздействия окружающей среды. Крышка испытывает динамические нагрузки, превышающие 35G, что требует высокой прочности материала и точности изготовления.

«Крышки» изготавливается из алюминиевого сплава АМг-6, применяется круглый прокат диаметром Ø70 мм. Этот материал обладает низким удельным весом, но при этом обладает высокой прочностью на разрыв, вибрационной стойкостью и стойкостью к коррозии. Чтобы снять внутренние напряжения, прутки проходят термическую обработку.

При анализе чертежа были определены основные параметры детали. Всего было выделено 18 ключевых размеров, которые были занесены в таблицу 1. Фактические размеры будут определены контрольно-измерительной машиной в ходе проведения контроля.

Перед отправкой на сборочный участок производства необходимо тщательно проверить каждый из размеров и убедиться в их правильном исполнении. Это гарантирует, что «крышка» будет соответствовать требованиям.

Таблица 1 – Таблица параметров детали

№ пп	Размер по чертежу	Комментарий
1	75°+/-10°	Главный вид
2	Ø35,5H10	Главный вид
3	Ø38h7	Главный вид
4	R5+/-0,5	Главный вид
5	20,5+/-0,1	Главный вид
6	33,5h14	Главный вид
7	Ø50+/-0,1	Главный вид
8	R21+/-0,2	Главный вид
9	57h14	Главный вид
10	R185+/-0,5	Главный вид
11	M3-6H	Сечение А-А
12	7+/-0,2	Сечение А-А

№ пп	Размер по чертежу	Комментарий
13	16h14	Сечение А-А
14	$13,5^{+0,5}$	Сечение А-А
15	$0,4 \times 45^\circ$	Сечение А-А
16	17,5h14	Сечение А-А
17	$R4,5^{+/-0,2}$	Вид Б
18	9H14	Вид Б

Важно отметить, что деталь является технологичной и обеспечивает легкий доступ к поверхностям для режущего инструмента. Однако, особое внимание следует уделить следующим размерам детали:

- отверстию диаметром  $\varnothing 35,5$ Н10,
- цилиндрической поверхности  $\varnothing 38$ h7 и
- линейному размеру  $20,5^{+/-0,1}$ .

Данные размеры играют важную роль в обеспечении качества детали, её функциональности и надежности.

Проведя анализ конструкторской документации, было принято решение об изготовлении данной детали за 2 операции механической обработки – токарной и фрезерной.

На рисунке 2 изображена токарная операция на станке с числовым программным управлением. В данной операции окончательно получают размеры  $\varnothing 35,5$ Н10,  $\varnothing 38$ h7.

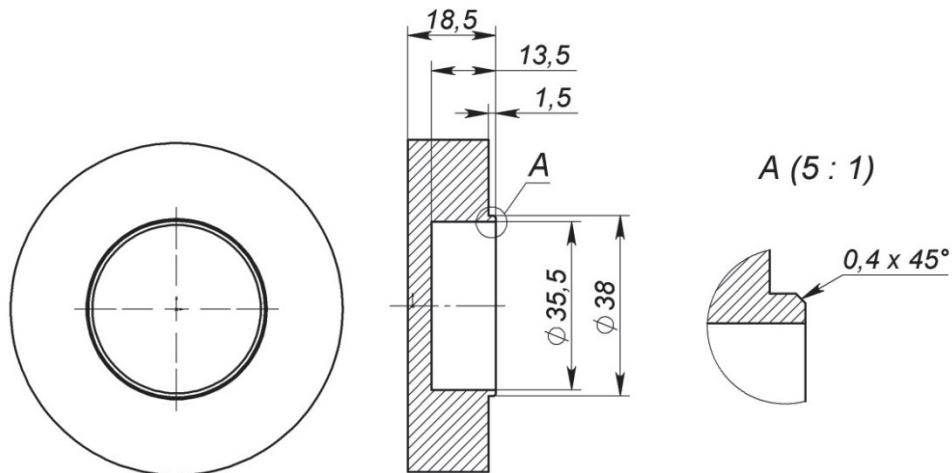


Рисунок 2 – Операция 010 Токарная

На рисунке 3 изображена фрезерная операция с числовым программным управлением. В данной операции окончательно обрабатывается остальная часть заготовки.

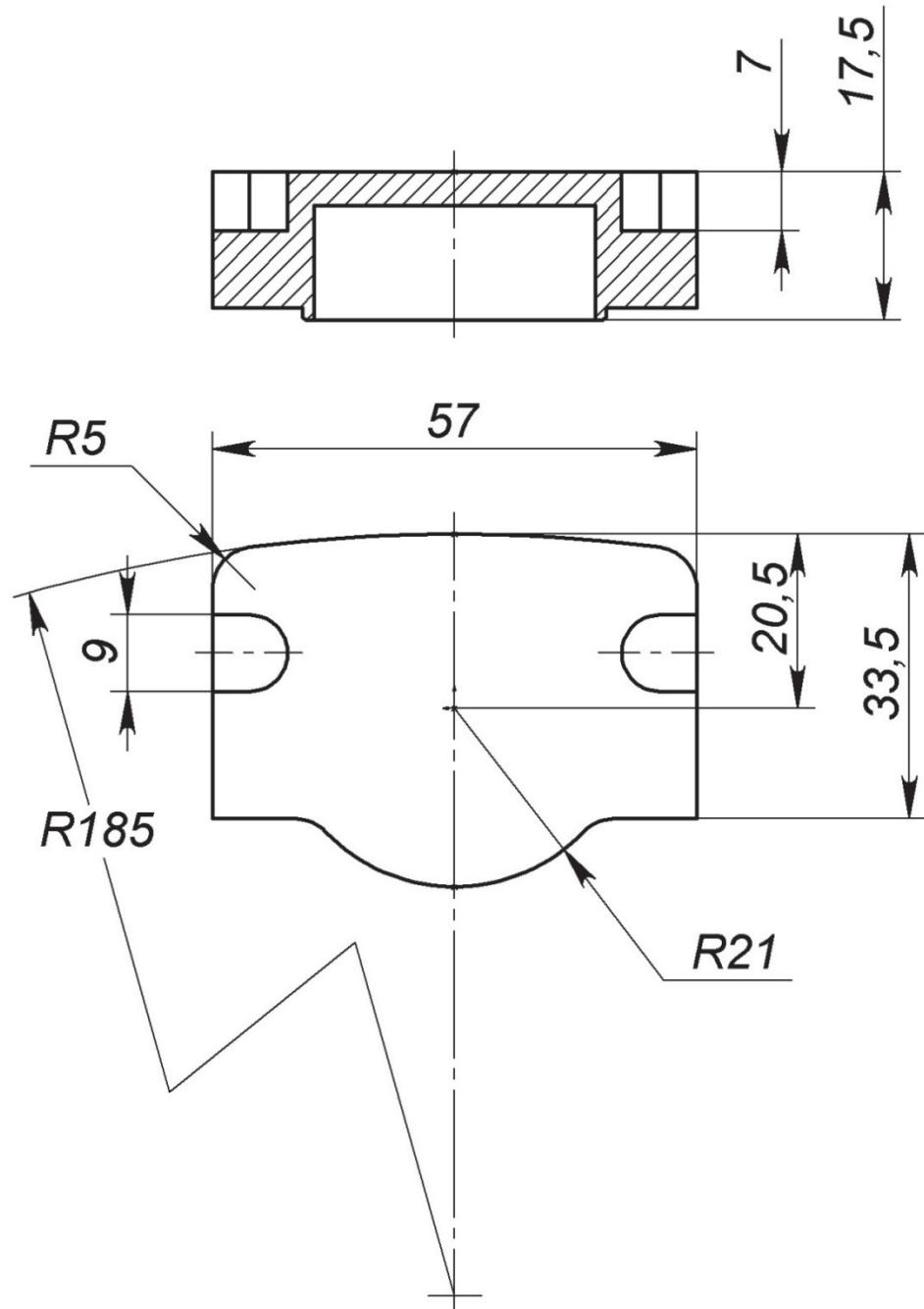


Рисунок 3 – Операция 020 Фрезерная

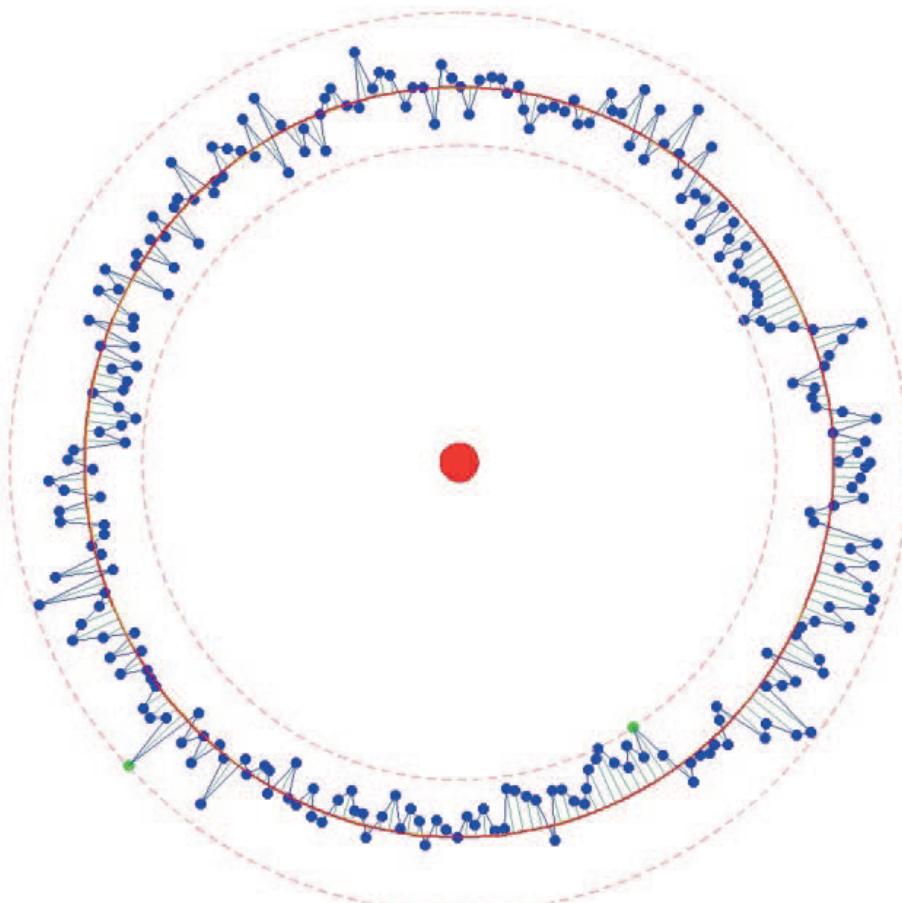
Проведённые измерения на координатно-измерительной машине показали, что фактические размеры детали между измеряемыми точками имеют величины, приведённые в таблице 2.

**Таблица 2 – Результаты измерений**

Контролируемый размер	Размер между точек 1-3 (см. рис. 2)	Размер между точек 2-4 (см. рис. 2)
$\varnothing 35,5H10 (+0,1)$	$\varnothing 35,50$	$\varnothing 35,56$
$\varnothing 38h7 (-0,025)$	$\varnothing 37,93$	$\varnothing 37,99$

Анализ размеров, приведённых в таблице 1, показывает, что поверхности имеют не круглую, а эллипсоидную форму, с выходящим из поля допуска значениями.

Представленное на рисунке 4 облако точек, выполненное методом сканирования, показал, что искривление диаметра  $\varnothing 38h7$  происходит не равномерно. Данное явление возможно обнаружить, только после выполнения измерения относительно центра измеряемого отверстия\вала, получая радиусные величины. Но данный вид измерения в условиях малого поля допуска измеряемой детали, возможно осуществить только при использовании высокотехнологичных координатно-измерительных машин.



**Рисунок 4 – Облако точек, полученное методом сканирования на КИМ размера  $\varnothing 38h7$**

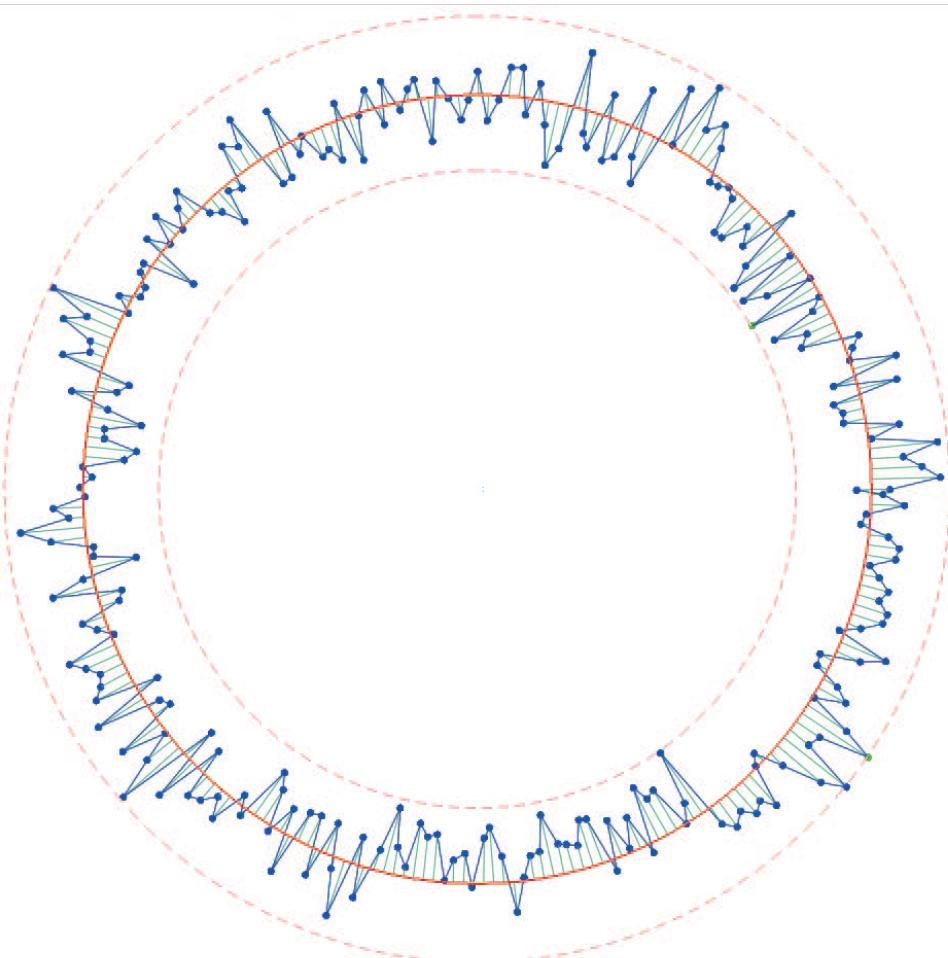


Рисунок 5 – Облако точек, полученное методом сканирования на КИМ размера Ø35,5Н10

Таблица 3 – Причины искривления формы графика и разработанные действия

№ пп	Гипотеза	Результат
1	чрезмерное усилие зажатие заготовки в самоцентрирующимся трёх кулачковом патроне, на второй операции	контроль заготовки после механического усилия патрона с 50% добавочного необходимого усилия не изменил форму отверстия и цилиндрической поверхности, после снятия заготовки. При этом механическая обработка со снятием стружки не выполнялась
2	неравномерное распределение усилия при закреплении в самоцентрирующимся трёх кулачковом патроне, на второй операции	во избежание повреждения поверхности отверстия, закрепление в трёх кулачковом патроне осуществлялось через специальное алюминиевое разрезное кольцо, которое распределяло усилие от 3-х кулачков равномерно по всей плоскости поверхности отверстия. Гипотеза 1 также проверялась с применением данного разрезного кольца
3	занесенные режимы резания, на второй операции	снижение режимов резания на 50% при фрезеровании на второй операции, не изменило картину формирования облака точек
4	нарушение технологического процесса термической обработки или полное отсутствие выполнения данной операции	подконтрольное проведение термической обработки и дальнейшее изготовление детали, не показал изменений в формировании поверхности после окончательной механической операции
5	перераспределение внутренних напряжений, в структуре заготовки после удаления слоя материала, вследствие различной толщины стенок детали	необходимо пересмотреть технологический процесс изготовления детали, в котором обработка самого точного размера будет выполняться после операций, в которых заранее выравнены по толщине стенки детали для предварительного перераспределения внутренних напряжений материала

Аналогичная картина наблюдается и на рисунке 5, где изображено облако точек, выполненное методом сканирования отверстия Ø35,5H10.

При рассмотрении данной проблемы, были выдвинуто 5 гипотез причин искривления формы графика и разработаны действия, результаты которых представлены в табл. 3.

Переработанный технологический процесс состоит из 4-х механообрабатывающих операций, изображённых на рисунках 6; 7; 8 (завершающая операция – удаление технологического припуска – не показан).

На рисунке 6 изображена токарная операция с числовым программным

управлением. В данной операции предварительно обрабатывается отверстие и торец заготовки, с припуском на сторону в 0,5 мм.

На рисунке 7 изображена фрезерная операция с числовым программным управлением. В данной операции окончательно обрабатывается контур заготовки и формируется поверхность ( $\text{Ø}35,5 \times 3,5$ ) под закрепление заготовки в трёхкулаковом патроне на токарном станке с числовым программным управлением.

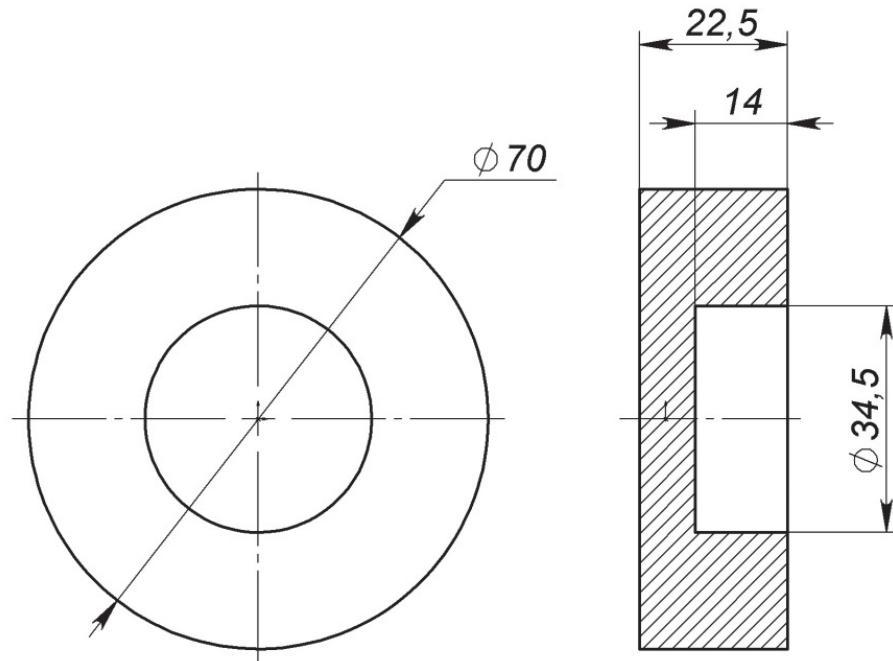


Рисунок 6 – Операция 010 Токарная

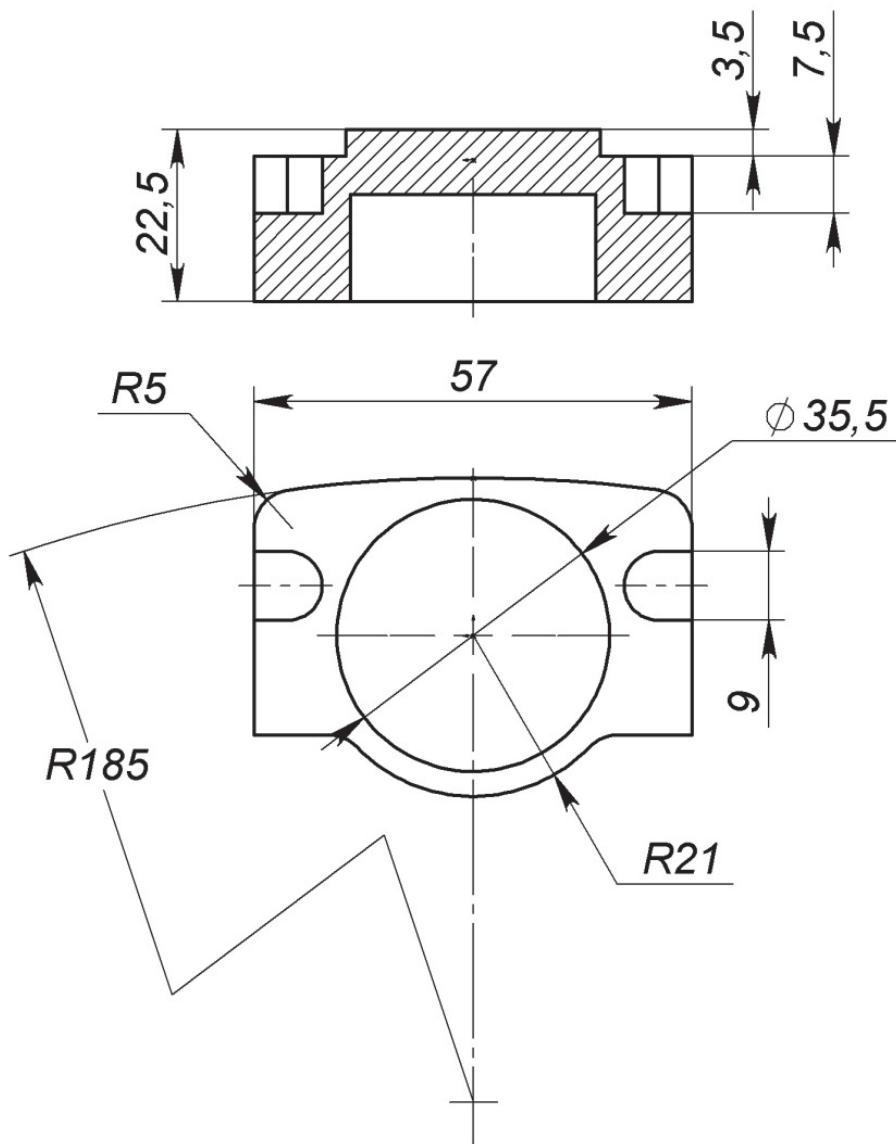


Рисунок 7 – Операция 020 Фрезерная

На рисунке 8 изображена токарная операция с числовым программным управлением. В данной операции окончательно обрабатываются размеры:  $\varnothing 35,5\text{H}10$ ,  $\varnothing 38\text{h}7$ , а также ещё менее точные размеры. В заключительной операции удаляется технологический припуск.

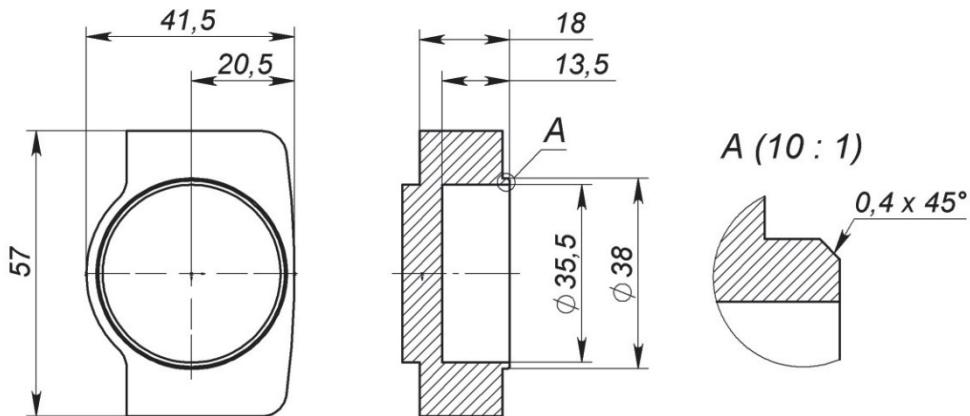


Рисунок 8 – Операция 030 Токарная

Проведённые измерения на координатно-измерительной машине показали, что фактические размеры детали, изготовленной по изменённой технологии, между измеряемыми точками имеют величины, приведённые в таблице 4.

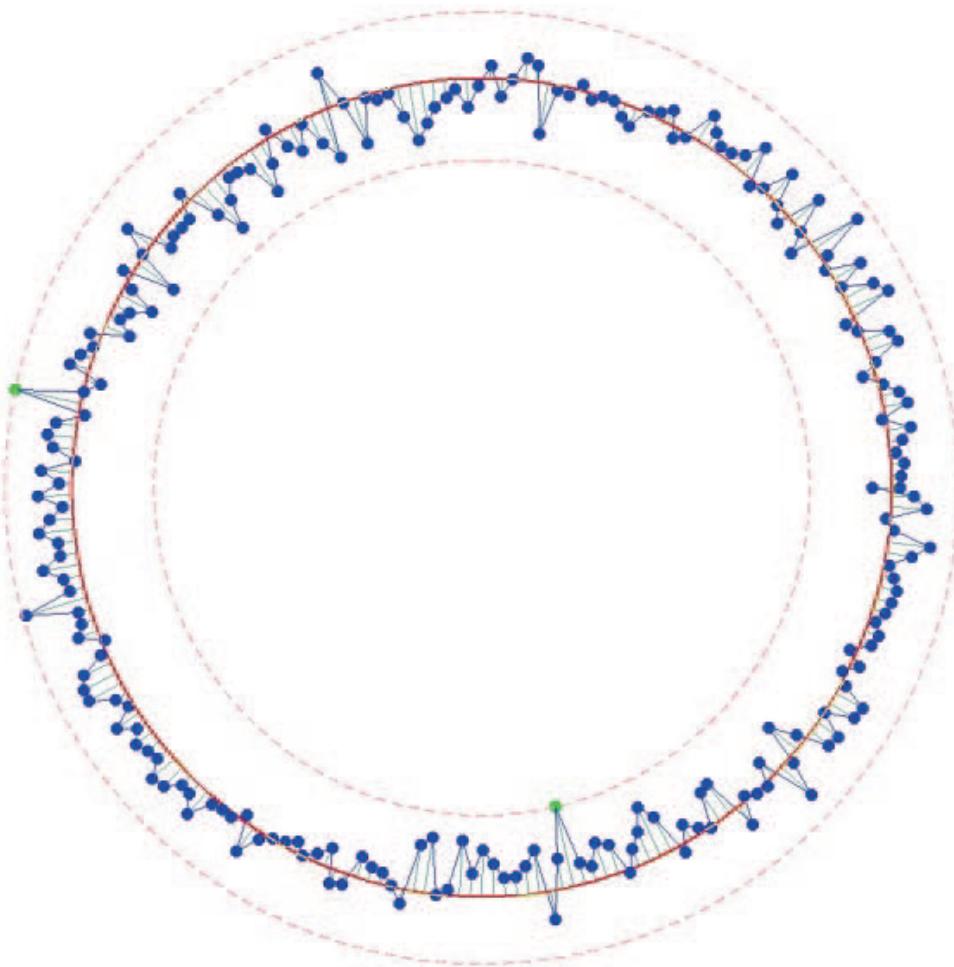
Таблица 4 – Результаты измерений

Контролируемый размер	Размер между точек 1-3 (см. рис. 2)	Размер между точек 2-4 (см. рис. 2)
$\varnothing 35,5\text{H}10 (+0,1)$	$\varnothing 35,55$	$\varnothing 35,56$
$\varnothing 38\text{h}7 (-0,025)$	$\varnothing 38,98$	$\varnothing 38,99$

Анализ размеров, приведённых в таблице 2, показывает, что поверхности так же имеют форму эллипса, но с величинами, погрешности измерения, которыми можно пренебречь. Контроль универсальными средствами измерения, так же подтвердил годность изготовленной детали.

Представленное на рисунке 9 облако точек, выполненное методом сканирования, показал, что средняя величина распределения точек на поверхности относительно центра детали равномерна и допуск к круглости поверхности находится в пределах поля допуска, указанного в конструкторской документации.

Это может свидетельствовать о том, что дефект возникает вследствие неравномерного распределения внутренних напряжений в самом материале заготовки.



**Рисунок 9 – Облако точек, полученное методом сканирования на КИМ размера Ø35,5h7**

### Заключение

Таким образом, изготовление детали по изначально необоснованному технологическому процессу позволяет избежать влияния внутренних напряжений материала и получить на конечной операции деталь с заданными конструкторской документацией требованиями точности.

Исходя из проведённой работы можно сделать вывод, что применение КИМ позволяет не только выполнять сложные измерения в автоматическом режиме, но и осуществлять дополнительную поддержку при технологической подготовке производства в плане разработки и внедрении технологических процессов на вновь разрабатываемые детали, за счёт высокой точности оборудования и высокой визуализации полученных параметров измеренного изделия.

*Литература*

1. ГОСТ Р ИСО 10360-2-2017. Характеристики изделий геометрические. Приемочные и перепроверочные испытания координатно-измерительных машин. Координатно-измерительные машины, применяемые для измерения линейных [Электронный ресурс]. Введ. 2019-01-01. АО «НИИизмерения» // Техэксперт – электронный фонд правовой и нормативно-технической документации. Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200157929>.
2. ГОСТ Р ИСО 10360-4-2017. Характеристики изделий геометрические. Приемочные и перепроверочные испытания координатно-измерительных машин. Координатно-измерительные машины, применяемые в режиме сканирования [Электронный ресурс]. Введ. 2019-01-01. АО «НИИизмерения» // Техэксперт – электронный фонд правовой и нормативно-технической документации. Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200157931>.
3. Федеральный закон «Об обеспечении единства измерений» от 26.06.2008 N 102-ФЗ [Электронный ресурс]. Введен 2008-06-26. Москва, Кремль. 2008. Консультант Плюс – электронный фонд правовой документации.
4. Харитонов В.И. Управление техническими системами. М: Изд-во «ФОРУМ», 2010 384 с.
5. Чапала О.В. Координатно-измерительные машины и их применение [Электронный ресурс] // Новайнфо. 2016. № 57. Режим доступа: <http://novainfo.ru/article/10054>.

ДЛЯ ЗАМЕТОК

Адрес редакции:  
141070, Королев,  
Ул. Октябрьская, 10а  
Тел. (495)543-34-30 (доб.138),  
E-mail: [rio-kimes@mail.ru](mailto:rio-kimes@mail.ru),

Site: [www.unitech-mo.ru](http://www.unitech-mo.ru)

Подписано в печать 20.09.2024

Формат В5

Печать офсетная. Усл.печ.л. 9,5

Тираж 500 экз.

Заказ № 97-03

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](mailto:keyneslab@gmail.com)

Site: [www.n-ko.ru](http://www.n-ko.ru)