

**ВЕСТНИК ВОРОНЕЖСКОГО  
ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО  
УНИВЕРСИТЕТА**

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77 – 74159 от 02.11.2018).

**Учредитель: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»**

Индекс журнала в «Объединенном каталоге «Пресса России»: 41891

**ISSN 1729-6501 (Print)**

Журнал «Вестник Воронежского государственного технического университета» включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук.

Журнал выходит шесть раз в год

**РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:**

**Главный редактор В.Р. Петренко**, д-р техн. наук – Воронеж

**Заместитель главного редактора И.Г. Дроздов**, д-р техн. наук – Воронеж

**Ответственный секретарь Ю.В. Татаренко** – Воронеж

**ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ:**

В.Н. Бурков – д-р техн. наук – Москва;  
Д.А. Новиков – д-р техн. наук – Москва;  
С. Лухан-Мора – проф. – Испания;  
А.К. Погодаев – д-р техн. наук – Липецк;  
А.Ф. Тузовский – д-р техн. наук – Томск;  
С.Л. Подвальный – д-р техн. наук – Воронеж;  
В.Л. Бурковский – д-р техн. наук – Воронеж;  
В.В. Куц – д-р техн. наук – Курск;  
А.Г. Ивахненко – д-р техн. наук – Курск;  
В.П. Смоленцев – д-р техн. наук – Воронеж;  
С.Г. Бишутин – д-р техн. наук – Брянск;  
В.В. Пешков – д-р техн. наук – Воронеж;  
О.Н. Кириллов – д-р техн. наук – Воронеж;  
О.Ю. Макаров – д-р техн. наук – Воронеж;  
А.С. Багдасарян – д-р техн. наук – Москва;  
Ю.Г. Пастернак – д-р техн. наук – Воронеж;  
Ю.С. Балашов – д-р физ.-мат. наук – Воронеж;  
А.В. Ашихмин – д-р техн. наук – Воронеж;  
П.П. Чураков – д-р техн. наук – Пенза

Ответственность за подбор и изложение фактов, цитат, статистических данных и прочих сведений несут авторы публикаций. Статьи, поступающие в редакцию, рецензируются. Мнение редакции может не совпадать с мнением авторов материалов. При перепечатке статей ссылка на журнал обязательна.

**Адрес редакции:** 394026, Воронеж, Московский проспект, дом 14, комн. 212

**Телефон:** +7 (473) 246-28-63

**E-mail:** vestnik@vorstu.ru

**Издатель:** ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»

**Адрес издателя:** 394006, Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84

© **ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», 2021**

12+

**BULLETIN OF VORONEZH STATE TECHNICAL  
UNIVERSITY**

The journal is registered by the Federal service for supervision of communications, information technology, and mass media (registration certificate PI № FS 77 – 74159 02 November 2018)

**Founder: Federal State State-Financed Comprehensive Institution of High Education “Voronezh State Technical University”**

The index of the magazine in the United Catalog "Russian Press": 41891

**ISSN 1729-6501 (Print)**

The journal "Bulletin of Voronezh State Technical University" is included into the list of peer-reviewed editions in which the results of dissertations for obtaining degrees of a Full Doctor and PhD are published.

The journal is published six times a year

**EDITORIAL BOARD:**

**Editor-in-Chief V.R. Petrenko**, Dr. Sc. (Tech.) – Voronezh  
**Deputy Editor-in-Chief I.G. Drozdov**, Dr. Sc. (Tech.) – Voronezh

**Executive secretary Yu.V. Tatarenko** – Voronezh

**MEMBERS OF EDITORIAL BOARD:**

V.N. Burkov – Dr. Sc. (Tech.) – Moscow;  
D.A. Novikov – Dr. Sc. (Tech.) – Moscow;  
Sergio Lujan Mora – Professor – Spain;  
A.K. Pogodaev – Dr. Sc. (Tech.) – Lipetsk;  
A.F. Tuzovskiy – Dr. Sc. (Tech.) – Tomsk;  
S.L. Podvalny – Dr. Sc. (Tech.) – Voronezh;  
V.L. Burkovskiy – Dr. Sc. (Tech.) – Voronezh;  
V.V. Kuts – Dr. Sc. (Tech.) – Kursk;  
A.G. Ivakhnenko – Dr. Sc. (Tech.) – Kursk;  
V.P. Smolentsev – Dr. Sc. (Tech.) – Voronezh;  
S.G. Bishutin – Dr. Sc. (Tech.) – Bryansk;  
V.V. Peshkov – Dr. Sc. (Tech.) – Voronezh;  
O.N. Kirillov – Dr. Sc. (Tech.) – Voronezh;  
O.Yu. Makarov – Dr. Sc. (Tech.) – Voronezh;  
A.S. Bagdasaryan – Dr. Sc. (Tech.) – Moscow;  
Yu.G. Pasternak – Dr. Sc. (Tech.) – Voronezh;  
Yu.S. Balashov – Dr. Sc. (Phys. and Math.) – Voronezh;  
A.V. Ashihmin – Dr. Sc. (Tech.) – Voronezh;  
P.P. Churakov – Dr. Sc. (Tech.) – Penza

The authors of publications are responsible for the selection and presentation of facts, quotations, statistics and other information. The articles coming to the editorial office are reviewed. The opinion of the editors may not coincide with the opinion of the authors of the materials. When reprinting articles, the link to the journal is obligatory.

**Address:** 394026, Voronezh, Moskovskiy prospekt, 14, office 212

**Phone number:** +7(473)246-28-63

**E-mail:** vestnik@vorstu.ru

**Publisher:** Federal State State-Financed Comprehensive Institution of High Education “Voronezh State Technical University”

**Publisher address:** 394006, Voronezh, 20-letiya Oktyabrya str., 84

© **Voronezh State Technical University, 2021**

12+

## СОДЕРЖАНИЕ

### Информатика, вычислительная техника и управление

Поиск областей неопределенностей кинетических констант при моделировании процессов безобрывной полимеризации диенов Э.Р. Гиззатова, А.С. Исмагилова, С.Л. Подвальный.....	7
Разработка и применение геоинформационной системы мониторинга работы торговых представителей в группе компаний «Эфко» В.С. Кудряшов, М.В. Алексеев, А.В. Иванов, В.В. Портнов, Е.В. Князева, О.А. Орловцева.....	14
Анализ методик расчета теплопередачи в системах термоэлектрического охлаждения теплонапряженных элементов С.В. Бородкин, А.В. Иванов, И.Л. Батаронов, А.В. Кретинин.....	21
Решение задачи межсамолетной навигации по обеспечению полета строем с использованием системы технического зрения Д.А. Смирнов, В.Г. Бондарев, А.В. Николенко.....	32
Альтернативный коэффициент конкордации при наличии связанных рангов Ю.В. Лубенец.....	40

### Радиотехника и связь

Исследование влияния угла наклона вертикальных стабилизаторов самолета на эффективную поверхность рассеяния А.В. Володько, С.М. Фёдоров, Е.А. Ищенко, М.А. Сиваш.....	46
Метод расчета радиочастотных помех на основе передаточной функции А.В. Башкиров, А.С. Демихова, Н.В. Астахов, М.В. Долженко, Д.Р. Елкин.....	50
Амплитудные распределения линейных антенных систем с непрерывным раскрытием Е.А. Рогожина, О.А. Шипоша, К.А. Лайко, А.С. Разумихин, Ю.О. Филимонова .....	56
Улучшение различных свойств антенны Уда-Яги С.М. Фёдоров, Е.А. Ищенко, И.А. Зеленин, Е.В. Папина, А.В. Бунина, Л.В. Сопина.....	64
Методика оценки потерь импульсного сигнала в подсистеме аутентификации коммутационного оборудования О.А. Кулиш.....	68
Смешанная характеристика s-параметров дифференциальных структур Т.С. Глотова, Д.В. Журавлёв, В.В. Гловов.....	74
Использование машинного обучения для калибровки аналоговых микросхем А.В. Башкиров, Н.В. Астахов, Н.В. Ципина, А.Б. Антиликаторов, А.С. Демихова.....	79
Минимизация эффективной площади рассеяния с помощью изменения относительной магнитной проницаемости А.В. Володько, С.М. Фёдоров, Е.А. Ищенко, М.А. Сиваш, Л.В. Сопина, А.В. Бунина.....	85

**Машиностроение и машиноведение**

Технология комбинированной обработки каналов по многослойным шаблонам <b>А.В. Щеднов, В.П. Смоленцев, Н.С. Поташникова.....</b>	<b>89</b>
Один из возможных подходов при проектировании червячной фрезы для обработки малого конуса циклоидной передачи <b>В.В. Куц, А.А. Панин, Д.Н. Тютюнов, К.В. Жилина.....</b>	<b>97</b>

## CONTENTS

### Informatics, computer engineering and control

Search for uncertainty regions of kinetic constants in modeling processes of non-break polymerization of dienes <b>E.R. Gizatova, A.S. Ismagilova, S.L. Podvalny</b> .....	7
Development and application of a geographic information system for monitoring the work of sales representatives in the “Efko” group of companies <b>V.S. Kudryashov, M.V. Alekseev, A.V. Ivanov, V.V. Portnov, E.V. Knyazeva, O.A. Orlovtsseva</b> .....	14
Analysis of methods for calculating heat transfer in thermoelectric cooling systems for heat-stressed elements <b>S.V. Borodkin, A.V. Ivanov, I.L. Bataronov, A.V. Kretinin</b> .....	21
Solving the problem of inter-aircraft navigation to ensure flying in formation using a technical vision system <b>D.A. Smirnov, V.G. Bondarev, A.V. Nikolenko</b> .....	32
Alternative coefficient of concordance in case of connected ranks <b>Yu.V. Lubenets</b> .....	40

### Radio engineering and communication

Study of the influence of the tilt angle of vertical stabilizers of an aircraft on the effective scattering surface <b>A.V. Volod’ko, S.M. Fyedorov, E.A. Ishchenko, M.A. Sivash</b> .....	46
Method for calculation of radio frequency interference based on the transfer function <b>A.V. Bashkirov, A.S. Demikhova, N.V. Astakhov, M.V. Dolzhenko, D.R. Elkin</b> .....	50
Amplitude distribution of linear antenna systems with continuous apertures <b>E.A. Rogozhina, O.A. Shiposha, K.A. Layko, A.S. Razumikhin, Yu.O. Filimonova</b> .....	56
Improving the various properties of the Uda-Yagi antenna <b>S.M. Fedorov, E.A. Ishchenko, I.A. Zelenin, E.V. Papina, A.V. Bunina, L.V. Sopina</b> .....	64
Pulse signal loss estimation technique in switching equipment authentication subsystem <b>O.A. Kulish</b> .....	68
Mixed characteristic of s-parameters of differential structures <b>T.S. Glotova, D.V. Zhuravlyev, V.V. Glotov</b> .....	74
Using machine learning to calibrate analog microcircuits <b>A.V. Bashkirov, N.V. Astakhov, N.V. Tsipina, A.B. Antilikatorov, A.S. Demikhova</b> .....	79
Minimizing the effective area of scattering by means of changing the relative magnetic permeability <b>A.V. Volod’ko, S.M. Fyedorov, E.A. Ishchenko, M.A. Sivash, L.V. Sopina, A.V. Bunina</b> .....	85

**Mechanical engineering and science of machines**

Combined channel processing technology based on multi-layer templates <b>A.V. Shchednov, V.P. Smolentsev, N.S. Potashnikova.....</b>	<b>89</b>
One of the possible approaches for designing a hob cutter for machining a small cycloidal cone <b>V.V. Kuts, A.A. Panin, D.N. Tyutyunov, K.V. Zhilina.....</b>	<b>97</b>

## *Информатика, вычислительная техника и управление*

DOI 10.36622/VSTU.2021.17.1.001

УДК 544.42

### **ПОИСК ОБЛАСТЕЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ КИНЕТИЧЕСКИХ КОНСТАНТ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ПРОЦЕССОВ БЕЗОБРЫВНОЙ ПОЛИМЕРИЗАЦИИ ДИЕНОВ**

Э.Р. Гиззатова<sup>1</sup>, А.С. Исмагилова<sup>2</sup>, С.Л. Подвальный<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Стерлитамакский филиал Башкирского государственного университета,  
г. Стерлитамак, Россия

<sup>2</sup>Башкирский государственный университет, г. Уфа, Россия

<sup>3</sup>Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** рассматриваются процессы полимеризации на катализаторах Циглера-Натта. Исследован вопрос о механизме процессов как необходимом наборе элементарных стадий кинетической схемы. Приведена общая схема допустимых стадий процесса, включающая стадии инициирования, роста цепи, передачи цепи и обрыва цепи. Указано, что часть элементарных реакций может быть убрана из кинетической схемы за счет способа приготовления самого катализатора, а часть - на основании получаемых кинетических зависимостей. Но гипотеза о наличии или отсутствии элементарных стадий может быть доказана не только экспериментальным, но и вычислительным путем. Приводимые в работе табличные данные свидетельствуют о практически нулевом значении константы скорости элементарной стадии материального обрыва цепи - дезактивации активных центров, что, в свою очередь, вызывает оптимизацию кинетической схемы. Тогда рассматриваемые процессы могут быть отнесены к типу безобрывной полимеризации. Составление кинетической и математической моделей для исследуемых процессов позволяет поставить прямые и обратные кинетические задачи. Решение последних может быть получено методом многократного решения прямых кинетических задач и сравнения расчетных значений молекулярных характеристик с их экспериментальными аналогами. Однако целесообразнее проводить предварительный этап нахождения областей локальных минимумов по оптимизируемым значениям констант путем построения базисной поверхности и при поиске допустимых наборов значений констант скоростей оперировать найденными областями минимумов

**Ключевые слова:** полимеризация, кинетическое моделирование, математическая модель, кинетические константы, метод моментов

#### **Введение**

Теоретическое исследование и экспериментальное изучение процессов полимеризации с использованием катализаторов Циглера-Натта имеют огромное практическое значение, поскольку их применение связано с производством наиболее массовых изопреновых и бутадиеновых каучуков. Интересен вопрос о механизме процессов полимеризации, проводимых в промышленных условиях в каскадно-реакторных схемах. Зачастую именно механизм процесса определяет основные физико-механические свойства получаемого полимерного продукта [1, 2], которые определяются молекулярно-массовым распределением полимера.

Задача выяснения механизма полимеризации может быть решена кинетическим модели-

рованием. В этом случае определяется минимальный набор элементарных реакций, необходимых для математического описания процессов полимеризации. При этом каждая реакция сопоставляется с константой скорости. В работах [3, 4] показана кинетическая схема, общая для класса процессов растворной полимеризации, включающая следующие элементарные стадии: образование активного центра, рост цепи, обрыв цепи и передачу цепи на агент смеси, при этом каждая стадия может проходить по различному механизму. Применяя методы кинетического моделирования, выстраивается модель процесса, включающая скорости элементарных реакций и стехиометрическую матрицу участия каждого реагента в той или иной стадии реакции.

Набор элементарных реакций со своими константами скоростей характеризует кинетику процесса. Но зачастую значения констант скоростей элементарных стадий неизвестны, поэтому их находят методами идентификации моделей, часто называемыми обратными кинетическими

тическими задачами, путем их (констант) поиска [1, 3, 5, 6] различными оптимизационными алгоритмами. Всякое усложнение модели за счет введение новых стадий осуществляется только после дополнительных экспериментальных исследований [7]. Важным фактором адекватности решения становится предварительное определение областей локализации оптимальных наборов значений констант. Используя методы нахождения базисов химических систем [8], можно определить  $n$ -мерную поверхность и ее сканированием определить требуемые области.

Таким образом, применяя методы кинетического и математического моделирования, определяются механизм полимеризационных процессов и оптимальные наборы значений кинетических констант элементарных стадий, входящих в номинальную кинетическую схему процесса растворной полимеризации изопреновых и бутадиеновых каучуков на катализаторах Циглера-Натта.

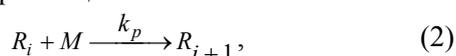
### Поиск оптимальной кинетической схемы процесса полимеризации

Процесс полимеризации диеновых каучуков на катализаторах Циглера-Натта в общем случае проводится в четырех элементарных стадиях [1, 5, 9], тогда соответствующая кинетическая схема может быть представлена как:

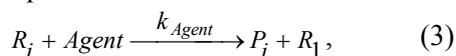
стадия инициирования



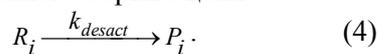
стадия роста цепи



стадия передачи цепи на агент



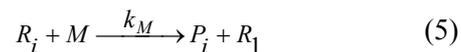
стадия спонтанного обрыва цепи



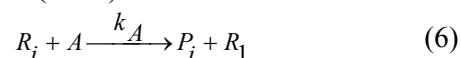
Однако так как стадия инициирования активных центров иногда проводится отдельно с мономером, что ведет к увеличению числа стабильных активных центров и формированию наиболее активного каталитического комплекса, то указанную стадию можно исключить из кинетической схемы [9], т.н. мгновенное инициирование.

В качестве агентов-передатчиков чаще выступают мономер и алюминийорганическое соединение, тогда в кинетическую схему будут включены две элементарные стадии:

передачи цепи на мономер  $M$



передача цепи на алюминийорганическое соединение  $A$  (АОС)



Стадия дезактивации в полимеризационной системе напрямую связана с ее кинетической активностью. Этот параметр, обозначаемый как  $\alpha$ , при отсутствии указанной стадии в кинетической схеме остается постоянным на протяжении всего процесса полимеризации. Он определяется произведением константы скорости роста цепи  $k_p$  и концентрацией активных центров  $C_{AC}$ , поэтому вариация значения  $\alpha$  следует из изменения последней. Если же концентрация  $C_{AC}$  в ходе процесса меняется, то будет меняться активность каталитической системы. Однако в ходе натурального эксперимента активность системы во времени не определяется, поэтому ее вариативность теоретически «проверяют» поведением кривой по конверсии.

Естественно полагать, что наличие или отсутствие той или иной стадии в кинетической схеме должно согласовываться с химизмом исследуемого процесса.

Используя методы математического моделирования, вопрос учета стадии дезактивации активных центров сводится к решению обратной кинетической задачи поиска значения ее константы скорости  $k_d$  [3]. При этом в качестве значений констант скоростей остальных элементарных стадий могут быть приняты соответствующие значения, полученные в ходе натурального эксперимента [5].

Применяя законы химической кинетики и методы математического моделирования, выписывается математическая модель процесса на основании (2), (5), (6), (4). Применяя метод моментов [1], получают автономную систему из конечного числа обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{dM}{dt} &= -M(R_1 + \mu_0)(k_{1p} + k_M) \\ \frac{dA}{dt} &= -Ak_{1A}(R_1 + \mu_0) \\ \frac{dR_1}{dt} &= -k_p MR_1 + k_M M \mu_0 + k_A A \mu_0 - k_d R_1 \\ \frac{dP_1}{dt} &= k_M MR_1 + k_A AR_1 + k_d R_1 \\ \frac{d\mu_0}{dt} &= k_p MR_1 - k_M M \mu_0 - k_A A \mu_0 - k_d \mu_0 \\ \frac{d\lambda_0}{dt} &= k_M M \mu_0 + k_A A \mu_0 + k_d \mu_0 \end{aligned} \quad (7)$$

с начальными данными:

$$M^{(0)} = M(0), A^{(0)} = A(0), R_1^{(0)} = R_1(0), \quad (8)$$

$$P_1(0) = \lambda_0(0) = \mu_0(0) = 0$$

В системе (7)-(8) за моменты нулевого порядка  $\mu_0$  и  $\lambda_0$  молекулярно-массового распределения [1] приняты следующие выражения:

$$\mu_0 = \sum_{i=2}^{\infty} R_i, \quad (9)$$

$$\lambda_0 = \sum_{i=2}^{\infty} P_i$$

Используя момент нулевого порядка для активных цепей  $\mu_0$  и концентрацию активных цепей с единичной длиной звена  $R_1$ , можно представить концентрации активных центров  $C_{AC}$  как следующую сумму:

$$C_{AC} = R_1 + \mu_0 \quad (10)$$

Решают обратную кинетическую задачу, связанную с вопросом о наличии или отсутствии стадии дезактивации активных центров в кинетической схеме путем сопоставления расчетных и экспериментальных зависимостей по конверсии мономера  $U(t)$ :

$$Z(k_d) = \sum_{j=1}^n (U_j^{\text{exp}} - U_j^{\text{calc}})^2. \quad (11)$$

Тогда для минимизации функционала (11) необходимо решать систему дифференциальных уравнений (12), полученную из уравнений (7), характеризующих скорости изменения концентраций веществ  $M$ ,  $R_1$  и  $\mu_0$ . Но, с учетом (10), новая система (12) будет содержать только два уравнения для  $M$  и  $C_{AC}$ :

$$\frac{dM}{dt} = -MC_{AC}(k_p + k_M), \quad (12)$$

$$\frac{dC_{AC}}{dt} = -k_d C_{AC}$$

Поскольку однопараметрическая оптимизация дает достаточно высокую точность расчетов по любому численному явному методу, то метод, используемый при оптимизации целевой функции (11), не имеет значения.

Численное решение задачи поиска значения  $k_d$  было получено для каталитической системы  $\text{NdCl}_3 - 3\text{ТБФ} - \text{ТОА}$  при  $M(0)=1,5$  моль/л. Данные, приводимые в табл. 1, являются результатами решения обратной кинетической задачи поиска значения константы скорости дезактивации АЦ.

Таблица 1

Результаты решения обратной кинетической задачи поиска значения  $k_d$

$C_{AC}(0)$	$k_p$	$k_M$	$k_d$
0.00065	17.4	0.024	$1 \times 10^{-8}$

Данные из табл. 1 свидетельствуют, что значение  $k_d$  на порядки меньше значений других констант и близко к нулю. Однако только согласованность расчетов системы (7)-(8) с учетом и без учета константы  $k_d$  может доказывать состоятельность гипотезы о наличии стадии дезактивации АЦ в кинетической схеме.

На рис. 1 приведены графические зависимости по конверсии для исследуемой каталитической системы.

Видно, что зависимость по конверсии мономера, рассчитанная с учетом константы скорости дезактивации АЦ, согласована по значениям с конверсией мономера, полученной при постоянном значении кинетической активности полимеризационной системы.

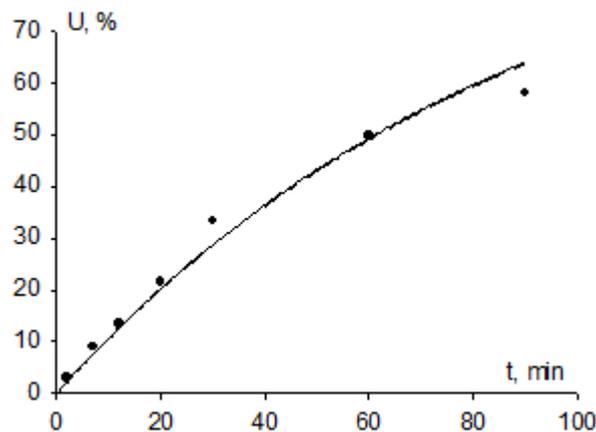


Рис. 1. Графические зависимости по конверсии мономера для каталитической системы  $\text{NdCl}_3 - 3\text{ТБФ} - \text{ТОА}$ . Точками указаны экспериментальные значения. Сплошная и пунктирная линии, соответственно, зависимости  $U(t)$ , полученные без учета и с учетом стадии дезактивации в кинетической схеме процесса полимеризации

Решение обратной кинетической задачи поиска значения константы скорости дезактивации АЦ, представленное на рис. 1, доказывает, что соответствующая стадия может быть исключена из кинетической схемы процесса. Аналогичный вывод может быть получен путем оценки чувствительности модели с использованием методов сопряженных состояний [10]. Таким образом, решена задача детерминизации механизма процесса полимеризации и кинети-

ческая схема полимеризационного процесса для катализаторов Циглера-Натта может быть записана в трех элементарных стадиях (2), (5) и (6).

**Нахождение областей неопределенностей при решении обратных кинетических задач**

Обратные кинетические задачи для процессов полимеризации наряду с целью определения минимально допустимого механизма сводятся к поиску областей неопределенностей значений кинетических констант скоростей элементарных стадий [1,3,5,10]. Связано это, прежде всего, с двумя очень важными обстоятельствами: неполной наблюдаемостью в процессе экспериментальных исследований и большой погрешностью измерения молекулярных показателей (до 10 % и более).

Для процесса полимеризации, представляемого укороченной кинетической схемой (2), (5), (6), искомые константы будут  $C_{AC}(0)$ ,  $k_p$ ,  $k_M$ ,  $k_A$ .

К тому же, фиксируя значение кинетической активности полимеризационной системы  $\alpha$ , можно, варьируя параметр  $k_p$ , напрямую рассчитывать параметр  $C_{AC}(0)$ . Тогда обратная кинетическая задача будет заключаться в поиске соответствующих трех кинетических констант скоростей элементарных стадий.

Поскольку экспериментально получаемыми кривыми являются зависимости по среднечисленной и среднемассовой молекулярным массам, то их можно использовать в качестве целевых функций оптимизационной задачи. Количественной характеристикой образующихся глобул полимера является средняя длина цепи, которую характеризует значение среднечисленной молекулярной массы, именно оно может быть использовано в качестве критерия оптимизации.

Тогда функционал соответствия расчетных и экспериментальных значений среднечисленных молекулярных масс записывается в виде суммы квадратов разностей [3,9]:

$$Z(k_p, k_M, k_A) = \sum_{j=1}^n (Mn_j^{exp} - Mn_j^{calc})^2 \quad (13)$$

Для нахождения значений функционала (13) уравнений в системе (7)-(8) недостаточно, поэтому ее дополняют моментами 1-го и 2-го порядков активных и неактивных цепей:

$$\begin{aligned} \mu_1 &= \sum_{i=2}^{\infty} iR_i, & \mu_2 &= \sum_{i=2}^{\infty} i^2 R_i, \\ \lambda_1 &= \sum_{i=2}^{\infty} iP_i, & \lambda_2 &= \sum_{i=2}^{\infty} i^2 P_i \end{aligned} \quad (14)$$

и приводят к виду:

$$\begin{aligned} \frac{dM}{dt} &= -M(R_1 + \mu_0)(k_{1p} + k_M) \\ \frac{dA}{dt} &= -Ak_{1A}(R_1 + \mu_0) \\ \frac{dR_1}{dt} &= -k_p MR_1 + k_M M\mu_0 + k_A A\mu_0 \\ \frac{dP_1}{dt} &= k_M MR_1 + k_A AR_1 \\ \frac{d\mu_0}{dt} &= k_p MR_1 - k_M M\mu_0 - k_A A\mu_0 \\ \frac{d\mu_1}{dt} &= 2k_p MR_1 + k_p M\mu_0 - k_M M\mu_1 - k_A A\mu_1 \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \frac{d\mu_2}{dt} &= 4k_p MR_1 + k_p M\mu_0 + 2k_p M\mu_1 - k_M M\mu_2 - k_A A\mu_2 \\ \frac{d\lambda_k}{dt} &= k_M M\mu_k + k_A A\mu_k \quad k = 0,1,2 \end{aligned}$$

с начальными данными:

$$\begin{aligned} M^{(0)} &= M(0), A^{(0)} = A(0), R_1^{(0)} = R_1(0), \\ P_1(0) &= \lambda_k(0) = \mu_k(0) = 0, k = 0,1,2 \end{aligned} \quad (16)$$

Согласно статистической теории полимеризации, средние молекулярные массы могут быть найдены как отношения [1]:

$$\begin{aligned} Mn(t) &= m \frac{\mu_1(t) + \lambda_1(t)}{\mu_0(t) + \lambda_0(t)} \\ Mw(t) &= m \frac{\mu_2(t) + \lambda_2(t)}{\mu_1(t) + \lambda_1(t)} \end{aligned} \quad (17)$$

где  $m$  – молекулярная масса мономера.

Применяя численные методы, можно решить обратную кинетическую задачу для процесса полимеризации бутадиена на каталитической системе  $NdCl_3 - 3ТБФ - ТОА$ . Результаты решения приведены в табл. 2 в виде областей неопределенностей по значениям констант.

Таблица 2

Области неопределенностей кинетических констант, найденных при решении обратной кинетической задачи

$C_{AC} \times 10^4$	$k_p$	$k_M$	$k_A$
[4,9;-6,5]	[17,3;-22,9]	[0,021;-0,055]	[1,3;-2,9]

Анализируя данные табл. 2, можно заметить, что часть констант имеет большие значения относительных погрешностей, это можно связать с тем, насколько чувствительны значения среднечисленной молекулярной массы к их изменениям.

Таким образом, решение обратной кинетической задачи поиска областей неопределенно-

стей для кинетических констант скоростей может быть получено путем многократного решения системы дифференциальных уравнений (15) с начальными данными (16) при различных исходных модельных значениях кинетических констант скоростей элементарных стадий, входящих в кинетическую схему процесса.

### Определение базисных функций и локализация участков исходных значений кинетических констант

Поиск оптимального набора кинетических констант неизменно ведет к множественным вычислительным экспериментам [5,9]. Связано это с тем, что задачи многокритериальной и многопараметрической оптимизации для полимеризационных процессов относятся к классу некорректно-поставленных задач, что, в свою очередь, ведет к значительным неопределенностям при поиске оптимизируемых параметров [1].

С этой целью выстраиваются алгоритмы и способы разделения задач на подзадачи, методы предварительной локализации участков допустимых значений оптимизируемых констант или методы сужения областей неопределенностей искомым параметров.

Одним из методов описания предварительной кинетики процесса является метод определения базисных функций [8].

Для его реализации рассматривается математическая модель процесса в виде системы дифференциальных уравнений (15). Поскольку метод аналитический, то находятся вектор-функции системы:

$$f_1 = (M', A', \lambda), f_2 = (R_1, \mu_0) = y, \quad (18)$$

$$k' = (k_p, k_M, k_A, \varepsilon_1, \varepsilon_2) \quad (19)$$

и матрица  $U$  как

$$U = \frac{\partial f_1}{\partial k'} - \frac{\partial f_1}{\partial y} \left[ \frac{\partial f_2}{\partial y} \right]^{-1} \frac{\partial f_2}{\partial k'} \quad (20)$$

Анализ последней позволяет выделить линейно независимые столбцы, которые и представляют собой искомым базис процесса:

$$\rho_1(k') = k_A(1 + \varepsilon_2), \quad (21)$$

$$\rho_2(k') = k_p(1 + \varepsilon_1)k_M(1 + \varepsilon_1). \quad (22)$$

Базисные функции (21)-(22) показывают, что рассматриваемый полимеризационный процесс зависит от двух исходных веществ –

$M$  и  $A$ , с которыми связаны, соответственно, произведение кинетических констант  $k_p, k_M$  и одна кинетическая константа  $k_A$ .

Переходя к поверхности на рис. 2, представляемой значениями функционала (13) и построенной на векторах базисных функций (21)-(22), можно получить картину ее локальных изменений в зависимости от задаваемых значений кинетических констант скоростей элементарных стадий процесса полимеризации.

Рис. 2 показывает изменение линий уровня поверхности. Видны контуры изменения и локализация максимумов функции, то есть, практически, те значения кинетических констант, которые могут быть исключены из области допустимости получаемых в дальнейшем решений обратной кинетической задачи.

Следует отметить, что задача алгоритмически разрешима при любом размахе варьирования значений кинетических констант, к тому же точность локализации будет выше с задаваемым увеличением точности изменения значений самих констант.

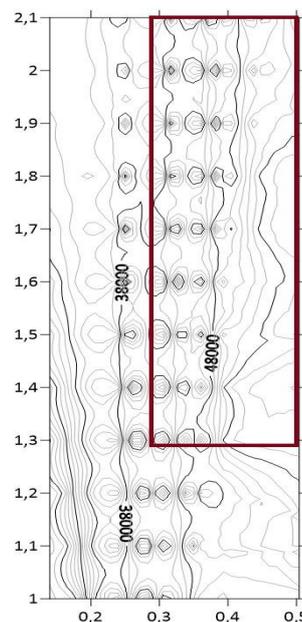


Рис. 2. Базисная поверхность, рассчитанная на области определения  $(k_p, k_M) \times k_A$ :  $([10;30] \cdot [0.014;0.038]) \times [1.0;2.1]$

Следовательно, определяя базисные нелинейные параметрические функции процесса, можно перейти к построению базисной поверхности и нахождению участков допустимых решений обратных кинетических задач.

### Выводы

Исследования процессов полимеризации в большинстве своем сводятся к определению кинетики процесса и нахождению минимального набора кинетических параметров [1, 8, 9], влияющих на поведение молекулярных характеристик и соответственно связанных с ними физико-механических параметров полимера в условиях производства, что всегда является конечной целью моделирования.

Основной кинетической кривой, получаемой в ходе натурального эксперимента, является кривая молекулярно-массового распределения. Ее количественные показатели, такие как среднечисленная и среднемассовая молекулярные массы характеризуют статистическую длину цепи и массу готового полимерного продукта, поэтому именно они используются в качестве идентификаторов при нахождении значений кинетических констант скоростей элементарных стадий. Указанные константы являются частью кинетической модели, предопределяют всю кинетику и характеризуют механизм полимеризационного процесса.

### Литература

1. Подвальный С.Л. Моделирование промышленных процессов полимеризации. М.: Химия, 1979. 350 с.
2. Синтетический каучук / под ред. И.В. Гармонова. Изд. 2-е. Л.: Химия, 1983. 559 с.
3. О решении обратной задачи формирования молекулярно-массовых распределений при ионно-

координационной полимеризации / Т.С. Усманов, И.К. Гатауллин, С.М. Усманов, С.И. Спивак, Ю.Б. Монаков // Доклады АН. 2002. Т. 385. № 3. С. 368–371.

4. Монаков Ю.Б., Муллағалиев И.Р., Харитоновна Е.Ю. Кинетические параметры полимеризации бутадиена на каталитической системе  $\text{VOCl}_3$  – диалкилмагнии // Высокомолекулярные соединения. Сер. А. 2002. Т. 44. № 2. С. 220–225.

5. Гатауллин И.К. Математическое моделирование кинетически неоднородных неодимсодержащих каталитических систем в ионно-координационной полимеризации бутадиена: автореф. дис. ... канд. хим. наук: 02.00.17. Уфа, 2004. 22 с.

6. Математическое моделирование процесса синтеза бутадиенового каучука на неодимсодержащей каталитической системе / Г.А. Аминова, Г.В. Мануйко, В.В. Бронская, Т.В. Игнашина, А.И. Исмагилова, Г.С. Дьяконов // Высокомолекулярные соединения. Сер. А. 2006. Т. 48. № 8. С. 1495–1501.

7. Кинетическая неоднородность активных центров при полимеризации бутадиена на титансодержащих катализаторах / И.Р. Мирғалиева, И.Р. Муллағалиев, Е.А. Глухов, Ю.Б. Монаков // Известия ВУЗов. Химия и химическая технология. 2008. Т. 51. Вып. 6. С. 72–75.

8. Хурсан С.Л., Исмагилова А.С., Ахметьянова А.И. Определение базиса гомодесмотических реакций циклических органических соединений с использованием теории графов // Журнал физической химии. 2018. Т. 92. № 7. С. 1076–1085.

9. Гиззатова Э.Р., Подвальный С.Л., Спивак С.И. Поиск кинетических констант при моделировании процессов полицентровой безобрывной полимеризации диенов // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2020. Т. 16. № 5. С. 14–18.

10. Подвальный С.Л. Многоальтернативное управление экспериментом с использованием моделей сопряженных систем // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2016. Т. 12. № 4. С. 19–25.

Поступила 08.01.2021; принята к публикации 18.02.2021

### Информация об авторах

**Гиззатова Эльвира Раисовна** – д-р физ.-мат. наук, профессор, Стерлитамакский филиал Башкирского государственного университета (453103, Россия, Республика Башкортостан, г. Стерлитамак, проспект Ленина, 49), e-mail: makella@rambler.ru, тел.: +7(917)424-15-55

**Исмагилова Альбина Сабирьяновна** – д-р физ.-мат. наук, доцент, заведующий кафедрой управления информационной безопасностью, Башкирский государственный университет (450076, Россия, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Заки Валиди, 32), e-mail: ismagilovaas@yandex.ru, тел.: +7(917)787-33-55

**Подвальный Семен Леонидович** – д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: spodvalny@yandex.ru, тел. +7(929)011-21-53

## SEARCH FOR UNCERTAINTY REGIONS OF KINETIC CONSTANTS IN MODELING PROCESSES OF NON-BREAK POLYMERIZATION OF DIENES

E.R. Gizzatova<sup>1</sup>, A.S. Ismagilova<sup>2</sup>, S.L. Podvalny<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Sterlitamak Branch of Bashkir State University, Sterlitamak, Bashkortostan Republic, Russia

<sup>2</sup>Bashkir State University, Ufa, Bashkortostan Republic, Russia

<sup>3</sup>Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

**Abstract:** this paper considers the processes of polymerization on Ziegler-Natta catalysts. The question of the mechanism of the processes as a necessary set of elementary stages of the kinetic scheme is investigated. A general scheme of the permissible stages of the process is given, including the stages of initiation, chain growth, chain transfers and chain termination. It is indicated that part of the elementary reactions can be removed from the kinetic scheme due to the method of preparation of the catalyst itself, and part on the basis of the obtained kinetic dependences. However, the hypothesis about the presence or absence of elementary stages can be proved not only experimentally but also computationally. The tabular data presented in the work indicate a practically zero value of the rate constant of the elementary stage of material chain termination - deactivation of active centers, which, in turn, leads to optimization of the kinetic scheme. Then the processes under consideration can be attributed to the type of non-break polymerization. Compilation of kinetic and mathematical models for the processes under study makes it possible to pose direct and inverse kinetic problems. The solution of the latter can be obtained by the method of multiple solution of direct kinetic problems and comparison of the calculated values of molecular characteristics with their experimental counterparts. However, it is more expedient to carry out the preliminary stage of finding the regions of local minima by the optimized values of the constants by constructing the base surface. When searching for admissible sets of values of the rate constants, operate with the found areas of minima

**Key words:** polymerization, kinetical modeling, mathematical model, kinetic constants, method of moments

### References

1. Podvalny S.L. "Industrial polymerization process modeling" ("Modelirovanie promyshlennykh protsessov polimerizatsii"), Moscow, Khimiya, 1979, 350 p.
2. Garmonov I.V. ed. "Syntetical rubber" ("Sinteticheskiy kauchuk"), Leningrad, Khimiya, 1983, 559 p.
3. Usmanov T.S., Monakov Yu.B., Gataullin I.K., Usmanov S.M., Spivak S.I. "Solution of the inverse problem on the formation of molecular-weight distributions in ionic-coordination polymerization", *Reports of Academy of Science (AN)*, 2002, vol. 385, no. 3, pp 368-371.
4. Monakov Yu.B., Mullagaliev I.R., Kharitonova E.Yu "The kinetic parameters of butadiene polymerization with a  $\text{VOCl}_3$ -dialkylmagnesium catalyst system", *High Molecular Weight Compounds (Vysokomolekulyarnye soedineniya)*, 2002, vol. 44, no. 2, pp. 220-225.
5. Gataullin I.K. "Mathematical modeling of kinetically inhomogeneous neodim-based catalytic systems in ion-coordination polymerization of butadiene" ("Matematicheskoe modelirovanie kineticheski neodnorodnykh neodimsoderzhashchikh kataliticheskikh sistem v ionno-koordinatsionnoy polimerizatsii butadiena"), Cand. of Chemical Sci. diss., 02.00.17, Ufa, 2004, 22p.
6. Aminova G.A., Manuyko G.V., Bronskaya V.V., Ignashina T.V., Ismagilova A.I., D'yakonov G.S. "Mathematical modeling of butadiene rubber synthesis process on neodymium-containing catalyst system", *High Molecular Weight Compounds (Vysokomolekulyarnye soedineniya)*, 2006, vol. 48, no. 8, pp. 1495-1501.
7. Mirgalieva I.R., Mullagaliev I.R., Glukhov E.A., Monakov Yu.B. "Kinetic heterogeneity of active centers at butadiene polymerization on titanium containing catalytic systems", *Russian Journal of Chemistry and Chemical Technology (Izvestiya VUZov. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya)*, 2008, vol. 51, no. 6, pp. 72-75.
8. Khursan S.L., Ismagilova A.S., Akhmetyanova A.I. "Determining the basis of homodesmotic reactions of cyclic organic compounds by means of graph theory", *Russian Journal of Physical Chemistry (Zhurnal fizicheskoy khimii)*, 2018, vol. 92, no. 7, pp. 1076-1085.
9. Gizzatova E.R., Podvalny S.L., Spivak S.I. "Search for kinetic constants in modeling the processes of polycenters non-break polymerization of dienes", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2020, vol. 16, no. 5, pp 14-18.
10. Podvalny S.L. "Multialternative control of the experiment using conjugated systems", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2016, vol.12, no. 4, pp. 19-25.

Submitted 08.01.2021; revised 18.02.2021

### Information about the authors

**Elvira R. Gizzatova**, Dr. Sc. (Physics and Mathematics), Starlitamak Branch of Bashkir State University (49 Prospekt Lenina, Sterlitamak 453103, Bashkortostan Republic, Russia), e-mail: makella@rambler.ru, tel.: +7(917)424-15-55  
**Al'bina S. Ismagilova**, Dr. Sc. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Bashkir State University (32 Zaki Validi str., Ufa 450076, Bashkortostan Republic, Russia), e-mail: ismagilovaas@rambler.ru, tel.: +7(917)787-33-55  
**Semyon L. Podvalny**, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: spodvalny@yandex.ru, tel. +7(929)011-21-53

## РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ ГЕОИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА РАБОТЫ ТОРГОВЫХ ПРЕДСТАВИТЕЛЕЙ В ГРУППЕ КОМПАНИЙ «ЭФКО»

В.С. Кудряшов<sup>1</sup>, М.В. Алексеев<sup>1</sup>, А.В. Иванов<sup>1</sup>, В.В. Портнов<sup>2</sup>,  
Е.В. Князева<sup>3</sup>, О.А. Орловцева<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Воронежский государственный университет инженерных технологий, г. Воронеж, Россия

<sup>2</sup>Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

<sup>3</sup>АО «Управляющая компания «ЭФКО», г. Воронеж, Россия

<sup>4</sup>Московский государственный университет технологий и управления имени К.Г. Разумовского (Первый казачий университет), г. Москва, Россия

**Аннотация:** статья посвящена решению задач разработки геоинформационной системы (ГИС), позволяющей использовать данные GPS на карманных персональных компьютерах (КПК) сотрудников для формирования отчета посещений ими торговых точек, заданных по плану, и просмотра отклонений от маршрута. В структуре АО «Управляющая компания «ЭФКО» для работы в отделе продаж и логистики используется система КРІ (на базе 1С), позволяющая организовать деятельность ее торговых сотрудников путем сбора и анализа различных показателей. В частности, организована работа супервайзеров, мерчендайзеров, а также территориальных и региональных менеджеров. Для того чтобы территориальные менеджеры и супервайзеры могли работать не только за компьютером, но и непосредственно во время посещения самих торговых точек, делать заказ для контрагента не на бумаге, а сразу внося в программу, необходимо реализовать связь между 1С КРІ и мобильным приложением ST-Mobile, разработанным специально для этих целей. Сотрудники должны иметь возможность записывать текущие данные в систему по посещаемым торговым точкам, заполнять документы по предзаказам торговых точек для дальнейшей поставки, проверять наполнение полок продукцией компании. Целью разработки ГИС является организация оперативного обмена данными между учетной системой и КПК сотрудников. Данные GPS с КПК сотрудника сравниваются с данными GPS, установленными в справочнике «Торговые точки», для создания отчета «Фактический маршрут агента», из которого будет понятно, посетил сотрудник торговую точку из своего маршрута или нет и насколько большим было отклонение от маршрута. Приводится краткое описание корректировки программного обеспечения в режиме «Конфигуратор 1С», разработанных процедур и функций на java-script. Предложенные решения позволяют выбирать на карте торговую точку, а также формировать задание на маршрут сотрудника по торговым точкам, прорисовывать на карте (по данным GPS) фактический маршрут сотрудника и указатели посещаемости торговых точек. Разработанная ГИС внедрена на АО «Управляющая компания «ЭФКО» в отделе продаж и логистики

**Ключевые слова:** геоинформационная система, логистика, GPS-данные, мониторинг работы сотрудников

### Введение и постановка задачи

В настоящее время торговым и промышленным предприятиям весьма важно решение следующих задач:

- всесторонний контроль за выполнением логистических маршрутов;
- автоматизация определения подходящей стоимости выполнения заказа;
- контроль и расширение базы данных перевозчиков;
- оценка правильности работы отдела логистики;
- решение транспортных задач.

Совершенствование систем управления транспортировкой в логистике тесно взаимосвязано с внедрением телематических и аналитических технологий, которые способствуют

повышению эффективности принимаемых решений на оперативном, тактическом и стратегическом уровнях [1].

Для обеспечения эффективного функционирования логистических компаний необходимо использовать современные методы управления, совершенствовать процессы координации в логистических цепях, а также разрабатывать и внедрять передовые информационные технологии, обеспечивающие поддержку всех ключевых процессов управления компанией и ее интеграции с партнерами в процессе товародвижения [2-5].

В структуре АО «Управляющая компания «ЭФКО» для работы в сфере продаж и логистики используется система КРІ (на базе 1С), позволяющая организовать деятельность ее торговых сотрудников путем сбора и анализа различных показателей. В частности, организована работа супервайзеров, мерчендайзеров, а также территориальных и региональных ме-

неджеров. Для того чтобы территориальные менеджеры и супервайзеры могли работать не только за компьютером, но и непосредственно во время посещения самих торговых точек, делать заказ для контрагента не на бумаге, а сразу внося в программу, необходимо реализовать связь между 1С КРП с конфигурацией “Управление торговлей” и мобильным приложением ST-Mobile, разработанным специально для этих целей. Сотрудники должны иметь возможность записывать текущие данные в систему по посещаемым торговым точкам, заполнять документы по предзаказам торговых точек для дальнейшей поставки, проверять наполнение полок продукцией компании.

### Результаты

В работе приводится краткое описание корректировки программного обеспечения в режиме “Конфигуратор 1С”, разработанных

процедур и функций на java-script [6,7].

Система КРП используется для достижения следующих целей:

- формирование состава и плановых значений показателей эффективности работы сотрудников службы продаж;
- ежедневный учет выполнения показателей работы сотрудников на территориях;
- предоставление возможности оперативного анализа выполнения показателей в торговых домах;
- предоставление возможности анализа достижения показателей консолидировано по холдингу;
- предоставление руководителям службы продаж возможности оперативной постановки задач для рядовых сотрудников.

Для этого организуется оперативный обмен данными между учетной системой и карманными персональными компьютерами (КПК) рядовых сотрудников (рис. 1).

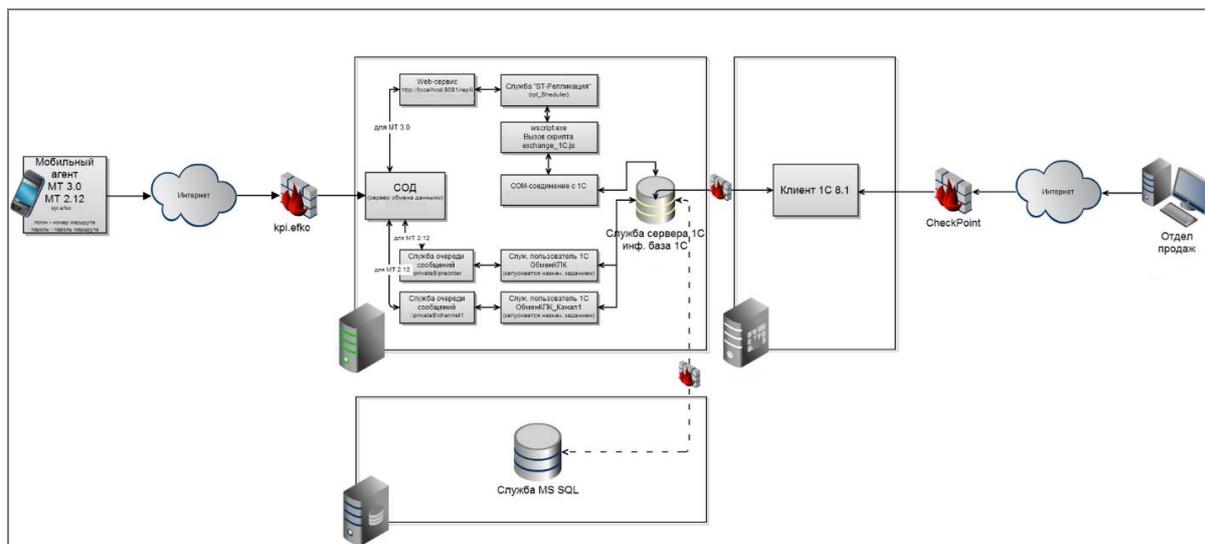


Рис. 1. Схема оперативного обмена данными

Перед началом работы торговых представителей требуется сформировать маршруты

посещений торговых точек (рис. 2).

Справочник Маршруты									
Код К...	Наименов...	Агент	Цепочка докумен...	Категория прав	Комментарий	Версия МТ	Роль маршрута	Территория ТМ	
76	M75								
1	M001		Все документы	Все	Алексеевка	3.0	Торговый пре...	Белгородская обл.	
2	M002		Все документы	Все	Алексеевка	3.0	Торговый пре...	Белгородская обл.	
3	M003		Все документы	Все	Алексеевка	3.0	Торговый пре...	Белгородская обл.	
4	M004		Все документы	Все	Брянск	3.0	Торговый пре...	Брянская обл.	
7	M007		Все документы	Все	Алексеевка	3.0	Торговый пре...	Белгородская обл.	
9	M009		Все документы	Все	Брянск	3.0	Торговый пре...	Брянская обл.	

Рис. 2. Справочник “Маршруты”

Для мониторинга работы сотрудников организуется связь программы 1С с GPS-данными КПК сотрудников, чтобы проследить выполнение их ежедневных маршрутов, а также создать отчет, позволяющий наглядно видеть на карте маршрут, совершенный сотрудником за день, отклонения от маршрута, посещаемость и непосещаемость торговых точек. На основании этих данных прослеживается работа сотрудника, считается его заработная плата.

Еще одной важной доработкой является определение координат торговых точек. К справочнику “Торговые точки” присоединяется карта, чтобы по нажатию на участок карты координаты торговой точки определялись автоматически и запоминались в справочнике. В дальнейшем это понадобится для отслеживания маршрута сотрудника.

Каждому сотруднику формируется свой маршрут – список торговых точек (рис. 3), которые он должен посетить за рабочий день.

Данные GPS с КПК сотрудника сравниваются с данными GPS, установленными в справочнике “Торговые точки”, для создания отчета “Фактический маршрут агента”, из которого будет понятно, посещал сотрудник торговую точку из своего маршрута или нет, и насколько большим было отклонение от маршрута.

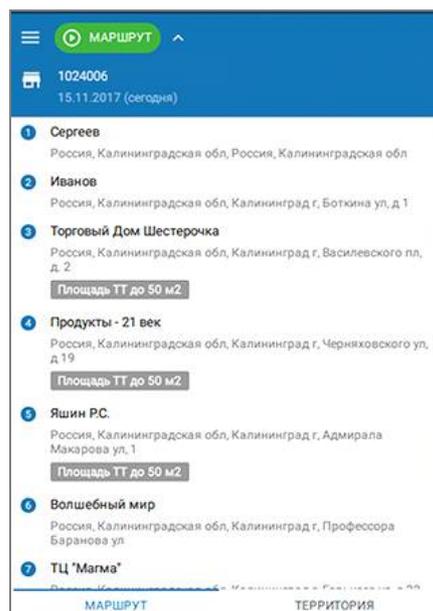


Рис. 3. Маршрут сотрудника

Для решения поставленных задач (отображения торговых точек, отслеживания координат агентов системой GPS и формирования отчетов) вносятся доработки в режиме “Конфигуратор 1С” [8, 9].

Разработана процедура `ПолеHTMLonhelp` (Элемент, `pEvtObj`), возвращающая координаты долготы и широты в массив данных (данные должны быть в формате HTML) (рис. 4).

```

Перем флКоординатыТочкиИзменены; //булево
Процедура ПолеHTMLonhelp(Элемент, pEvtObj)
    Попытка
        htmlElement = pEvtObj.srcElement;
        NewCoord = htmlElement.document.body.NewCoord;
        pEvtObj.returnValue = Ложь;
    Исключение
        Возврат;
    КонецПопытки;
    Если NewCoord = "" Тогда
        Возврат;
    Иначе
        флКоординатыТочкиИзменены = Истина;
    КонецЕсли;
    МассивКоординат = ЕСОД.РазложитьСтрокуПоРазделителю(NewCoord, ",");
    Если МассивКоординат.Количество() < 2 Тогда
        Возврат;
    КонецЕсли;
    ЭтаФорма.Долгота = МассивКоординат[0];
    ЭтаФорма.Широта = МассивКоординат[1];
КонецПроцедуры

```

Рис. 4. Процедура возврата координат в файл HTML

Для определения новых координат составлена функция на java-script, которая будет использована в HTML-файле с подгруженными скриптами и функциями Яндекс-карт.

Функция определения новых координат реализуется следующим образом:

- после загрузки окна создается экземпляр Яндекс-карт;
- устанавливается центр карты (setCenter);

```

window.onload = function ()
{
    var map = new YMaps.Map(document.getElementById("YMapsID"));
    map.setCenter(new YMaps.GeoPoint(#Координаты#, 16);
    map.addControl(new YMaps.TypeControl());
    map.addControl(new YMaps.ToolBar());
    map.addControl(new YMaps.Zoom());
    map.addControl(new YMaps.ScaleLine());
    var point = new YMaps.GeoPoint(#Координаты#);
    var placemark = new YMaps.Placemark(point, {draggable: 1, style:"default#bluePoint", hideIcon: false});
    placemark.name = 'point_position';
    placemark.description = '#ИмяТорговойТочки#';
    map.addOverlay(placemark);
    YMaps.Events.observe(placemark, placemark.Events.PositionChange, getCoord
}

// Функция для вычисления новых координат
function getCoord(obj) {
    map.setCenter(obj.newPoint);
    //передаем координаты через событие onHelp()
    var evt = document.createEventObject();
    document.body.NewCoord = obj.newPoint.toString();
    document.body.fireEvent('onhelp', evt);
    return;
}
    
```

Для формирования геоинформационных отчетов (с возможностью сохранить карту в файл) по данным, полученным с КПК сотруд-

- добавляются элементы управления картой (зум, панель инструментов, шкала увеличения);

- вводится перемещаемая точка с названием "ИмяТорговойТочки";

- при её перемещении вычисляются новые координаты (с помощью функции setCenter точка меняет координаты):

ников, разработана следующая процедура (рис. 5).

```

ЗапуститьSTLocatorЧерезфайлHtml = эПолучитьНастройку("ЗапуститьSTLocatorЧерезфайлHtml", "Булево");
ЗапуститьSTLocatorЧерезБраузер = эПолучитьНастройку("ЗапуститьSTLocatorЧерезБраузер", "Булево");

Если ЗапуститьSTLocatorЧерезфайлHtml Или ЗапуститьSTLocatorЧерезБраузер Тогда
    ТекстДок = Новый ТекстовыйДокумент;
    ТекстДок.УстановитьТекст(ТекстHTML);

    Если ЗапуститьSTLocatorЧерезфайлHtml Тогда
        Диалог = Новый ДиалогВыбораФайла(РежимДиалогаВыбораФайла.Сохранение);
        Диалог.Заголовок = "Сохранить карту в файл";

        Диалог.Фильтр = "Карта (*.html)|*.html";

        Если Диалог.Выбрать() Тогда
            Имяфайла = Диалог.ПолноеИмяфайла;

            ТекстДок.Записать(Имяфайла);

            Сообщить("Откройте сохраненный файл с помощью браузера Google Chrome или Firefox Mozilla, щелкнув правой кнопкой мыши по файлу");
        КонецЕсли;
    КонецЕсли;

    Если ЗапуститьSTLocatorЧерезБраузер Тогда
        Имяфайла = ПолучитьИмяВременногоФайла("html");

        ТекстДок.Записать(Имяфайла);

        ЗапуститьПриложение(Имяфайла);
    КонецЕсли;
КонецЕсли;
    
```

Рис. 5. Процедура формирования отчета

После доработки ГИС появилась возможность выбирать на карте торговую точку и ставить флажок (в результате координаты торговой точки записываются в поля «Широта» и

«Долгота») (рис. 6), а также формировать задание на маршрут сотрудника по торговым точкам.

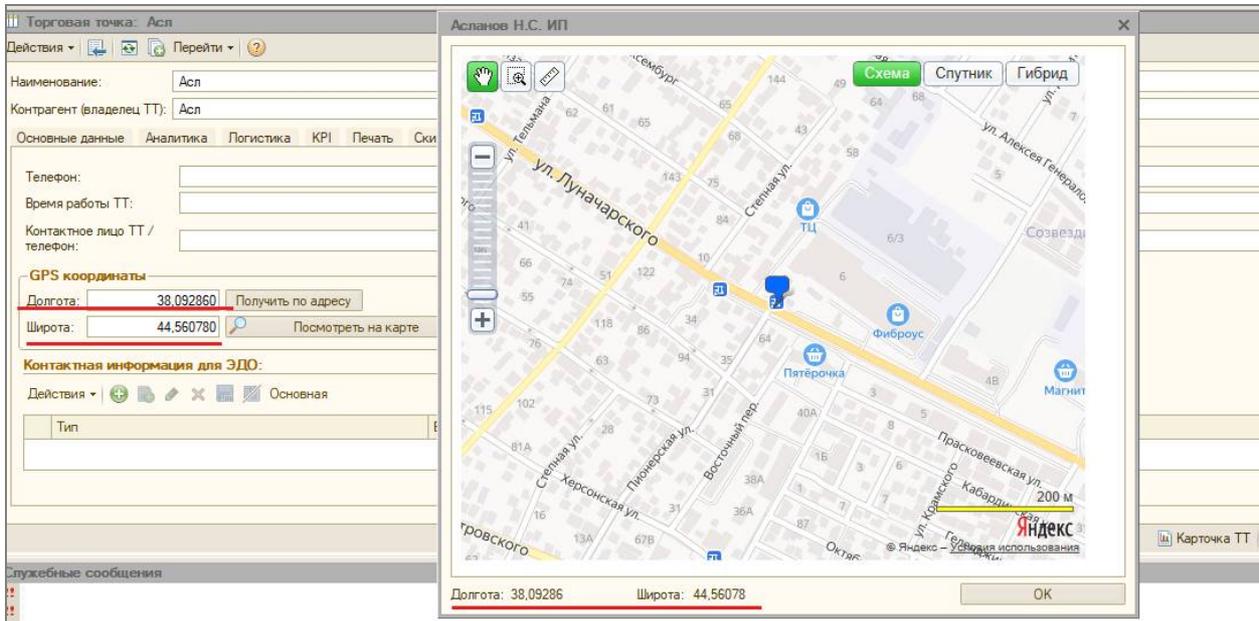


Рис. 6. Карта справочника “Торговые точки”

При получении отчета (по данным GPS) на карте прорисовывается фактический маршрут

агента и указатели посещаемости торговых точек (рис. 7).

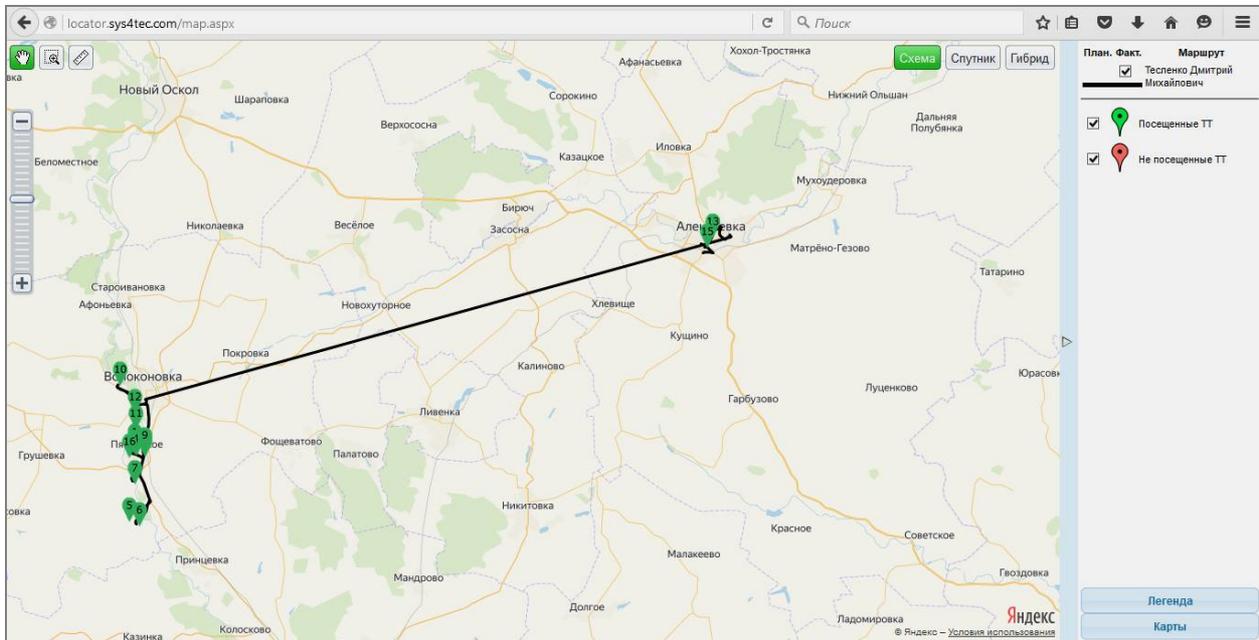


Рис. 7. Отчет “Фактический маршрут агента” на Яндекс-карте

## Выводы

Разработана ГИС, позволяющая использовать данные GPS на КПК сотрудников для формирования отчета посещений ими торговых точек, заданных по плану, и просмотра отклонений от маршрута [6,7].

Система дает возможность руководителям формировать план посещений торговых точек, оценивать результаты работы отдельных сотрудников, основываясь на данных ГИС. На основании чего сотрудникам устанавливается заработная плата, премии или штрафы (за невыполнение нужного объема работы).

Разработанная ГИС внедрена на АО «Управляющая компания «ЭФКО» в отделе продаж и логистики.

## Литература

1. Герами В.Д., Колик А.В. Управление транспортными системами. Транспортное обеспечение логистики. М.: Издательство Юрайт, 2015. 510 с.

2. Гиниятуллина О.Л., Хорошева Т.А. Геоинформационные системы: учеб. пособие. Кемерово: Кемеровский государственный университет, 2018. 122 с.

3. Новохатин В.В., Шепелева Н.А. ГИС-технологии в сервисе: учеб. пособие. Тюмень: Тюменский государственный университет, 2014. 129 с.

4. Shashi Shekar, Hui Xiong. Encyclopedia of GIS. New York, 2008. 1370 p.

5. Campbell J.B. Introductory Digital Image Processing. Fifth Edition. New York, 2011. 667 p.

6. Князева Е.В., Алексеев М.В. Использование геоинформационных технологий для контроля работы сотрудников в АО «Управляющая компания «ЭФКО» // Материалы студенческой научной конференции за 2019 год. В 2 ч. Воронеж: ВГУИТ, 2019. Ч. 2. С. 293.

7. Князева Е.В., Алексеев М.В. Поддержка информационной системы торговли на платформе 1С // Материалы студенческой научной конференции за 2020 год. В 2 ч. Воронеж: ВГУИТ, 2020. Ч. 2. С. 55.

8. Радченко М.Г., Хрусталева Е.Ю. Архитектура и работа с данными «1С: Предприятие 8.2». М.: ООО «1С-Паблишинг», 2011. 268 с.

9. Кутепов В.А. 1С Предприятие 8.0: Управление торговлей. М.: Лаборатория книги, 2010. 146 с.

Поступила 14.10.2020; принята к публикации 19.02.2021

## Информация об авторах

**Кудряшов Владимир Сергеевич** - д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры информационных и управляющих систем, Воронежский государственный университет инженерных технологий (394036, Россия, г. Воронеж, проспект Революции, 19), e-mail: kudryashovvs@mail.ru, тел. 8-920-446-92-63

**Алексеев Михаил Владимирович** – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры информационных и управляющих систем, Воронежский государственный университет инженерных технологий (394036, Россия, г. Воронеж, проспект Революции, 19), e-mail: mwa1976@mail.ru, тел. 8-950-752-42-86

**Иванов Андрей Валентинович** – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры информационных и управляющих систем, Воронежский государственный университет инженерных технологий (394036, Россия, г. Воронеж, проспект Революции, 19), e-mail: andrious@rambler.ru, тел. 8-920-402-49-99

**Портнов Владимир Васильевич** – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры теоретической и промышленной теплоэнергетики, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: g\_beard@mail.ru, тел. 8-908-132-09-38

**Князева Елизавета Владимировна** - инженер-программист, АО «Управляющая компания «ЭФКО» (394018, Россия, г. Воронеж, ул. Таранченко, 40), e-mail: lizzynet@yandex.ru, тел. 8-962-327-12-43

**Орловцева Ольга Александровна** – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры технологии переработки зерна, хлебопекарного, макаронного и кондитерского производств, Московский государственный университет технологий и управления имени К.Г. Разумовского (Первый казачий университет) (109004, Россия, г. Москва, ул. Земляной Вал, 73), e-mail: starosta1981@inbox.ru. тел. 8-985-753-08-04

## DEVELOPMENT AND APPLICATION OF A GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEM FOR MONITORING THE WORK OF SALES REPRESENTATIVES IN THE “EFKO” GROUP OF COMPANIES

V.S. Kudryashov<sup>1</sup>, M.V. Alekseev<sup>1</sup>, A.V. Ivanov<sup>1</sup>, V.V. Portnov<sup>2</sup>, E.V. Knyazeva<sup>3</sup>, O.A. Orlovtsseva<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Voronezh State University of Engineering Technologies, Voronezh, Russia

<sup>2</sup>Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

<sup>3</sup>JSC «Management company «EFKO», Voronezh, Russia

<sup>4</sup>K.G. Razumovsky Moscow State University of Technologies and Management (First Cossack University), Moscow, Russia

**Abstract:** the article is devoted to solving the problems of developing a geographic information system (GIS), which allows the use of GPS data on pocket personal computers (PPC) of employees to generate a report of their visits to outlets specified according to the plan, and to view deviations from the route. In the structure of EFKO Management Company, the KPI system (based on 1C) is used for work in the sales and logistics department, which allows organizing the activities of its sales staff by collecting and analyzing various indicators. In particular, the work of supervisors, merchandisers, as well as territorial and regional managers was organized. In order to provide the work of territorial managers and supervisors not only at the computer but also directly during visiting the outlets, to place an order for the counterparty not on paper but immediately enter into the program, it is necessary to implement a connection between 1C KPI and the ST-Mobile application, developed specifically for this purpose. Employees should be able to record current data into the system on visited outlets, fill out documents for pre-orders of outlets for further delivery, check the filling of the shelves with the company's products. The purpose of the GIS development is to organize the operational data exchange between the accounting system and the employees' PPC. The GPS data from the employee's PPC is compared with the GPS data set in the "Outlets" directory to create the "Agent's actual route" report, from which it will be clear whether the employee visited the outlet from his route or not, and how large the deviation from the route was. The paper provides a brief description of the software correction in the 1C Configurator mode, the developed procedures and functions in java-script. The proposed solutions allow one to select a point of sale on the map, as well as form a task for an employee's route to points of sale, to draw on the map (according to GPS data) the actual route of the employee and indicators of attendance at retail outlets. The developed GIS was implemented at EFKO Management Company in the sales and logistics department

**Key words:** geographic information system, logistics, GPS data, employee performance monitoring

### References

1. Gerami V.D., Kolik A.V. "Transport systems management. Transport logistics" ("Upravlenie transportnymi sistemami. Transportnoe obespechenie logistiki"), Moscow, Yurayt, 2015, 510 p.
2. Giniyatullina O.L., Khorosheva T.A. "Geoinformation systems" ("Geoinformatsionnye sistemy"), Kemerovo State University, 2018, 122 p.
3. Novokhatin V.V., Shepeleva N.A. "GIS technologies in service" ("GIS-tekhnologii v servise"), Tyumen State University, 2014, 129 p.
4. Shashi Shekar, Hui Xiong "Encyclopedia of GIS", New York, 2008, 1370 p.
5. Campbell J.B. "Introductory digital image processing", New York, 2011, 667 p.
6. Knyazeva E.V., Alekseev M.V. "The use of geoinformation technologies to control the work of employees in JSC "Management company "EFKO", *Materials of the Student Scientific Conf. (Materialy studencheskoy nauchnoy konferentsii za 2019 god)*, VSUIT, 2019, part 2, p. 293.
7. Knyazeva E.V., Alekseev M.V. "Support of the trading information system on the 1C platform", / *Materials of the Student Scientific Conf. (Materialy studencheskoy nauchnoy konferentsii za 2020 god)*, VSUIT, part 2, 2020, p. 55.
8. Radchenko M.G., Khrustaleva E.Yu. "Architecture and work with data «1C: Enterprise 8.2»" ("Arkhitektura i rabota s dannymi «1S: Predpriyatie 8.2»"), Moscow, 1C-Publishing, 2011, 268 p.
9. Kutepov V.A. "1C Enterprise 8.0: Trade Management" ("1S Predpriyatie 8.0: Upravlenie trgovley"), Moscow, Laboratoriya knigi, 2010, 146 p.

Submitted 14.10.2020; revised 19.02.2021

### Information about the authors

**Vladimir S. Kudryashov**, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State University of Engineering Technologies (19 Revolutsii Avenu, Voronezh 394036, Russia), e-mail: kudryashovvs@mail.ru, tel. +7-920-446-92-63  
**Mikhail V. Alekseev**, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State University of Engineering Technologies (19 Revolutsii Avenu, Voronezh 394036, Russia), e-mail: mwa1976@mail.ru, tel. +7-950-752-42-86  
**Andrey V. Ivanov**, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State University of Engineering Technologies (19 Revolutsii Avenu, Voronezh 394036, Russia), e-mail: andrious@rambler.ru, tel. +7-920-402-49-99  
**Vladimir V. Portnov**, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: g\_beard@mail.ru, tel. +7-908-132-09-38  
**Elizaveta V. Knyazeva**, software engineer, JSC «Management company «EFKO» (40 Taranchenko st., Voronezh 394018, Russia), e-mail: lizzynet@yandex.ru, tel. +7-962-327-12-43  
**Ol'ga A. Orlovteva**, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, K.G. Razumovsky Moscow State University of Technologies and Management (First Cossack University) (73 Zemlyanoy Val st., Moscow 109004, Russia), e-mail: starosta1981@inbox.ru, tel. +7-985-753-08-04

## АНАЛИЗ МЕТОДИК РАСЧЕТА ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ В СИСТЕМАХ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ТЕПЛОНАПРЯЖЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

С.В. Бородкин<sup>1</sup>, А.В. Иванов<sup>1</sup>, И.Л. Батаронов<sup>2</sup>, А.В. Кретинин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж, Россия

<sup>2</sup>Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** на основе уравнений теплопереноса в движущейся среде и соотношений теплопередачи в термоэлектрическом охладителе приведен сравнительный анализ методик расчета поля температуры в теплонапряженном элементе. Рассмотрены методики на основе: 1) теплового баланса, 2) среднего коэффициента теплоотдачи, 3) дифференциального коэффициента теплоотдачи, 4) прямого расчета в рамках метода конечных элементов. Установлено, что первые две методики не дают адекватного распределения поля температур, но могут быть полезны для определения принципиальной возможности заданного охлаждения с использованием термоэлектрических элементов. Последние две методики позволяют корректно рассчитать температурное поле, но для использования третьей методики необходим дифференциальный коэффициент теплоотдачи, который может быть найден из расчета по четвертой методике. Сделан вывод о необходимости комбинированного использования методик в общем случае. Методы теплового баланса и среднего коэффициента теплоотдачи позволяют определить принципиальную возможность использования термоэлектрического охлаждения конкретного теплонапряженного элемента (ТЭ). Реальные параметры системы охлаждения должны определяться в рамках комбинации методов дифференциального коэффициента теплоотдачи и конечных элементов (МКЭ). Первый из них позволяет определить теплонапряженные области и рассчитать параметры системы охлаждения, которые обеспечивают тепловую разгрузку этих областей. Второй метод используется для проведения численных экспериментов по определению коэффициента теплоотдачи реальной конструкции

**Ключевые слова:** теплопередача, теплонапряженные элементы, термоэлектрические охладители, температурное поле, тепловой баланс, коэффициент теплоотдачи, метод конечных элементов

### Введение

Отдельные элементы систем автоматизированного управления и контроля специального назначения, как правило, функционируют в сложных теплонапряженных условиях, характеризующихся кратковременными перегрузками по тепловой мощности. Образующийся при этом локальный перегрев таких теплонапряженных элементов (ТЭ) является критичным для сохранения его жизнеспособности. Поэтому актуальной для таких систем является задача тепловой защиты от мгновенных локальных перегревов. Перспективный метод решения этой проблемы – использование термоэлектрических охладителей, являющихся практически безынерционными, мгновенно включаемыми системами теплоотвода [1, 2].

Разработаны различные методы расчета и конструкции термоэлектрических охладителей [3-15], включая и метод конечных элементов [13]. Однако в большинстве случаев эти методики работают со средними значениями температуры и не учитывают неоднородности

температурного распределения при охлаждении термоэлемента вынужденной конвекцией. Остается также открытым вопрос о соотношении этих методик по точности расчета. В настоящей работе производится анализ различных методик теплофизического расчета термоэлектрических охладителей на примере одной конструкции охлаждения ТЭ специального назначения.

### Модельные условия и особенности постановки задачи

Рассмотрим конструкцию, представленную на рис. 1. Теплонапряженный элемент вырабатывает тепловую мощность, характеризующую плотностью теплового потока  $q_0$ . Термоэлектрический элемент отводит от ТЭ тепловой поток, плотность которого в теплоносителе есть  $q_1$ . Формируемое при этом распределение температур в направлении, перпендикулярном потоку теплоносителя, также схематически показано на рис. 1. Расчетным параметром является температура  $T_0$  поверхности ТЭ.

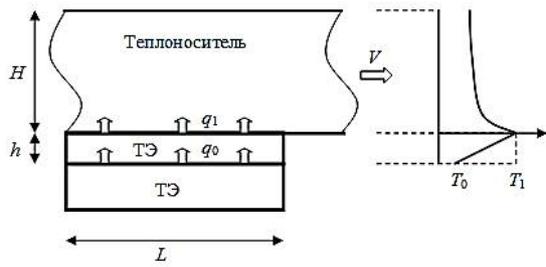


Рис. 1. Схема теплопередачи при термоэлектрическом охлаждении ТЭ

Постоянная тепловой релаксации в термоэлементе  $h^2 C / \lambda$  составляет 7 с, поэтому можно пренебречь нестационарным режимом. Кроме того, в силу конструктивных особенностей теплопереносом в плоскости термоэлемента также можно пренебречь, так как отдельные ячейки термоэлемента разделены диэлектрическими прослойками с низкой теплопроводностью. Тогда для термоэлемента можно использовать одномерное стационарное приближение, что для плотностей тепловых потоков на поверхностях термоэлемента в пренебрежении температурной зависимостью материальных параметров дает выражения [2, 6]:

$$q_0 = \alpha j T_0 - \frac{1}{2} \rho j^2 h - \frac{\lambda}{h} (T_1 - T_0), \quad (1)$$

$$q_1 = \alpha j T_1 + \frac{1}{2} \rho j^2 h - \frac{\lambda}{h} (T_1 - T_0). \quad (2)$$

Здесь  $\alpha$  – коэффициент Зеебека ветвей термоэлемента,  $j$  – плотность электрического тока в термоэлементе,  $\rho$  – удельное электросопротивление термоэлемента,  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности термоэлемента,  $h$  – толщина термоэлемента.

Затем, стационарный теплоперенос в теплоносителе описывается уравнением [16]:

$$C V \varphi(y) \frac{\partial T}{\partial x} = \lambda_1 \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right), \quad (3)$$

где  $C$  – удельная теплоемкость теплоносителя,  $V \varphi(y)$  – распределение скорости в теплоносителе,  $V$  – средняя скорость течения теплоносителя,  $\lambda_1$  – коэффициент теплопроводности теплоносителя,  $T(x, y)$  – поле температур в теплоносителе,  $\varphi(y) = 6y(H - y) / H^2$  – нормированная функция распределения скоростей.

Полная постановка задачи дополнительно к уравнениям (1-3) включает условие согласования тепловых полей на поверхности термоэлемента:

$$T(x, 0) = T_1(x), \quad (4)$$

$$-\lambda_1 \frac{\partial T}{\partial y}(x, 0) = q_1(x), \quad (5)$$

и граничные условия для рассматриваемой области теплопереноса:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial y}(x, H) = 0, \quad (6)$$

$$T(0, y) = T_{\text{вх}}, \quad (7)$$

$$q_0 = \text{const}, \quad (8)$$

$$\lambda_1 \frac{\partial T}{\partial x}(\infty, y) = 0. \quad (9)$$

Заданными параметрами модели являются тепловая мощность ТЭ  $q_0$  и температура теплоносителя на входе, рассчитываемой величиной – температура  $T_0$  на ТЭ.

Перейдем в задаче (1-9) к безразмерным переменным в рамках теории подобия. Для этого введем следующие масштабы переменных величин [14, 15]:

$$j_0 = \frac{\lambda}{\alpha h}, \quad q_x = \frac{\lambda T_x}{h}. \quad (10)$$

Здесь  $T_x$  – характеристическая температура, в качестве которой будем использовать предельную рабочую температуру ТЭ. Сохранив для простоты за безразмерными переменными обозначения  $j$  и  $q$  и обозначив безразмерную температуру как  $\theta$ , перепишем уравнения (1-2) в виде:

$$q_0 = j \theta_0 - \frac{j^2}{2z} - (\theta_1 - \theta_0), \quad (11)$$

$$q_1 = j \theta_1 + \frac{j^2}{2z} - (\theta_1 - \theta_0), \quad (12)$$

где  $z = \frac{\alpha^2 T_x}{\lambda \rho}$  – термоэлектрическая добротность термоэлемента.

Для численных расчетов будем использовать следующие типовые значения параметров. Характеристики термоэлектрического материала возьмем для системы  $\text{Bi}_2\text{Te}_3(80)+\text{Sb}_2\text{Te}_3(20)$  [2]: коэффициент Зеебека  $\alpha = 1,6 \cdot 10^{-4}$  В/К, теплопроводность  $\lambda = 1,4$  Вт/(м·К), удельная электропроводность  $\sigma = 1500$  См/см, удельная теплоемкость  $2,4 \cdot 10^6$  Дж/(м<sup>3</sup>·К). В качестве теплоносителя будем рассматривать воду: теплопроводность  $\lambda_1 = 0,6$  Вт/(м·К), удельная теплоемкость  $C = 4,19 \cdot 10^6$  Дж/(м<sup>3</sup>·К). Геометрические параметры системы охлаждения: толщина термоэлемента  $h = 2$  мм, толщина охлаждающего потока  $H = 3$  мм, охлаждаемая длина ТЭ  $L = 50$  мм. Средняя скорость течения потока

$V = 0,1$  м/с. Предельная температура нагрева  $T_x = 340$  К, температура теплоносителя на входе  $T_{вх} = 300$  К.

Для принятых значений параметров имеем  $z = 0,93$ , масштабные множители  $j_0 = 4,4$  А/мм<sup>2</sup>,  $q_x = 24$  Вт/см<sup>2</sup>.

Преобразование уравнения (3) будет зависеть от используемой методики расчета.

Поставленная задача достаточно сложна для решения, поэтому используются различные упрощенные методики расчета. Рассмотрим их в порядке возрастания сложности.

### I. Метод теплового баланса

В наиболее простом подходе вместо величин, переменных по пространственным координатам, используются их средние значения. В этом случае уравнение (3) исключается, а вместо граничного условия (5) применяется соотношение Ньютона-Рихмана [16]:

$$q_1 = \alpha'(T_1 - T). \quad (13)$$

Здесь  $\alpha'$  – коэффициент теплоотдачи с поверхности термоэлемента в теплоноситель. Переходя в соотношении (13) к безразмерным переменным в соответствии с масштабами (10), получим:

$$q_1 = \zeta(\theta_1 - \theta), \quad (14)$$

где введен безразмерный коэффициент теплоотдачи

$$\zeta = Nu \frac{\lambda_1}{\lambda} \frac{h}{H}, \quad (15)$$

а  $Nu$  – число Нуссельта:

$$Nu = \frac{\alpha'H}{\lambda_1}. \quad (16)$$

В результате система уравнений (11-12) преобразуется к виду:

$$\begin{cases} (1+j)\theta_0 - \theta_1 = q_0 + \frac{j^2}{2z} \\ (1-j+\zeta)\theta_1 - \theta_0 = \zeta\theta + \frac{j^2}{2z} \end{cases} \quad (17)$$

Решение этой системы определяет искомую температуру нагрева ТЭ:

$$\theta_0 = \frac{\zeta\theta + (1-j+\zeta)q_0 + (2-j+\zeta)\frac{j^2}{2z}}{(1+j)\zeta - j^2}. \quad (18)$$

В пределе интенсивной теплоотдачи в теплоноситель ( $\zeta \rightarrow \infty$ ) из формулы (18) получаем предельно достижимую величину охлаждения ТЭ:

$$\theta_0 = \frac{\theta + q_0 + \frac{j^2}{2z}}{1+j}. \quad (19)$$

Минимальное значение выражения (19) как функции плотности тока определяет нижнюю теоретическую границу достижимой температуры охлаждения:

$$j_{\max} = \sqrt{1 + 2z(\theta + q_0)} - 1, \quad \theta_{0\min} = \frac{j_{\max}}{z}. \quad (20)$$

Согласно формуле (20), нижняя температурная граница возрастает с увеличением теплового потока  $q_0$  и охлаждение перестает быть эффективным, если эта граница достигает значения единицы – предельно допустимой температуры ТЭ. Приравнявая тогда выражение (20) к единице, получим теоретическую максимальную плотность теплового потока, которую эффективно может отвести термоэлемент:

$$q_{0\max} = 1 - \theta + \frac{z}{2}, \quad j_{\max}(q_{0\max}) = z. \quad (21)$$

Таким образом, предельное значение плотности тока совпадает с теоретическим значением тока максимальной холодопроизводительности термоэлемента [1, 2]. Для используемых значений параметров имеем  $q_{0\max} = 0,58q_x$ , что составляет 14 Вт/см<sup>2</sup>. Следует отметить, что данное значение рассчитано для выбранной максимальной температуры нагрева 70°С. При повышении этой температуры предельная мощность также увеличивается.

Для конечных значений коэффициента теплоотдачи предельно допустимые значения снижаются и должны определяться численным анализом выражения (18). На рис. 2 приведены зависимости по формуле (18) (сплошные линии) в сравнении с определяемым формулой (19) (штриховые линии) для двух значений теплового потока (вдвое и вчетверо меньшего предельного значения (21)) и различных значений коэффициента теплоотдачи.

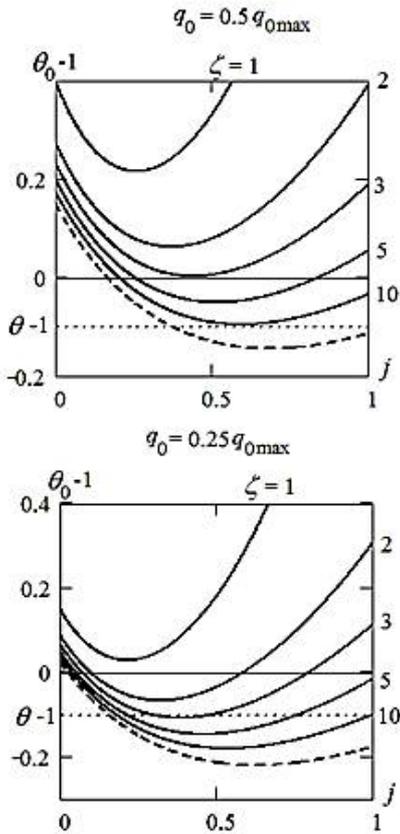


Рис. 2. Зависимость температуры ТЭ от плотности тока в термоэлементе для различных значений мощности источника тепла и коэффициента теплоотдачи

Как следует из результатов рис. 2, для обеспечения охлаждения до температур ниже предельной при мощности источника в половину максимальной требуется безразмерный коэффициент теплоотдачи  $\zeta > 3$ , а при четверти от максимальной соответственно  $\zeta > 1,3$ .

Оценим значение коэффициента теплоотдачи. Длина тепловой релаксации в ламинарном потоке определяется формулой [17]:

$$\frac{L_{т.р.}}{H} = B_{т.р.} Pe, \quad (22)$$

где  $B_{т.р.} = 1/70$ , а число Пекле есть

$$Pe = \frac{HCV}{\lambda_1}. \quad (23)$$

Для рассматриваемых условий имеем  $Pe = 2100$  и  $L_{т.р.} = 30H$ , что существенно больше длины термоэлемента  $L$ . Поэтому используем среднее число Нуссельта для конечного участка теплопередачи [17]:

$$Nu = A\sqrt[3]{\frac{PeH}{L}}.$$

Здесь  $A = 2,78$ . Тогда  $Nu = 13,9$  и из формулы (15) получаем  $\zeta = 3,97$ . Анализ аналогично проведенному на рис. 2 показывает, что

при таком числе предельная мощность составляет  $0,57q_{0max}$ , что дает  $8 \text{ Вт/см}^2$ . Увеличение этой мощности может быть достигнуто интенсификацией теплообмена термоэлемента с теплоносителем.

Рассмотренная методика расчета обладает достаточной простотой и позволяет найти предельные параметры работы термоэлектрического охладителя. Однако она имеет существенные недостатки. Полученные оценки достаточно грубы и являются полуколичественными. Кроме того, метод оперирует со средними значениями температуры, тогда как локальные значения могут заметно от них отличаться. Данное обстоятельство является критичным для ТЭ.

## II. Метод среднего коэффициента теплоотдачи

Для учета неоднородности распределения температуры по длине термоэлемента проинтегрируем уравнение (3) по толщине теплоносителя, то есть по координате  $y$ . При этом учтем, что длина продольного кондуктивного теплопереноса в теплоносителе составляет  $[\lambda_1 L / (CV)]^{1/2} = 0,3 \text{ мм}$ , поэтому этим переносом можно пренебречь. Тогда с учетом граничных условий (5) и (6) получим

$$CVH \frac{dT}{dx} = q_1(x), \quad (24)$$

где в качестве температуры используется среднерасходное значение, обычно применяемое в формуле Ньютона-Рихмана (13). Уравнение (24) является неполным, так как не учитывает условие согласования (4). Поэтому оно дополняется уравнением (17), и в результате имеем:

$$CVH \frac{dT}{dx} = \alpha'(T_1 - T). \quad (25)$$

Используем здесь масштаб длины в виде

$$l_x = \frac{CVHh}{\lambda}, \quad (26)$$

и перейдем к безразмерным переменным с учетом (10):

$$\frac{d\theta}{d\xi} = \zeta(\theta_1 - \theta). \quad (27)$$

Это уравнение дополняется соотношениями (17) и начальным условием (7):

$$\theta(0) = \theta_{вх}. \quad (28)$$

Выразим из системы (17) величину  $\theta_1$

$$\theta_1 = \frac{(1+j)\zeta\theta + q_0 + (2+j)\frac{j^2}{2z}}{(1+j)\zeta - j^2}, \quad (29)$$

и подставим ее в уравнение (27):

$$\frac{d\theta}{d\xi} = \frac{\zeta j^2}{(1+j)\zeta - j^2} \theta + \frac{\zeta}{(1+j)\zeta - j^2} \left( q_0 + (2+j) \frac{j^2}{2z} \right) \quad (30)$$

Произведем оценку параметров. Масштаб длины (26) в рассматриваемом случае имеет величину  $l_x = 1,8$  м, что намного больше длины теплообмена на термоэлементе. Поэтому приближенно решение уравнения (30) можно записать в виде:

$$\theta = \theta_{\text{вх}} + \frac{\zeta}{(1+j)\zeta - j^2} \times \left( j^2 \theta_{\text{вх}} + q_0 + (2+j) \frac{j^2}{2z} \right) \frac{x}{l_x} \quad (31)$$

Отсюда следует, что в нулевом приближении среднерасходную температуру по всей длине термоэлемента можно считать равной начальной температуре. Это обосновывает применимость предыдущей методики для рассматриваемой геометрии системы теплообмена. Более точно распределение температуры (31) для используемых параметров при значении тепловой мощности, которое по предыдущей методике было определено как пороговое, представлено на рис. 3.

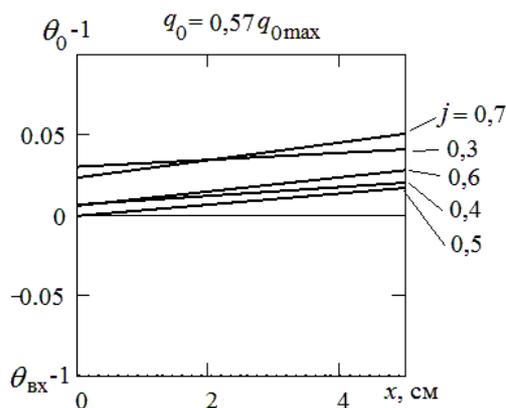


Рис. 3. Распределение температуры при постоянном коэффициенте теплоотдачи

Как следует из результатов, представленных на рисунке, полученное ранее пороговое значение оказывается несколько завышенным. Это обстоятельство можно учесть, если в качестве расчетной температуры теплоносителя в предыдущей методике взять температуру на выходе из зоны теплообмена:

$$\theta = \theta_{\text{вх}} + \frac{\zeta}{(1+j)\zeta - j^2} \times \left( j^2 \theta_{\text{вх}} + q_0 + (2+j) \frac{j^2}{2z} \right) \frac{L}{l_x}$$

В результате выражение для температуры ТЭ усложняется и может исследоваться только численно даже в предельном случае.

Рассмотренная методика имеет существенный недостаток, заключающийся в использовании среднего числа Нуссельта, тогда как на начальном участке это приближение является грубым.

### III. Метод дифференциального коэффициента теплоотдачи

Учтем координатную зависимость числа Нуссельта и используем локальное значение коэффициента теплоотдачи  $\alpha'_x$  в уравнении (30). Тогда удобно в качестве масштаба длины взять толщину теплоносителя  $H$

$$l_x = H,$$

и ввести аналог числа Пекле (23) в виде:

$$Pe' = \frac{hCV}{\lambda} \quad (32)$$

Отличие этого числа от (23) состоит в том, что здесь используются параметры разных областей теплопереноса – теплоносителя и термоэлемента. В итоге уравнение (25) преобразуется к безразмерному виду как

$$Pe' \frac{d\theta}{d\xi} = \frac{\zeta \xi}{(1+j)\zeta \xi - j^2} \times \left( j^2 \theta + q_0 + (2+j) \frac{j^2}{2z} \right) \quad (33)$$

Из структуры уравнения (33) следует, что в этом случае также можно получить аналитическое решение, если ввести новую пространственную переменную:

$$\eta = \frac{1}{Pe'} \int_0^\xi \frac{\zeta_t dt}{(1+j)\zeta_t - j^2} \quad (34)$$

В результате уравнение (33) преобразуется к уравнению с постоянными коэффициентами:

$$\frac{d\theta}{d\eta} = j^2 \theta + q_0 + (2+j) \frac{j^2}{2z} \quad (35)$$

Произведем здесь также оценку параметров. Локальное число Нуссельта определяется формулой [17]

$$Nu_{\xi} = A\sqrt[3]{\frac{Pe}{\xi}}, \quad (36)$$

где для рассматриваемого плоского течения  $A = 1,85$ . Число Пекле (23) составляет 2100, поэтому из (36) имеем

$$Nu_{\xi} = \frac{23,7}{\sqrt[3]{\xi}}.$$

Тогда с учетом формулы (15) получаем

$$\zeta_{\xi} = \frac{\zeta_0}{\sqrt[3]{\xi}}, \quad (37)$$

где  $\zeta_0 = 6,77$ . С учетом выражения (37) интеграл (34) можно записать в виде

$$\eta = \frac{1}{Pe'} \int_0^{\xi} \frac{\zeta_0 dt}{(1+j)\zeta_0 - j^2 \sqrt[3]{t}}. \quad (38)$$

Для рассматриваемой геометрии  $\xi < 20$ , в этом случае второе слагаемое в знаменателе (38) много меньше первого, с учетом чего приближенное вычисление интеграла (38) дает

$$\eta = \frac{\xi}{Pe'(1+j)} \left( 1 + \frac{3j^2}{4(1+j)\zeta_{\xi}} \right). \quad (39)$$

Принимая во внимание значение  $Pe' = 600$  и  $j < z$ , получаем  $\eta < 0,05$ . Тогда приближенное решение уравнения (35) можно записать в виде:

$$\theta = \theta_{\text{вх}} + \left( j^2 \theta_{\text{вх}} + q_0 + (2+j) \frac{j^2}{2z} \right) \eta. \quad (40)$$

Формулы (39) и (40) описывают распределение температуры теплоносителя в рассматриваемом методе, а формула (18) – температуру поверхности ТЭ. Слагаемые в формуле (40) в круглых скобках меньше единицы, поэтому при сделанной оценке относительное изменение температуры теплоносителя не превышает 5%. Эта величина того же порядка, что и другие изменения температуры в задаче, поэтому пренебрежение зависимостью от координаты в выражении (40) недопустимо.

В результате из формулы (18) с учетом формул (37), (39) и (40) получим распределение температуры вдоль длины ТЭ:

$$\theta_0(\xi) = \frac{\zeta_{\xi} \theta(\xi) + (1-j+\zeta_{\xi})q_0 + (2-j+\zeta_{\xi}) \frac{j^2}{2z}}{(1+j)\zeta_{\xi} - j^2}. \quad (41)$$

Вследствие сильного изменения дифференциального коэффициента теплоотдачи (37) распределение (41) также оказывается сильно неоднородным, в отличие от решения (31) в предыдущем методе. Результаты расчета распределения (41) для рассматриваемой в каче-

стве примера системы показаны на рис. 4. Сплошными линиями показано распределение при ненулевом токе термоэлемента, штриховой – распределение при отсутствии термоэлектрического охлаждения. Как видно из рисунка, изменение положения распределения с изменением плотности электрического тока не монотонно, и имеется величина плотности тока, при которой величина охлаждения наибольшая вдоль всей длины ТЭ. В отличие от результатов рис. 2, при половинной мощности нагрева не существует эффективного охлаждения всей площади ТЭ ни при каком токе. Однако при мощности в четверть максимальной термоэлектрическое охлаждение нужного уровня по всей длине достигается и имеет максимальное значение при относительной плотности тока 0,4.

Таким образом, учет дифференциального коэффициента теплоотдачи существенно изменяет количественные выводы предыдущих методик, но согласуется с ними качественно.

Согласно рис. 4, наименьшая величина охлаждения достигается в конце потока теплоносителя, поэтому при ограничении максимального перегрева ТЭ достаточно рассмотреть только эту точку распределения. На рис. 5 представлены рассчитанные для этой точки значения температур перегрева в зависимости от плотности тока и мощности нагрева.

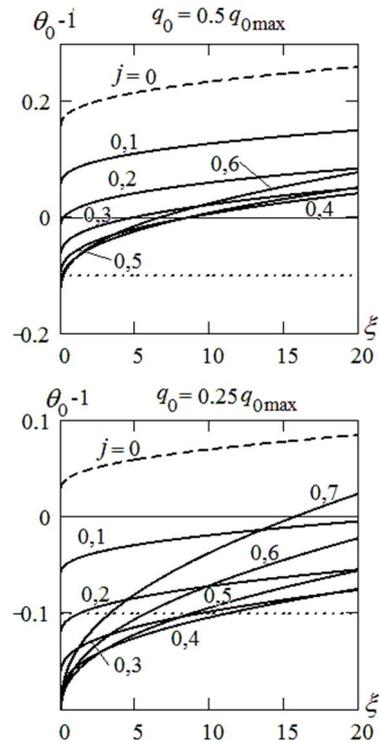


Рис. 4. Распределение температуры вдоль ТЭ при различной плотности электрического тока и мощности нагрева

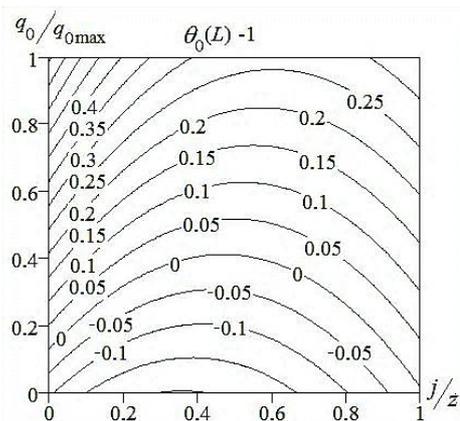


Рис. 5. Зависимость минимальной степени охлаждения от плотности электрического тока и мощности источников нагрева

Область, соответствующая эффективному охлаждению всего РЭ, отмечается отрицательными значениями перегрева и расположена ниже линии нуля.

Отметим, что предельная допустимая мощность нагрева, определяемая из рис. 5, составляет  $0,41q_{0max}$ , что в полтора раза меньше, чем в методике со средним коэффициентом теплоотдачи.

Анализ по данной методике позволяет определить предельные значения мощности нагрева, эффективно охлаждаемые термоэлектрическим элементом, и определить рабочие плотности электрического тока для осуществления охлаждения.

Рассмотренная методика корректно описывает начальный участок теплоотдачи, который обычно является рабочим для типичных размеров ТЭ. Вместе с тем, известные данные по дифференциальному коэффициенту теплоотдачи ограничены лишь простейшими моделями [17] и модифицируются с учетом дополнительных факторов [18] (наличие начального неохлаждаемого участка, температурная зависимость вязкости и теплопроводности и др.). Поэтому, например, нет возможности ввести в расчет интенсификацию теплоотдачи. Кроме того, аналитическое решение задачи распределения температур удастся получить лишь в упрощенной модели, для реальной системы необходимо решать уравнение численно.

#### IV. Конечно-элементный стационарный метод

В этом методе производится прямое численное решение задачи (1-9) методом конечных элементов. Этот метод позволяет полу-

чить наиболее полное и точное описание распределения температурных полей для реальной системы теплообмена. Однако он требует привлечения значительных вычислительных ресурсов и не позволяет получить аналитическое описание результатов.

Произведем преобразование масштабов переменных, как было выполнено в предыдущем методе. Тогда уравнение (3) преобразуется к виду

$$Pe \cdot \varphi(\xi_y) \frac{\partial \theta}{\partial \xi_x} = \frac{\partial^2 \theta}{\partial \xi_x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial \xi_y^2}, \quad (42)$$

где число Пекле определяется формулой (23). Граничное условие (5) в безразмерных переменных станет

$$-\chi \frac{\partial \theta}{\partial \xi_y}(\xi_x, 0) = q_1(\xi_x) \quad (43)$$

Здесь  $\chi = \frac{h\lambda_1}{H\lambda} = \frac{Pe'}{Pe}$  – физико-геометрический симплекс задачи.

Для преобразования условия (43) с использованием уравнений (11-12) исключим из них температуру  $\theta_0$ :

$$q_1 = \frac{j^2 \theta_1 + q_0 + (2+j) \frac{j^2}{2z}}{1+j} \quad (44)$$

Учитывая затем условие (4) и подставив выражение (44) в формулу (43), запишем граничное условие в стандартном виде:

$$\frac{\partial \theta}{\partial n}(\xi_x, 0) = \frac{j^2}{(1+j)\chi} \theta(\xi_x, 0) + \frac{q_0 + (2+j) \frac{j^2}{2z}}{(1+j)\chi}, \quad \xi_x \leq \delta \quad (45)$$

Здесь использовано обозначение производной по внешней нормали к границе области решения уравнения (42) и обозначено  $\delta = L/H$ . В форме (45) граничное условие используется в конечно-элементных системах мультифизического моделирования [19]. Остальные граничные условия (6-9) преобразуются тривиально:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \theta}{\partial n}(\xi_x, 1) = 0, \quad \frac{\partial \theta}{\partial n}(\Lambda, \xi_y) = 0, \\ \theta(0, \xi_y) = \theta_{вх}, \quad \frac{\partial \theta}{\partial n}(\xi_x > \delta, 0) = 0 \end{aligned} \quad (46)$$

а координата  $\Lambda$  удаленной границы расчета выбирается из условия стабилизации продольного кондуктивного теплового переноса в потоке. В результате задача сводится к расчету теплопереноса в плоском потоке при смешан-

ном условии одностороннего нагрева (45) на конечном участке.

Температура поверхности ТЭ после решения задачи сразу находится из уравнения (11) с учетом условия (7):

$$\theta_0(\xi_x) = \frac{\theta(\xi_x, 0) + q_0 + \frac{j^2}{2z}}{1 + j} \quad (47)$$

Для расчета используем конечно-элементный пакет FEMPDESolver2.0 [20],

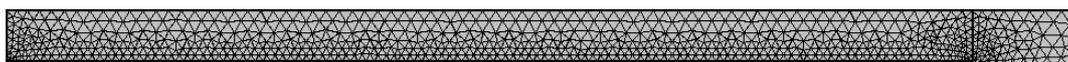


Рис. 6. Конечно-элементная сетка для решения задачи



Рис. 7. Вид изотерм поля температур в теплоносителе

Распределение температуры вдоль ТЭ при половинной от максимальной мощности нагрева представлено на рис. 8, а при мощности 0,38 – на рис. 9.

Полученные расчетные результаты на рис. 8 хорошо согласуются с результатами (рис. 4) предыдущей методики. Численный анализ показал (рис. 9), что предельная мощность источника в МКЭ-расчете составляет 0,38 от максимальной. Это также хорошо согласуется результатом 0,41 предыдущего анализа, что подтверждает применимость методики расчета с дифференциальным коэффициентом теплоотдачи для теплообмена с термoeлектрическим элементом.

Таким образом, метод моделирования на основе МКЭ является наиболее общим и применим к сложным системам. Однако он не дает аналитических результатов, требует специального программного обеспечения и значительных вычислительных ресурсов. Этих недостатков лишен метод III, но для его использования необходимо выражение для дифференциального коэффициента теплоотдачи. Вместе с тем, имеющиеся данные по числу Нуссельта весьма ограничены и получены для простейших систем [17, 18]. Поэтому практическое использование методики III для реальных систем без дополнительных данных невозможно. Такие данные, в частности, коэффициент теплоотдачи, могут быть получены в рамках расчета по МКЭ.

апробированный на решении эллиптических задач. Построенная конечно-элементная сетка со сгущением в области резкого изменения решения представлена на рис. 6.

Число степеней свободы составило около 1200, время решения одной задачи около 4 с. Один из результатов решения в виде изотерм распределения температур в теплоносителе представлен для примера на рис. 7.

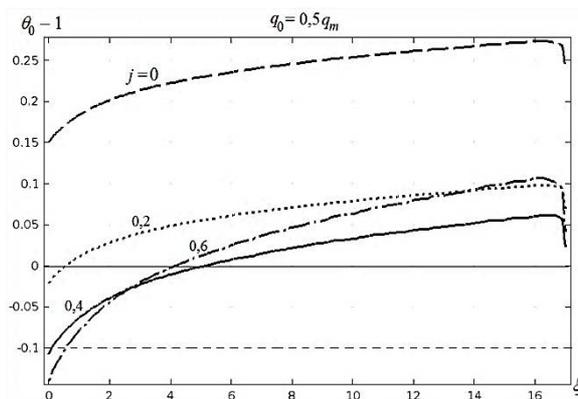


Рис. 8. Распределение температуры вдоль поверхности ТЭ при мощности теплового источника, половинной от максимальной, рассчитанное в МКЭ

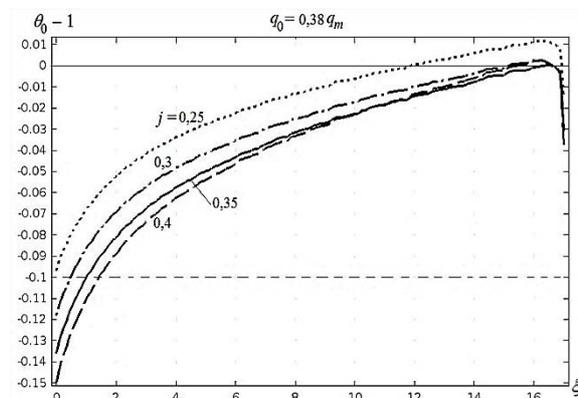


Рис. 9. Распределение температуры вдоль поверхности ТЭ при мощности теплового источника 0,38 от максимальной, рассчитанное в МКЭ

## Заключение

Проведенный анализ методик показал, что для эффективного решения проблемы необходимо комплексное использование различных методов. Методы теплового баланса и среднего коэффициента теплоотдачи позволяют определить принципиальную возможность использования термоэлектрического охлаждения конкретного ТЭ. Реальные параметры системы охлаждения должны определяться в рамках комбинации методов дифференциального коэффициента теплоотдачи и МКЭ для проведения аналитических исследований и численных экспериментов.

## Литература

1. Мартыновский В.С. Циклы, схемы и характеристики термотрансформаторов. М.: Энергия, 1979. 288 с.
2. Анатыхук Л.И. Термоэлементы и термоэлектрические устройства. Киев: Наукова Думка, 1979. 768 с.
3. Perspectives on thermoelectrics: from fundamentals to device applications / M. Zebajjadi, K. Esfarjani, M.S. Dresselhaus, Z.F. Ren, G. Chen // *Energy & Environmental Science*. 2012. V.5. No 1. P. 5147–5162.
4. Аналитическая оценка влияния термоэлектрических эффектов на интенсификацию теплоотдачи от охлаждаемой ребренной поверхности / И.М. Илюхин, А.В. Кретинин, М.И. Кирпичев, В.Г. Стогней // *Вестник Воронежского государственного технического университета*. 2014. Т. 10. № 1. С. 44–46.
5. Горобец Н.В., Охрем В.Г. Термоэлектрический охладитель Пельтье с дополнительным проводящим элементом // *Прикладная физика*. 2007. № 4. С. 124–127.
6. Моделирование режима  $Q_{\max}$  термоэлектрического охладителя с учетом тепловых сопротивлений на холодной и горячей стороне / А.А. Мельников, А.М. Пири, И.В. Тарасова, Н.В. Батрамеев // *Физика и техника полупроводников*. 2017. Т. 51. № 7. С. 896–899.
7. Zaykov V., Mescheryakov V., Zhuravlov Yu. Analysis of Relationship Between the Dynamics of a Thermoelectric Cooler and Its Design and Modes Of Operation // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. V. 1/8. No 91. Pp. 12–23.
8. Анализ режимов функционирования замкнутого циркуляционного контура охлаждения с промежуточным

теплоносителем / В.И. Рязских, Ю.Ю. Громов, А.В. Рязских, А.А. Хвостов // *Прикладная физика и математика*. 2017. № 4. С. 20–26.

9. Lee H. Optimal design of thermoelectric devices with dimensional analysis // *Applied Energy*. 2013. V. 106. P. 79–88.

10. Zhu L., Tan H., Yu J. Analysis on optimal heat exchanger size of thermoelectric cooler for electronic cooling applications // *Energy Conversion and Management*. 2013. V. 76. P. 685–690.

11. Optimum design and experimental study of a thermoelectric ventilator / T. Han, G. Gong, Z. Liu, L. Zhang // *Applied Thermal Engineering*. 2014. V.67. P. 529–539.

12. Pearson, M.R., Lents C.E. Dimensionless optimization of thermoelectric cooler performance when integrated within a thermal resistance network // *Journal of Heat Transfer*. 2016. V. 38. No 8. P. 081301–081301-11.

13. Mathematical modeling of hydrodynamics and heat exchange in liquid channels of the thermoelectric cooling module / A.V. Kretinin, S.L. Podvalny, D.P. Shmatov, E.E. Spitsyna // *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. Vol. 1203. P. 012049.

14. Модель теплопередачи в проточном теплообменнике с термоэлектрическим охлаждающим элементом / И.Л. Батаронов, А.В. Кретинин, В.Ф. Селиванов, Е.Е. Спицына, Т.А. Надеина // *Альтернативная и интеллектуальная энергетика: материалы Междунар. науч.-практ. конф. Воронеж: ВГТУ, 2018. С. 119–120.*

15. A model of heat transfer in counter-current heat exchanger with a thermoelectric cooling element / I.L. Bataronov, A.V. Kretinin, V.F. Selivanov, E.E. Spitsyna, T.A. Nadeina // *2018 International Theoretical and Practical Conference on Alternative and Smart Energy (TPCASE 2018): Proc. Lancaster: DESTech Publication inc., 2019. P. 30–36.*

16. Кугателадзе С.С. Основы теории теплообмена. М.: Атомиздат, 1979. 416 с.

17. Кугателадзе С.С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление. М.: Энергоатомиздат, 1990. 367 с.

18. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. М.: Энергоатомиздат, 1981, 416 с.

19. Шунин Г.Е., Кудряш А.А. Системы мультифизического конечно-элементного анализа // *Физико-математическое моделирование систем: материалы XVI Междунар. семинара. Воронеж: ВГТУ, 2016. С. 174–212.*

20. Конечно-элементный комплекс программ FEMPD Solver 2.2 / М.И. Батаронова, С.А. Кострюков, В.В. Пешков, Г.Е. Шунин // *Физико-математическое моделирование систем: материалы VIII Междунар. семинара. Воронеж: ВГТУ, 2012. С. 99–118.*

Поступила 30.12.2020; принята к публикации 17.02.2021

## Информация об авторах

**Бородкин Станислав Владимирович** – адъюнкт, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (398600, Россия, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54а), e-mail: borodkinstanislav@yandex.ru

**Иванов Алексей Владимирович** – канд. техн. наук, доцент, начальник управления, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (398600, Россия, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54а), e-mail: kafedra@vmfmm.vorstu.ru, vmfmm@mail.ru

**Батаронов Игорь Леонидович** – д-р физ.-мат. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: i-bataronov@mail.ru

**Кретинин Александр Валентинович** – д-р физ.-мат. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: avk-vrn@mail.ru

## ANALYSIS OF METHODS FOR CALCULATING HEAT TRANSFER IN THERMOELECTRIC COOLING SYSTEMS FOR HEAT-STRESSED ELEMENTS

S.V. Borodkin<sup>1</sup>, A.V. Ivanov<sup>1</sup>, I.L. Bataronov<sup>2</sup>, A.V. Kretinin<sup>2</sup><sup>1</sup>Military Scientific Educational Center of Military-Air Forces “N.E. Zhukovsky and Ju.A. Gagarin Military-Air Academy”, Voronezh, Russia<sup>2</sup>Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

**Abstract:** the article presents on the basis of the equations of heat transfer in a moving medium and the relations of heat transfer in a thermoelectric cooler, a comparative analysis of methods for calculating the temperature field in a heat-stressed element. We considered methods based on: 1) heat balance, 2) average heat transfer coefficient, 3) differential heat transfer coefficient, 4) direct calculation using the finite element method. We established that the first two methods do not provide an adequate distribution of the temperature field but can be useful for determining the principal possibility of a given cooling using thermoelectric elements. The last two methods allow us to correctly calculate the temperature field; but to use the third method, we need a differential heat transfer coefficient, which can be found from the calculation using the fourth method. We made a conclusion about the need for combined use of methods in a general case. The methods of thermal balance and average heat transfer coefficient allow us to determine the principal possibility of using thermoelectric cooling of a specific heat-stressed element. The actual parameters of the cooling system should be determined using a combination of the differential heat transfer coefficient and the finite element method. The first of them allows us to determine the heat-stressed areas and calculate the parameters of the cooling system that provide thermal discharge of these areas. The second method is used to perform numerical experiments to determine the heat transfer coefficient of a real structure

**Key words:** heat transfer, heat-stressed elements, thermoelectric coolers, temperature field, heat balance, heat transfer coefficient, finite element method

## References

1. Martinovsky V.S. “Cycles, schemes and characteristics of thermotransformers” (“Tsikly, shemy i kharakteristiki termotransformatorov”), Moscow, Energiya, 1979, 288 p.
2. Anaticuk L.I. “Thermoelements and thermoelectric devices” (“Termoelementy i termoelektricheskie ustroictva”), Kiev, Naukova Dumka, 1979, 768 p.
3. Zebarjadi M., Esfarjani K., Dresselhaus M.S., Ren Z.F., Chen G. “Perspectives on thermoelectrics: from fundamentals to device applications”, *Energy & Environmental Science*, 2012, vol. 5, no 1, pp. 5147–5162.
4. Ilyukhin I.M., A.V. Kretinin M.I. Kirpichev, Stogney V.G. “Analytical assessment of effects on thermoelectric heat transfer enhancement from the cooling finned surfaces”, *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta)*, 2014, vol. 10, no 4, pp. 44–46.
5. Gorobets N.V., Okhrem V.G. “Peltier thermoelectric cooler with additional conducting element”, *Plasma Physics Reports (Prikladnaya fizika)*, 2007, no 4, pp. 124–127.
6. Mel'nikov A.A., Piri A.M., Tarasova I.V., Batrameev N.V. “Modeling of  $Q_{\max}$  mode of a thermoelectric cooler taking into account thermal resistances on cool and hot side”, *Semiconductors (Fizika i tekhnika poluprovodnikov)*, 2017, vol. 51, no 7, pp. 896–899.
7. Zaykov V., Mescheryakov V., Zhuravlov Yu. “Analysis of relationship between the dynamics of a thermoelectric cooler and its design and modes of operation”, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2018, vol. 1/8, no 91, pp. 12–23.
8. Ryazhskikh V.I., Gromov Yu.Yu., Ryazhskikh A.V., Khvostov A.A. “Analysis of operating modes of a closed circulation cooling circuit with an intermediate heat carrier”, *Applied Physics and Mathematics (Prikladnaya fizika i matematika)*, 2017, no 4, pp. 20–26.
9. Lee H. “Optimal design of thermoelectric devices with dimensional analysis”, *Applied Energy*, 2013, vol. 106, pp. 79–88.
10. Zhu L., Tan H., Yu. J. “Analysis on optimal heat exchanger size of thermoelectric cooler for electronic cooling applications”, *Energy Conversion and Management*, 2013, vol. 76, pp. 685–690.
11. Han T., Gong G., Liu Z., Zhang L. “Optimum design and experimental study of a thermoelectric ventilator”, *Applied Thermal Engineering*, 2014, vol. 67, pp. 529–539.
12. Pearson M.R., Lents C.E. “Dimensionless optimization of thermoelectric cooler performance when integrated within a thermal resistance network”, *Journal of Heat Transfer*, 2016, vol. 138, no 8, pp. 081301–081301-11.
13. Kretinin A.V., Podvalny S.L., Shmatov D.P., Spitsyna E.E. “Mathematical modeling of hydrodynamics and heat exchange in liquid channels of the thermoelectric cooling module”, *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, vol. 1203, p. 012049.
14. Bataronov I.L., Kretinin A.V., Selivanov V.F., Spysina E.E., Nadeina T.A. “Model of heat transfer in a flow-through heat exchanger with a thermoelectric cooling element”, *Proc. of Int. Sci. and Pract. Conf. on Alternative and Smart Energy (Alternativnaya i intellektual'naya energetika: materialy Mezhdunar. nauch.-prakt.konf.) (TPCASE 2018)*, Voronezh State Technical University, 2018, pp. 119–120.
15. Bataronov I.L., Kretinin A.V., Selivanov V.F., Spysina E.E., Nadeina T.A. “A model of heat transfer in counter-current heat exchanger with a thermoelectric cooling element”, *Proc. of 2018 International Theoretical and Practical Conference on Alternative and Smart Energy (TPCASE 2018)*, Lancaster, DESTech Publication inc., 2019, pp. 30–36.
16. Kutateladze S.S. “Fundamentals of heat transfer theory” (“Osnovy teorii teploobmena”), Moscow, Atomizdat, 1979, 416 p.

17. Kutateladze S.S. "Heat transfer and hydrodynamic resistance" ("Теплопередача и гидродинамическое сопротивление"), Moscow, Energoatomizdat, 1990, 367 p.
18. Isachenko V.P., Osipova V.A., Sukomel A.S. "Heat transfer" ("Теплопередача"), Moscow, Energoatomizdat, 1981, 416 p.
19. Shunin G. E., Kudryash A. A "Systems of multiphysical finite element analysis", *Proc. of XVI Int. sem. Physical and Mathematical Modeling of Systems (Fiziko-matematicheskoye modelirovaniye sistem: materialy XVI Mezhdunar. seminara)*, Voronezh State Technical University, 2016, pp. 174-212.
20. Bataronova M.I., Kostryukov S. A., Peshkov V. V., Shunin G. E. "Finite element software package FEMPDESolver 2.2", *Proc. of VIII Int. sem. Physical and mathematical modeling of systems (Fiziko-matematicheskoye modelirovaniye sistem: materialy VIII Mezhdunar. seminara)*, Voronezh State Technical University, 2012, pp. 99-118.

Submitted 30.12.2020; revised 17.02.2021

#### Information about the authors

**Stanislav V. Borodkin**, adjunct, Military Scientific Educational Center of Military-Air Forces "N.E. Zhukovsky and Ju.A. Gagarin Military-Air Academy" (54A Starykh Bolshevikov str., Voronezh 398600, Russia), e-mail: borodkinstanislav@yandex.ru  
**Aleksey V. Ivanov**, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Military Scientific Educational Center of Military-Air Forces "N.E. Zhukovsky and Ju.A. Gagarin Military-Air Academy" (54A Starykh Bolshevikov str., Voronezh 398600, Russia), e-mail: kafedra@vmfmm.vorstu.ru, vmfmm@mail.ru  
**Igor' L. Bataronov**, Dr. Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: i-bataronov@mail.ru  
**Aleksandr V. Kretinin**, Dr. Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: avk-vrn@mail.ru

**РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ МЕЖСАМОЛЕТНОЙ НАВИГАЦИИ ПО ОБЕСПЕЧЕНИЮ ПОЛЕТА СТРОЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ**Д.А. Смирнов<sup>1</sup>, В.Г. Бондарев<sup>2</sup>, А.В. Николенко<sup>2,3</sup><sup>1</sup>Государственный летно-испытательный центр имени В.П. Чкалова, Войсковая часть 15650, г. Ахтубинск, Россия<sup>2</sup>Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж, Россия<sup>3</sup>Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** проведен краткий анализ как отечественных, так и зарубежных систем межсамолетной навигации. В ходе анализа были отражены недостатки систем межсамолетной навигации и представлен актуальный подход повышения точности системы навигации за счет применения системы технического зрения. Для определения местоположения ведущего самолета предлагается рассмотреть в качестве измерительного комплекса систему технического зрения, которая способна решать большой круг задач на различных этапах, в частности, и полет строем. Систему технического зрения предлагается установить на ведомом самолете с целью измерения всех параметров, необходимых для формирования автоматического управления полетом летательного аппарата. Обработка изображений ведущего самолета выполняется с целью определения координат трех идентичных точек на фоточувствительных матрицах. Причем в качестве этих точек выбираются оптически контрастные элементы конструкции летательного аппарата, например окончания крыла, хвостового оперения и т.д. Для упрощения процедуры обработки изображений возможно использование полупроводниковых источников света в инфракрасном диапазоне (например, с длиной волны  $\lambda = 1,54$  мкм), что позволяет работать даже в сложных метеоусловиях. Такой подход может быть использован при автоматизации полета строем более чем двух летательных аппаратов, при этом необходимо только оборудовать системой технического зрения все ведомые самолеты группы

**Ключевые слова:** система технического зрения, система автоматического управления, межсамолетная навигация, групповой полет, летательный аппарат

**Введение**

Современные летательные аппараты (ЛА) оснащены значительным арсеналом измерительных средств, обеспечивающих автоматическое либо директорное управление полетом на различных его этапах. Несмотря на успехи в разработке этих средств, следует отметить, что ряд этапов полета до сих пор выполняется успешно благодаря высокой выучке летного состава, которая на практике часто оказывается недостаточной для выполнения полетного задания. Такими этапами полета, которые требуют сверхвысокой точности местоопределения, можно без преувеличения назвать посадку, преодоление (облет) препятствий, дозаправку в воздухе, захват целей, полет строем. Кардинальное решение названных проблем видится в автоматизации полета в этих режимах, но на этом пути возникает трудность, обусловленная недостаточными возможностями измерительного оборудования.

В решении задач навигации ЛА особая роль отводится спутниковым навигационным

системам (СНС), которые имеют погрешность определения координат в автономном режиме в пределах 10–50 м. Однако, совершенно очевидно, что для обеспечения режимов полета, требующих сверхвысокой точности навигации, этого недостаточно, поэтому необходимо в СНС использовать более точные навигационные режимы, такие как дифференциальные и относительные.

Для реализации дифференциального режима требуется дополнительное как бортовое, так и наземное оборудование СНС, при этом достигается погрешность определения координат в 5–7 м и лучше.

Относительный режим требует дополнительное бортовое оборудование, а погрешности определения координат в зависимости от взаимного удаления летательных аппаратов находятся на уровне нескольких метров – десятков сантиметров [1].

Исходя из вышесказанного, можно сделать вывод, что СНС в перспективе могут стать средством ближней межсамолетной навигации.

Среди радиолокационных средств (РЛС) определения положения объектов следует выделить бортовые РЛС миллиметрового диапа-

зона волн, у которых большая эффективная поверхность рассеивания целей по сравнению с сантиметровым диапазоном.

Групповые полеты ЛА являются наиболее сложным и важным этапом. Взаимодействие ЛА в группе значительно повышает ударные функции и эффективность выполнения поставленных задач на территории противника в зоне противовоздушной обороны.

Проанализировав существующие как отечественные, так и зарубежные радиотехниче-

ские системы межсамолетной навигации, можно заметить их низкую точность (таблица) [3]. При такой точности невозможно обеспечить автоматизацию полета ЛА, особенно когда дело касается взаимодействия ЛА в строю на небольших интервалах. Для работоспособности данных систем необходимо участие наземного либо спутникового сегмента, что ограничивает область их применения.

Параметры существующих систем межсамолетной навигации

Методы измерения	Радиотехнические				Оптические
	Системы	Радикал-ОВК РФ	РСБН-85В РФ	А-737 РФ	
ЛА	МИГ-31	СУ-35с	СУ-30	F/A-18	БЛА
Погрешность измерения	±100,00 м	±60,00 м	±23,30 м	±21,00 м	±0,02...0,50 м

Разработанная в ВУНЦ ВВС «ВВА» оптико-электронная система межсамолетной навигации имеет существенно более высокие точностные характеристики, что позволяет на ее основе сформировать групповой полет ЛА высокой плотности, обладающий устойчивостью к воздействию средств РЭБ и ПВО.

Анализ характеристик существующих бортовых РЛС типа WX-50, РЛС AN APQ-137В или РЛС «Алмаз» показывает, что даже они не вполне подходят для решения задач межсамолетной навигации, так разрешающая способность по дальности порядка 4 м и углу до 1,2 едва может обеспечить полет в плотном строю или дозаправку топливом в воздухе.

Поэтому в настоящее время достаточно сложно сделать однозначный выбор средства навигации для обеспечения автоматического управления полетов строем. В связи с этим может оказаться своевременным новое решение этой задачи.

### Постановка задачи

Полет самолетов строем является сложнейшей пилотажной задачей, которая требует от летчиков высокого мастерства. Большие затраты на подготовку летчиков такого уровня и требование обеспечения безопасности полетов делают актуальной задачу обеспечения автоматизации полетов строем. Наиболее узким местом на пути решения этой проблемы является отсутствие надежного измерительного средства, обеспечивающего ведомый самолет информацией о местоположении ведущего. Пред-

ставляется, что система технического зрения является именно таким измерительным инструментом, что подтверждает следующий измерительный алгоритм.

Опыт применения авиации в боевых действиях в крупномасштабных войнах и локальных военных конфликтах показал, что большинство полётных заданий боевые воздушные суда, независимо от своего функционального предназначения, выполняют в составе групп различного тактического назначения.

Данный этап является технически сложно реализуемым и в большинстве случаев определяет тактические возможности комплексов с ЛА. В связи с этим разработка и поиск новых способов обеспечения автоматического полета ЛА строем являются перспективной задачей, в конечном счете, от которой зависит, как расширится область применения ЛА. Достижения современных средств РЭБ в военной авиации существенно ограничивают возможности использования радиотехнических средств межсамолетной навигации. Поэтому актуальность создания оптико-электронного комплекса межсамолетной навигации чрезвычайно велика.

Анализ состояния аварийности авиации военного назначения при выполнении групповых полётов показывает, что в основном их причиной явились ошибки лётного состава в технике пилотирования и управления движением (80 % авиационных происшествий (АП)). Современное развитие авиации выдвигает всё новые и новые требования к вопросам надежного обеспечения безопасности полётов. Одним из важных направлений обеспечения безопас-

ности полётов является предупреждение столкновений самолётов в воздухе. Ежегодные летние вспышки авиационных происшествий из-за столкновений в воздухе не настораживают руководящий состав частей, требовательность к организации предотвращения АП по известным причинам не повышена, особенно это относится к групповым полётам.

Изучение причинно-следственных связей авиационных происшествий из-за столкновений, совершившихся в отечественной авиации за последнее десятилетие, показало, что все столкновения произошли в результате грубых нарушений законов лётной службы лицами, осуществляющими организацию, управление или выполнение полётов. Характерными нарушениями были: допуск к полётам недоученных или неподготовленных лётчиков и лиц гражданского персонала (свыше 50 % столкновений), отступление от установленного порядка методики выполнения заданий (более 15 % столкновений), пренебрежение обоснованными мерами безопасности полётов (около 20 % столкновений), недисциплинированность лётчиков (около 10 % столкновений).

Подавляющее большинство столкновений (около 90 %) произошло в групповых полётах, предусматривающих сближение и взаимодействие одиночных самолётов. Причём, столкновения в этих полётах явились, в основном, следствием невыполнения лётчиками действий, установленных Наставлением по производству полётов при потере ведущего или впереди летящего самолёта при ручном пилотировании самолётов. За последние 35 лет в частях ВВС СССР и РФ произошло 84 столкновения летательных аппаратов на земле и в воздухе.

Абсолютное большинство АП (85 %) происходило на исправной авиационной технике и в простых метеоусловиях, в 75 % случаев непосредственной причиной АП выступает «человеческий фактор», связанный со снижением уровня натренированности лётного и инструкторского состава.

Таким образом, наиболее сложным и аварийным режимом управления высокоманёвренных ведомых ЛА является их ручное пилотирование. Именно высокая психофизиологическая нагрузка на командира воздушного судна при управлении в боевых порядках, обусловленная неблагоприятными характеристиками устойчивости и управляемости ЛА, определяет большой процент ошибочных действий лётчиков. Одним из направлений повышения безопасности полётов авиации является авто-

матизация различных этапов полёта с учётом деятельности лётчика, позволяющая улучшить лётно-технические характеристики (а точнее говоря, пилотажные характеристики) высокоманёвренных ведомых ЛА и снизить количество авиационных происшествий.

В связи с бурным развитием комплексов с ЛА и расширением перечня выполняемых ими задач возрастает актуальность совершенствования оборудования ЛА для решения задач навигации и управления. При этом одной из сложных и полностью не решенных задач пилотирования является задача полета установленным строем.

Применение беспилотной авиации в составе группы способствует повышению боевой эффективности при нанесении массированных ударов, эффективному прорыву ПВО противника на узком участке фронта, успешному решению специальных задач (например, дозаправки ЛА в воздухе). Однако организовать групповой полет является сложной задачей, которая решается в комплексе и предусматривает выполнение поставленных задач в плотном строю сообща. В таком плотном строю необходимо соблюдать жесткие требования по точности выдерживания параметров.

Относительно недавно в перечень задач САУ ЛА включались задачи траекторного управления и угловой стабилизации, которые выполнялись вручную или дистанционно с помощью работы лётчика-оператора. Эти действия сильно ограничивают возможности группового применения ЛА. Поэтому на сегодняшний день использование автоматического управления в режиме группового полета является востребованным, а это, в свою очередь, позволяет ЛА выполнять различные задачи в плотном строю (группой) самостоятельно, без участия оператора.

В настоящее время многие ученые разрабатывают алгоритмы, которые позволяют автоматизировать полет ЛА.

Однако результаты полученных исследований направлены на структуру САУ и алгоритмы управления ЛА [2]. Для синтеза алгоритмического обеспечения применялись различные методы, с помощью которых достигается реализация управления многосвязными объектами, но не полностью учитывается влияние внешних возмущений. Поэтому для достижения поставленных высоких требований к точности управления ЛА при полете строем с применением указанных методов является весьма затруднительным. Важным отличием

является то, что авторы в своих работах ориентируются на РТС межсамолетной навигации, которые нецелесообразно использовать в военной авиации ввиду применения различных радиопомех. Поэтому появляется актуальность в разработке оптико-электронного комплекса межсамолетной навигации, нечувствительного к воздействию радиопомех.

Для определения местоположения ведущего самолета предлагается рассмотреть в качестве измерительного комплекса систему технического зрения (СТЗ), которая способна решать большой круг задач на различных этапах, в частности, и полет строем.

Предлагается установить на ведущем ЛА СТЗ с разнесенными цифровыми фотокамерами в количестве две штуки (рис. 1), в поле зрения которых находится ведущий самолет.

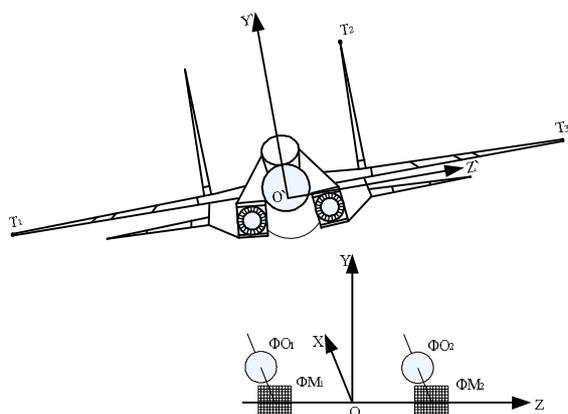


Рис. 1. Схема измерения положения ведущего самолета

### Решение сформулированной задачи

Рассмотрим геометрические соотношения, которые помогают описать процесс измерения положения ведомого самолета относительно ведущего. Полагаем, что обработка изображений ведущего самолета выполняется с целью определения координат трех идентичных точек на фоточувствительных матрицах. Причем, в качестве этих точек выбираются оптически контрастные элементы конструкции ЛА, например окончания крыла, хвостового оперения и т. д. (рис. 2).

$$X_i^{(2)} = F \left( \frac{B}{Z_{2i} - Z_{1i}} + 1 \right), \quad Y_i^{(2)} = \frac{Y_{1i} B}{Z_{1i} - Z_{2i}}, \quad Z_i^{(2)} = \frac{B Z_{1i} + Z_{2i}}{2 Z_{1i} - Z_{2i}}, \quad (1)$$

где  $Y_{1i}, Z_{1i}, Y_{2i}, Z_{2i}$  – координаты изображений точек  $T_i$  на фоточувствительных матрицах, первый индекс соответствует номеру фоточув-



Рис. 2. Определение координат самолета по трем идентичным инфракрасным маякам, расположенным на оптически контрастных элементах конструкции летательного аппарата

Для упрощения процедуры обработки изображений возможно использование полупроводниковых источников света в инфракрасном диапазоне (например, с длиной волны  $\lambda = 1,54$  мкм) [3], что позволяет работать даже в сложных метеословиях.

Система координат (СК)  $O_1X_1Y_1Z_1$  является прямоугольной и привязана к ведущему ЛА, ось  $O_1X_1$  – с продольной осью, ось  $O_1Z_1$  – с поперечной осью, а ось  $O_1Y_1$  дополняет СК до правой. В свою очередь, СК  $O_2X_2Y_2Z_2$  связана с ведомым ЛА, где ось  $O_2X_2$  направлена параллельно продольной оси ЛА и оптическим осям фотообъективов  $\Phi O_1$  и  $\Phi O_2$ , ось  $O_2Z_2$  параллельна поперечной оси ЛА и совпадает с линией, которая соединяет центры фоточувствительных матриц  $\Phi M_1$  и  $\Phi M_2$ ,  $O_2Y_2$ , перпендикулярна осям  $O_2X_2$  и  $O_2Z_2$ , добавляя их до правой СК. Координаты трех идентичных точек  $T_i(X_i^{(1)}, Y_i^{(1)}, Z_i^{(1)})$  в СК  $O_1X_1Y_1Z_1$  считаем заранее известными. Длину между центрами фоточувствительных матриц обозначим  $B$ , а фокусные расстояния фотообъективов –  $F_1 = F_2 = F$ .

Работа бортовой СТЗ сводится к измерению координат точек  $T_i$  в системе координат  $O_2X_2Y_2Z_2$ . Данные координаты находим следующим образом

ствительной матрицы, второй индекс  $i = \overline{1,3}$  – номер точки.

Тогда координаты ведущего ЛА  $X_0^{(2)}, Y_0^{(2)}, Z_0^{(2)}$  в системе  $O_2X_2Y_2Z_2$  определяются посредством следующего соотношения

$$\begin{pmatrix} X_0^{(2)} & Y_0^{(2)} & Z_0^{(2)} \end{pmatrix}^T = \begin{pmatrix} X_i^{(2)} & Y_i^{(2)} & Z_i^{(2)} \end{pmatrix}^T - A^T \begin{pmatrix} X_i^{(1)} & Y_i^{(1)} & Z_i^{(1)} \end{pmatrix}^T \quad (2)$$

где матрица направляющих косинусов  $A$  описывает преобразование координат вектора при

переходе от системы  $O_2X_2Y_2Z_2$  к системе  $O_1X_1Y_1Z_1$ . Она имеет следующий вид

$$A = \begin{pmatrix} \cos \beta \cos \chi & \sin \chi & -\sin \beta \cos \chi \\ \sin \beta \sin \alpha - \sin \chi \cos \beta \cos \alpha & \cos \alpha \cos \phi & \cos \beta \sin \alpha + \sin \beta \sin \chi \cos \alpha \\ \sin \beta \cos \alpha + \cos \beta \sin \chi \sin \alpha & -\cos \chi \sin \alpha & \cos \beta \cos \alpha - \sin \beta \sin \chi \sin \alpha \end{pmatrix} \quad (3)$$

здесь  $\alpha, \beta, \chi$  – неизвестные углы взаимной ориентации ведущего самолета относительно ведомого.

Вектор  $(X_i^{(1)} Y_i^{(1)} Z_i^{(1)})^T$ , который имеет начало в точке  $O_1$ , известен исходя из условия задачи, а вектор  $(X_i^{(2)} Y_i^{(2)} Z_i^{(2)})^T$ , имеющий начало в точке  $O_2$ , в СК  $O_2X_2Y_2Z_2$  непосредственно измеряется благодаря СТЗ, это означает, что после определения матрицы  $A$  соотношение (2) можно использовать для вычисления координат ведущего самолета относительно ведомого [4].

Матричное уравнение (2) в скалярном виде представляет собой систему девяти уравнений относительно шести неизвестных  $X_0^{(2)}, Y_0^{(2)}, Z_0^{(2)}, \alpha, \beta, \chi$ . Такая система уравнений относится к числу переопределенных, а для их ре-

шения в общем случае необходимо использовать специальные численные методы. Однако для системы уравнений (2) возможно аналитическое решение, причем условием разрешимости уравнений является расположение точек  $T_i$  в вершинах треугольника ненулевой площади, что, с одной стороны, обеспечивает неколлинеарность сторон треугольника  $T_1T_2T_3$  и неравенство нулю определителя обращаемой матрицы в следующем соотношении. С другой стороны, погрешности измерений величин  $\alpha, \beta, \chi$ , тем меньше, чем больше площадь треугольника, что связано с большей измерительной базой измерительного устройства, образованного СТЗ и группой точек  $T_1T_2T_3$ .

Решение задачи достигается с помощью применения следующего матричного выражения для матрицы  $A$ , полученного ранее.

$$A = \begin{pmatrix} X_2^{(1)} - X_1^{(1)} & X_3^{(1)} - X_2^{(1)} & (Y_2^{(1)} - Y_1^{(1)})(Z_3^{(1)} - Z_2^{(1)}) - (Y_3^{(1)} - Y_2^{(1)})(Z_2^{(1)} - Z_1^{(1)}) \\ Y_2^{(1)} - Y_1^{(1)} & Y_3^{(1)} - Y_2^{(1)} & (X_3^{(1)} - X_2^{(1)})(Z_2^{(1)} - Z_1^{(1)}) - (X_2^{(1)} - X_1^{(1)})(Z_3^{(1)} - Z_2^{(1)}) \\ Z_2^{(1)} - Z_1^{(1)} & Z_3^{(1)} - Z_2^{(1)} & (X_2^{(1)} - X_1^{(1)})(Y_3^{(1)} - Y_2^{(1)}) - (X_3^{(1)} - X_2^{(1)})(Y_2^{(1)} - Y_1^{(1)}) \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} X_2^{(2)} - X_1^{(2)} & X_3^{(2)} - X_2^{(2)} & (Y_2^{(2)} - Y_1^{(2)})(Z_3^{(2)} - Z_2^{(2)}) - (Y_3^{(2)} - Y_2^{(2)})(Z_2^{(2)} - Z_1^{(2)}) \\ Y_2^{(2)} - Y_1^{(2)} & Y_3^{(2)} - Y_2^{(2)} & (X_3^{(2)} - X_2^{(2)})(Z_2^{(2)} - Z_1^{(2)}) - (X_2^{(2)} - X_1^{(2)})(Z_3^{(2)} - Z_2^{(2)}) \\ Z_2^{(2)} - Z_1^{(2)} & Z_3^{(2)} - Z_2^{(2)} & (X_2^{(2)} - X_1^{(2)})(Y_3^{(2)} - Y_2^{(2)}) - (X_3^{(2)} - X_2^{(2)})(Y_2^{(2)} - Y_1^{(2)}) \end{pmatrix}^{-1} \quad (4)$$

После вычисления матрицы  $A$  углы положения ведомого самолета выражаются

$$\alpha = -\arctg(a_{32} / a_{22}) \quad (5)$$

$$\beta = -\arctg(a_{13} / a_{11}) \quad (6)$$

$$\chi = \arcsin a_{12}, \quad (7)$$

где  $a_{nm}$  – коэффициенты матрицы  $A$ , а  $n, m = \overline{1,3}$  номера ее строк и столбцов.

Таким образом, поэтапное применение приведенных соотношений дает возможность для вычисления искомых координат положения ведущего самолета  $X_0^{(2)}, Y_0^{(2)}, Z_0^{(2)}, \alpha, \beta,$

$\chi$  относительно ведомого. При этом используются три идентичные точки, связанные с ведущим ЛА, и бортовая система технического зрения ведомого ЛА.

Формирование управляющих сигналов САУ ведомого самолета на основании информации об относительном положении ведущего самолета позволяет решить задачу автоматического полета строю, но проблема устойчивости, особенно, многозвенного строя может доставить немало сложностей при создании такой системы. Поэтому полезным шагом на пути решения этой задачи является использование управляющих сигналов ведущего самолета в законах управле-

ния ведомого. Измерение углов отклонения управляющих поверхностей и учет их в законах управления позволит сократить запаздывание управляющих воздействий ведомого самолета, которое имеет место при управлении только по относительным перемещениям ведущего ЛА.

Для определения отклонений органов управления ведущего самолета и для формализации постановки этой задачи рассмотрим управляющую поверхность в СК  $O_1X_1Y_1Z_1$ , с произвольно расположенной осью вращения  $MN$ , связанной с ведущим самолетом (рис. 3) [5].

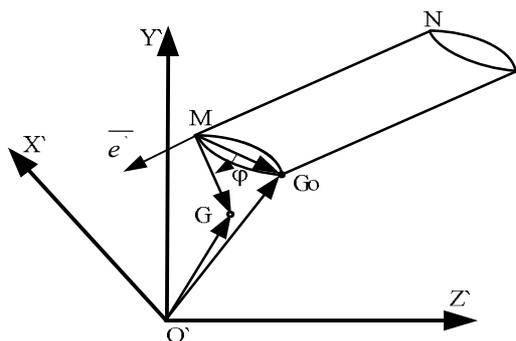


Рис. 3. Схема измерения угла отклонения управляющей поверхности

$$\begin{aligned} \phi = \arcsin \{ & e_x^{(1)} [(Y_{G_0}^{(1)} - Y_M^{(1)})(Z_G^{(1)} - Z_M^{(1)}) - (Y_G^{(1)} - Y_M^{(1)})(Z_{G_0}^{(1)} - Z_M^{(1)})] - \\ & - e_y^{(1)} [(X_{G_0}^{(1)} - X_M^{(1)})(Z_G^{(1)} - Z_M^{(1)}) - (X_G^{(1)} - X_M^{(1)})(Z_{G_0}^{(1)} - Z_M^{(1)})] + \\ & + e_z^{(1)} [(X_{G_0}^{(1)} - X_M^{(1)})(Y_G^{(1)} - Y_M^{(1)}) - (X_G^{(1)} - X_M^{(1)})(Y_{G_0}^{(1)} - Y_M^{(1)})] \} \end{aligned} \quad (8)$$

Выражение синуса угла  $\phi$  получено как смешанное произведение единичных векторов  $G$ ,  $G_0$  и  $e^{(1)}(e_x^{(1)}, e_y^{(1)}, e_z^{(1)})$ .

$$(X_G^{(1)} \ Y_G^{(1)} \ Z_G^{(1)})^T = A(X_G^{(2)} - X_0^{(2)} \ Y_G^{(2)} - Y_0^{(2)} \ Z_G^{(2)} - Z_0^{(2)})^T. \quad (9)$$

Выражение описывает преобразование координат вектора  $(X_G^{(1)} \ Y_G^{(1)} \ Z_G^{(1)})^T$ , при переходе от системы  $O_2X_2Y_2Z_2$  к системе  $O_1X_1Y_1Z_1$ .

### Выводы

Таким образом, система технического зрения, которая установлена на ведомом самолете, обеспечивает измерение всех параметров, необходимых для формирования автоматического управления его полетом. Этот подход может быть использован при автоматизации полета строем более чем двух ЛА, необходимо только оборудовать СТЗ все ведомые самолеты группы. Исследования характеристик СТЗ в ВУНЦ

Предположим, что на управляющей поверхности имеется оптическая контрастная точка  $G$  с начальными координатами  $(X_{G_0}^{(1)}, Y_{G_0}^{(1)}, Z_{G_0}^{(1)})$ , этим координатам соответствует угол отклонения управляющей поверхности  $\phi = 0$ . Также задана точка  $M(X_M^{(1)}, Y_M^{(1)}, Z_M^{(1)})$ , координаты которой расположены на оси вращения  $MN$  так, чтобы вектор единичной длины  $G$  был перпендикулярен оси вращения. Положение оси вращения задано единичным вектором  $e^{(1)}(e_x^{(1)}, e_y^{(1)}, e_z^{(1)})$ . Посредством СТЗ, которая установлена на ведомом самолете, непрерывно осуществляется процесс определения координат  $X_0^{(2)}, Y_0^{(2)}, Z_0^{(2)}$ , матрица  $A$ , а также координаты текущего положения точки  $G(X_G^{(2)}, Y_G^{(2)}, Z_G^{(2)})$  посредством соотношений (1).

Тогда угол отклонения органа управления от его нулевого положения определяется следующим образом:

В правой части этого выражения неизвестны только координаты вектора  $(X_G^{(1)} \ Y_G^{(1)} \ Z_G^{(1)})^T$ , которые определяются путем применения следующего соотношения

ВВС «ВВА» показывают, что в полете с дистанциями 5–150 м могут быть достигнуты погрешности измерения координат не хуже 0,1 м. Так экспериментальная установка, предназначенная для проверки алгоритмов, обеспечивает вычислительный цикл с периодом в 1 секунду. Установка выполнена с применением двух веб-камер с максимальным разрешением 1280×1024 и ноутбука с двухъядерным процессором, имеющим тактовую частоту 2 ГГц и ОЗУ емкостью 2 Гб. При этом использовалась операционная система Windows XP и язык программирования Perl. Использование специализированного вычислителя, более рациональной процедуры обработки изображений, программного обеспечения на языке низкого уровня, по-видимому,

могут обеспечить вычислительный процесс в реальном времени на существующей элементной базе. Структура такого программного обеспечения должна включать модули считывания оцифрованных изображений с фоточувствительных матриц, модуль обработки изображений, обеспечивающий отыскание изображений маяков и определение их координат на фотоматрицах, а также модуль вычислений координат углового и линейного положения ведомого ЛА относительно ведущего.

#### Литература

1. Соловьев Ю.А. Спутниковая навигация и ее приложения. М.: Эко-Трендз, 2003. 326 с.

2. Бондарев В.Г., Ипполитов С.В., Лопаткин Д.В. Рой ударных беспилотных летательных аппаратов // Сборник тезисов докладов научно-технической конференции. Анапа: Издательство ФГАУ «ЭРА», 2019. С. 116-124.

3. Бондарев В.Г., Лопаткин Д.В., Смирнов Д.А. Автоматическая посадка летательного аппарата // Научный вестник ВГУ. Серия системный анализ и информационные технологии. 2018. №2. С. 44-51.

4. Бондарев В.Г. Автоматическая посадка самолета на авианосец // Научный вестник МГТУ ГА. 2012. №185. С. 124-131.

5. Пат. 2349931 Российская Федерация, МПК7 G 01s 11/00. Способ определения координат и углов отклонения управляющих поверхностей ведущего самолета и устройство для его осуществления / Бондарев В.В., Бондарев В.Г., Бондарев М.В., Лейбич А.А.; заявитель и патентообладатель авторы. № 20007149017/09; заявл. 25.12.07; опубл. 20.03.09, Бюл. №8. 4 с.; ил.

Поступила 05.01.2021; принята к публикации 17.02.2021

#### Информация об авторах

**Смирнов Дмитрий Андреевич** - инженер-испытатель, Государственный летно-испытательный центр имени В.П. Чкалова, Войсковая часть 15650 (416504, Россия, Астраханская обл., г. Ахтубинск), e-mail: drone0806@ Rambler.ru

**Бондарев Валерий Георгиевич** - канд. техн. наук, профессор, доцент кафедры эксплуатации авиационного оборудования факультета авиационного оборудования, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (394064, Россия, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А), e-mail: vaiu@mil.ru

**Николенко Александр Владимирович** - младший научный сотрудник 21 отдела научно-исследовательского центра (проблем применения, обеспечения и управления авиацией ВВС), Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (394064, Россия, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А); аспирант кафедры прикладной математики и механики, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: nikolenko.alexandr.93@yandex.ru

### SOLVING THE PROBLEM OF INTER-AIRCRAFT NAVIGATION TO ENSURE FLYING IN FORMATION USING A TECHNICAL VISION SYSTEM

D.A. Smirnov<sup>1</sup>, V.G. Bondarev<sup>2</sup>, A.V. Nikolenko<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>State Flight Test Center named after V.P. Chkalov, Military unit 15650, Akhtubinsk, Russia

<sup>2</sup>Military Scientific Educational Center of Military-Air Forces “N.E. Zhukovsky and Ju.A. Gagarin Military-Air Academy”, Voronezh, Russia

<sup>3</sup>Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

**Abstract:** the article provides a brief analysis of both domestic and foreign inter-aircraft navigation systems. In the course of the analysis, we found the shortcomings of inter-aircraft navigation systems and presented an up-to-date approach to improving the accuracy of the navigation system through the use of a technical vision system. To determine the location of the leading aircraft, we proposed to consider a technical vision system as a measuring complex, which is able to solve a large range of tasks at various stages, in particular, flight in formation. We proposed to install the technical vision system on the slave aircraft in order to measure all the parameters necessary for the formation of automatic flight control of the aircraft. We performed an image processing of the leading aircraft to determine the coordinates of three identical points on photosensitive matrices. Moreover, we selected optically contrasting elements of the aircraft structure as these points, for example, the end of the wing, tail, etc. To simplify the image processing procedure, it is possible to use semiconductor light sources in the infrared range (for example, with a wavelength of  $\lambda = 1.54$  microns), which allows us to work even in difficult weather conditions. This approach can be used when automating a flight in formation of more than two aircraft, while it is only necessary to equip all the guided aircraft of the group with a technical vision system

**Key words:** technical vision system, automatic control system, inter-aircraft navigation, group flight, aircraft

#### References

1. Soloviev Yu.A. "Satellite navigation and its applications" ("Sputnikovaya navigatsiya i ee prilozheniya"), Moscow, EKO-Trendz, 2003, 326 p.
2. Bondarev V.G., Ippolitov S.V., Lopatkin D.V. "Swarm of shock unmanned aerial vehicles", *Proc. of the Scientific and Technical Conf. (Sbornik tezisov dokladov nauchno-tekhnicheskoy konferentsii)*, Anapa, ERA, 2019, pp. 116-124.
3. Bondarev V.G., Lopatkin D.V., Smirnov D.A. "Automatic landing of the aircraft", *Scientific Bulletin of VSU (Nauchnyy vestnik VGU)*, 2018, no. 2, pp. 44-51.
4. Bondarev V.G. "Automatic landing of an aircraft on an aircraft carrier", *Scientific Bulletin of MSTU (Nauchnyy vestnik MGTU GA)*, 2012, no. 185, pp. 124-131.
5. Bondarev V.V., Bondarev V.G., Bondarev M.V., Leibich A.A. "A method for determining the coordinates and angles of deviation of the control surfaces of the leading aircraft and a device for its implementation" ("Sposob opredeleniya koordinat i uglov otkloneniya upravlyayushchikh poverkhnostey vedushchego samoleta i ustroystvo dlya yego osushchestvleniya"), patent no. 2349931 of Russian Federation, appl. 25.12.07.; publ. 20.03.09, bull. no. 8-4 p.

Submitted 05.01.2021; revised 17.02.2021

#### Information about the authors

**Dmitriy A. Smirnov**, Test engineer, State Flight Test Center named after V.P. Chkalov, Military Unit 15650 (Akhtubinsk 416504, Russia), e-mail: drone0806@rambler.ru

**Valeriy G. Bondarev**, Cand. Sc. (Technical), Professor, Associate Professor, Military Scientific Educational Center of Military-Air Forces "N.E. Zhukovsky and Ju.A. Gagarin Military-Air Academy" (54A Starykh Bolshevikov str., Voronezh 398600, Russia), e-mail: vaiu@mil.ru

**Aleksandr V. Nikolenko**, Junior researcher, Military Scientific Educational Center of Military-Air Forces "N.E. Zhukovsky and Ju.A. Gagarin Military-Air Academy" (54A Starykh Bolshevikov str., Voronezh 398600, Russia); graduate student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: nikolenko.alexandr.93@yandex.ru

## АЛЬТЕРНАТИВНЫЙ КОЭФФИЦИЕНТ КОНКОРДАЦИИ ПРИ НАЛИЧИИ СВЯЗАННЫХ РАНГОВ

Ю.В. Лубенец

Липецкий государственный технический университет, г. Липецк, Россия

**Аннотация:** рассматривается оценка согласованности мнений экспертов при проведении экспертного опроса. Наиболее часто в качестве такой оценки применяется коэффициент конкордации Кендалла. Однако этот коэффициент не может в полной мере применяться для установления хорошей согласованности мнений экспертов, поскольку он показывает только отклонение от случаев полной несогласованности. Для устранения данного недостатка может рассматриваться альтернативный коэффициент конкордации, оценивающий близость сумм рангов альтернатив к случаю полной согласованности. Здесь дается определение этого коэффициента при наличии связанных рангов. Сложность определения заключается в том, что в этом случае наблюдается несколько случаев полной согласованности с различными суммами рангов. Определение альтернативного коэффициента конкордации при наличии связанных рангов проводится в два этапа. Сначала вводится его определение для упорядоченных таблиц специального вида и показывается его совпадение с коэффициентом конкордации Кендалла в этом случае. После дается определение альтернативного коэффициента конкордации в общем случае и показывается более простая формула его вычисления. Далее приводятся некоторые примеры сравнений значений рассматриваемых коэффициентов конкордации, их статистических характеристик и гистограмм

**Ключевые слова:** коэффициент конкордации, связанные ранги, оценка согласованности, экспертная оценка

### Введение

При анализе результатов экспертных опросов большое значение имеет согласованность мнений экспертов. Если установлена хорошая согласованность мнений экспертов, то решение, принимаемое на основе их мнений, является более достоверным. Наиболее широкое распространение для оценки согласованности получил коэффициент конкордации Кендалла [1]. Относительная несложность вычисления дает возможность его широкого использования в самых различных областях исследований [2].

Вместе с тем надо отметить, что при вычислении этого коэффициента используются отклонения сумм рангов от их средних значений, что соответствует случаю полной несогласованности. Поэтому коэффициент конкордации определяет отсутствие полной несогласованности и не отражает в полной мере наличие хорошей согласованности. В частности об этом шла речь в работах [3, 4] и там же был предложен альтернативный вариант коэффициента конкордации, оценивающий отклонение суммы рангов альтернатив от случая полной согласованности, который в случае отсутствия связанных рангов может трактоваться только единственным образом. Некоторые свойства

этого коэффициента были рассмотрены в работе [5]. Там же был введен и другой коэффициент конкордации, который в большей степени учитывает согласованность мнений экспертов для лучших альтернатив. Подобные коэффициенты могут иметь важные практические применения, рассмотренные ранее, например, в работе [6].

Целью этой работы является определение альтернативного коэффициента конкордации для случая наличия связанных рангов.

### Коэффициент конкордации и альтернативный коэффициент конкордации

Будем рассматривать таблицы опросов  $m$  экспертов, которые оценивают  $n$  альтернатив решения какой-либо задачи. Каждый эксперт выставляет ранги от 1 до  $n$  следующим образом: лучшей альтернативе присваивается ранг 1, следующей – 2, и так далее, наихудшая альтернатива получает ранг  $n$  (табл. 1). Если, по мнению эксперта, некоторые альтернативы имеют одинаковые ранги, то они усредняются. Например, вместо рангов 2 и 3 записываются 2 раза ранги 2,5. Подобные таблицы опроса экспертов мы будем называть здесь просто таблицами.

Таблица 1  
Пример таблицы опроса экспертов

Эксперты	Альтернативы					
	1	2	3	...	$n-1$	$n$
1	1	2	3	...	$n-1$	$n$
2	2	1	4	...	$n-2$	$n$
3	1	4,5	4,5	...	$n$	$n-1$
...	...	...	...	...	...	...
$m-1$	2,5	2,5	1	...	$n-1$	$n$
$m$	2	2	2	...	$n$	$n-1$

Самым распространенным способом оценки согласованности мнений экспертов является вычисление коэффициента конкордации Кендалла. Он вычисляется по формуле  $W = \frac{S}{1/12m^2(n^3 - n) - mT}$ , где  $S$  – сумма квадратов отклонений сумм рангов альтернатив от среднего значения суммы рангов,  $T = \sum \frac{s^3 - s}{12}$  – поправка на наличие связанных рангов, сумма берется по всем группам связанных (одинаковых) рангов, при этом  $s$  – количество рангов в группе.

Можно заметить, что коэффициент конкордации рассчитывает не близость к случаю полной согласованности, а отклонение от случая полной несогласованности. Для оценки отклонения сумм рангов альтернатив от случая полной согласованности в случае отсутствия связанных рангов в [3] был введен альтернативный вариант коэффициента конкордации. Заметим, что для случая полной согласованности ранги всех альтернатив у всех экспертов совпадают, а суммы рангов альтернатив равны значениям  $m, 2m, \dots, nm$ . Тогда для таблицы опроса экспертов суммы рангов альтернатив упорядочиваются по возрастанию и рассматриваются квадраты их отклонений от указанных сумм случая полной согласованности. Коэффициент вычисляется по формуле, похожей на формулу вычисления коэффициента конкордации Кендалла при отсутствии связанных рангов

$W^a = \frac{12\Delta}{m^2(n^3 - n)}$ , где  $\Delta$  – сумма квадратов отклонений сумм рангов альтернатив от случая полной согласованности.

В этой работе мы будем называть подобный коэффициент альтернативным коэффициентом конкордации и при отсутствии связанных рангов вычислять по формуле

$W_a = 1 - \frac{12\Delta}{m^2(n^3 - n)}$ , чтобы в случае полной согласованности иметь  $W_a = 1$ , а в случае полной

несогласованности –  $W_a = 0$ . Трудность определения альтернативного коэффициента конкордации для случая связанных рангов заключается в том, что при возможности усреднения рангов возникает несколько случаев полной согласованности, при этом суммы рангов в них различные. Пример такой полной согласованности показан в табл. 2.

Таблица 2  
Пример полной согласованности экспертов

Эксперты	Альтернативы					
	1	2	3	...	$n-1$	$n$
1	1	2,5	2,5	...	$n-1$	$n$
2	1	2,5	2,5	...	$n-1$	$n$
3	1	2,5	2,5	...	$n-1$	$n$
...	...	...	...	...	...	...
$m$	1	2,5	2,5	...	$n-1$	$n$

Для всех таких случаев полной согласованности альтернативный коэффициент конкордации должен быть равен максимальному значению 1. Заметим, что для коэффициента конкордации Кендалла такой ситуации не наблюдается, поскольку суммы рангов для случаев полной несогласованности всегда одинаковы. Для учета всех таких случаев полной согласованности определим альтернативный коэффициент конкордации в два этапа.

### Определение альтернативного коэффициента конкордации для упорядоченных таблиц

Будем называть таблицу упорядоченной, если она представлена в виде, в котором ранги альтернатив у каждого эксперта не уменьшаются при увеличении номера альтернативы. Обозначим  $x_1 \leq x_2 \leq \dots \leq x_n$  – суммы рангов альтернатив такой таблицы. Определим сначала альтернативный коэффициент конкордации для таких таблиц.

Оценим значение  $\Delta = \sum_{i=1}^n (x_i - mi)^2$ . Рассмотрим сначала упорядоченную таблицу без связанных рангов. В этом случае

$$\Delta_{\max} = \sum_{i=1}^n \left( m \frac{n+1}{2} - mi \right)^2 = \frac{1}{12} m^2 (n^3 - n), \text{ а } T = 0.$$

Покажем, что при усреднении рангов с  $k$  по  $k+s-1$  включительно у  $t$  экспертов, где  $1 \leq t \leq m$ , максимальная сумма квадратов отклонений суммы рангов в упорядоченной таблице от случая полной согласованности уменьшится на величину  $t^2 \frac{s^3 - s}{12}$ . В самом деле,

$$\begin{aligned} \Delta &= \sum_{i=k}^{k+s-1} \left( (m-t)i + t \left( k + \frac{s-1}{2} \right) - mi \right)^2 = \\ &= t^2 \sum_{i=k}^{k+s-1} \left( k + \frac{s-1}{2} - i \right)^2 = t^2 \sum_{j=1}^s \left( \frac{s+1}{2} - j \right)^2 = \\ &= t^2 \left( s \frac{(s+1)^2}{4} - s \frac{(s+1)^2}{2} + \frac{s(s+1)(2s+1)}{6} \right) = \\ &= t^2 \frac{s^3 - s}{12}. \end{aligned} \quad (1)$$

Аналогично можно рассмотреть усреднения других рангов. Тогда

$$\Delta_{\max} = \frac{1}{12} m^2 (n^3 - n) - mT. \quad (2)$$

Теперь определим альтернативный коэффициент конкордации по формуле

$$W_a = 1 - \frac{mT - \Delta}{1/12 m^2 (n^3 - n) - mT}. \quad (3)$$

Тогда при  $t = m$  получаем  $W_a = 1$ , поскольку в этом случае  $\Delta = m^2 \frac{s^3 - s}{12} = mT$ , что и соответствует случаю полной согласованности при наличии связанных рангов. Если  $0 < t < m$ , получим  $mT - \Delta = t(m-t) \frac{s^3 - s}{12} > 0$ .

### Альтернативный коэффициент конкордации и коэффициент конкордации Кендалла для упорядоченных таблиц

Покажем, что для упорядоченных таблиц альтернативный коэффициент конкордации и коэффициент конкордации Кендалла равны,

$$W_a = W. \text{ Имеем } W_a = \frac{1/12 m^2 (n^3 - n) - 2mT + \Delta}{1/12 m^2 (n^3 - n) - mT}$$

и  $W = \frac{S}{1/12 m^2 (n^3 - n) - mT}$ . Достаточно показать, что

$$S - 1/12 m^2 (n^3 - n) - \Delta = -2mT. \quad (4)$$

Преобразуем левую часть требуемого равенства.

$$\begin{aligned} &\sum_{i=1}^n \left( x_i - m \frac{n+1}{2} \right)^2 - \sum_{i=1}^n \left( m \frac{n+1}{2} - mi \right)^2 - \\ &- \sum_{i=1}^n (x_i - mi)^2 = \sum_{i=1}^n (x_i - mi)(x_i - m(n+1-i)) - \\ &- \sum_{i=1}^n (x_i - mi)^2 = -m \sum_{i=1}^n (n+1-2i)(x_i - mi). \end{aligned} \quad (5)$$

Покажем, что

$$- \sum_{i=1}^n (n+1-2i)(x_i - mi) = -2mT. \quad (6)$$

Сначала преобразуем выражение

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n (n+1-2i)(x_i - mi) &= \sum_{i=1}^n (n+1-2i)x_i - \\ &- m(n+1) \sum_{i=1}^n i + 2m \sum_{i=1}^n i^2 = \sum_{i=1}^n (n+1-2i)x_i - \\ &- \frac{mn(n+1)^2}{2} + 2m \frac{n(n+1)(2n+1)}{6} = \\ &= \sum_{i=1}^n (n+1-2i)x_i + \frac{m(n^3 - n)}{6}. \end{aligned} \quad (7)$$

Остается доказать, что

$$- \sum_{i=1}^n (n+1-2i)x_i = \frac{m(n^3 - n)}{6} - 2mT. \quad (8)$$

При  $T = 0$  имеем  $x_i = mi$  для всех  $i$ . Тогда

$$- \sum_{i=1}^n (n+1-2i)mi = \frac{m(n^3 - n)}{6}, \text{ как было показа-}$$

но выше. Отметим важный момент, поскольку рассматривается упорядоченная таблица, все усреднения, меняя значения  $x_i$ , не меняют их порядка. Рассмотрим усреднение рангов с  $k$  по  $k+s-1$  включительно. Тогда значение суммы

$- \sum_{i=1}^n (n+1-2i)mi$  изменится на следующую величину

$$\begin{aligned} &-m \sum_{i=k}^{k+s-1} (n+1-2i) \left( i - \left( k + \frac{s-1}{2} \right) \right) = \\ &= -\frac{m}{2} \sum_{i=1}^s (n-2k-2i+3)(2i-s-1) = \\ &= 2m \sum_{i=1}^s i^2 - m(n-2k+s+4) \sum_{i=1}^s i + \\ &+ \frac{m}{2} (n-2k+3)s(s+1) = m \frac{s(s+1)(2s+1)}{3} - \\ &- \frac{m}{2} s(s+1)^2 = \frac{m(s^3 - s)}{6} = 2mT. \end{aligned} \quad (9)$$

Таким образом, получаем требуемую формулу.

### Определение альтернативного коэффициента конкордации в общем случае

Для произвольной таблицы составим упорядоченную таблицу, упорядочив строки по возрастанию. Такая упорядоченная таблица будет играть роль таблицы при наилучшем согласовании, возможном при фиксированных наборах рангов у экспертов. При этом мы не будем

предполагать полную согласованность для случаев, когда это невозможно для некоторых наборов рангов.

Будем определять альтернативный коэффициент конкордации, находя отклонение сумм заданной таблицы от сумм упорядоченной таблицы и нормируя значение коэффициента на отрезке  $[0, W_0]$ , где  $W_0$  – альтернативный коэффициент конкордации упорядоченной таблицы. Формула будет иметь вид

$$W_a = \left(1 - \frac{D}{D_{\max}}\right) W_0. \quad (10)$$

В этой формуле используются обозначения:  $D$  – сумма квадратов отклонений сумм рангов заданной таблицы от сумм рангов упорядоченной таблицы,  $D_{\max}$  – максимальное значение этой суммы. Несложно видеть, что сумма квадратов отклонений достигает максимального значения в случае, когда все суммы рангов равны среднему значению  $m \frac{n+1}{2}$ . Бо-

лее подробно, если  $y_1 \leq y_2 \leq \dots \leq y_n$  – суммы рангов заданной таблицы и  $x_1 \leq x_2 \leq \dots \leq x_n$  – суммы рангов упорядоченной таблицы, которая получена из заданной упорядочением по возрастанию рангов во всех строках, то

$$W_a = \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2}{\sum_{i=1}^n \left(x_i - m \frac{n+1}{2}\right)^2}\right) W_0. \quad (11)$$

Покажем, что имеет место более простая формула для вычисления альтернативного коэффициента конкордации

$$W_a = \frac{D_{\max} - D}{1/12 m^2 (n^3 - n) - mT}. \quad (12)$$

Заметим, что

$$W_a = \left(1 - \frac{D}{D_{\max}}\right) W_0 = \frac{D_{\max} - D}{D_{\max}} \cdot \frac{1/12 m^2 (n^3 - n) - 2mT + \Delta}{1/12 m^2 (n^3 - n) - mT}. \quad (13)$$

Следовательно, достаточно доказать, что

$$D_{\max} = 1/12 m^2 (n^3 - n) - 2mT + \Delta \quad (14)$$

или

$$-1/12 m^2 (n^3 - n) - \Delta + D_{\max} = -2mT. \quad (15)$$

Но поскольку  $D_{\max} = \sum_{i=1}^n \left(x_i - m \frac{n+1}{2}\right)^2$ , мы

получаем ранее доказанное равенство, что завершает доказательство формулы.

### Некоторые замечания, полученные при расчете альтернативного коэффициента конкордации

С помощью написанной автором программы были произведены расчеты значений альтернативного коэффициента конкордации и коэффициента конкордации Кендалла в случаях наличия связанных рангов для некоторых значениях  $m$  и  $n$ . Программа осуществляла перебор всех возможных различных способов заполнения таблиц и рассчитывала некоторые характеристики. В частности при  $m = 3$  и  $n = 5$  были получены такие результаты. Среднее значение альтернативного коэффициента конкордации равно 0,589 и среднеквадратическое отклонение составило 0,155. Для коэффициента конкордации Кендалла эти значения равны соответственно 0,333 и 0,186. Отметим, что при отсутствии связанных рангов среднее значение альтернативного коэффициента конкордации равно 0,711, что существенно больше, чем в случае наличия связанных рангов. Среднеквадратическое отклонение при этом примерно такое же и равно 0,154.

Максимальная разница между значениями альтернативного коэффициента конкордации и коэффициента конкордации Кендалла составила 0,494 для табл. 3.

Таблица 3

Таблица с максимальной разницей между коэффициентами

Эксперты	Альтернативы				
	1	2	3	4	5
1	1	2	3,5	3,5	5
2	1	3,5	5	3,5	2
3	4	2	1	3	5

В приведенной выше таблице альтернативный коэффициент конкордации принимает значение 0,741, в то время как значение коэффициента конкордации Кендалла здесь равно 0,247. При отсутствии связанных рангов максимальная разница между коэффициентами составляет 0,489, при этом  $W_a = 0,711$  и  $W = 0,222$  (табл. 4).

Таблица 4

Таблица с максимальной разницей между коэффициентами без связанных рангов

Эксперты	Альтернативы				
	1	2	3	4	5
1	1	3	2	4	5
2	1	3	2	5	4
3	4	2	5	1	3

На рис. 1 показана гистограмма распреде-

ления коэффициента конкордации Кендалла для случайно заполненных таблиц при  $m = 3$  и  $n = 5$ . При этом на горизонтальной оси гистограммы номером  $k$  обозначен промежуток  $\left[ \frac{k-1}{100}; \frac{k}{100} \right)$  (в качестве последнего промежутка берется отрезок), на вертикальной оси показано количество значений, попавших в соответствующий промежуток. На гистограмме заметен большой всплеск значений коэффициента на промежутке  $[0,33; 0,34)$ .

В результате программных вычислений была получена гистограмма распределения коэффициента альтернативного коэффициента конкордации для случайно заполненных таблиц при тех же значениях  $m$  и  $n$ , приведенная на рис. 2. Можно предположить, что после нормировки распределение альтернативного коэффициента конкордации асимптотически стремится к распределению  $\chi^2$ , как и в случае отсутствия связанных рангов, что было показано в [4].

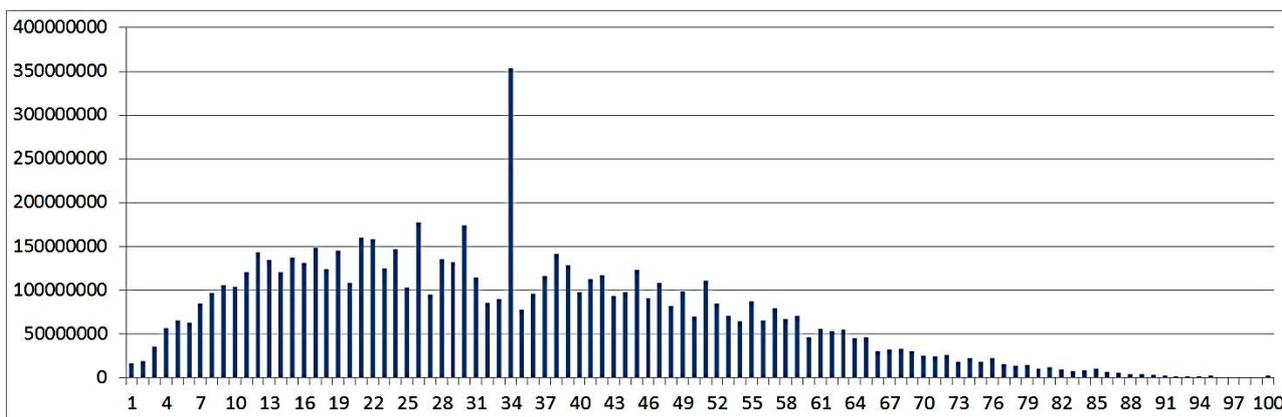


Рис. 1. Гистограмма распределения коэффициента  $W$  для  $m = 3$  и  $n = 5$

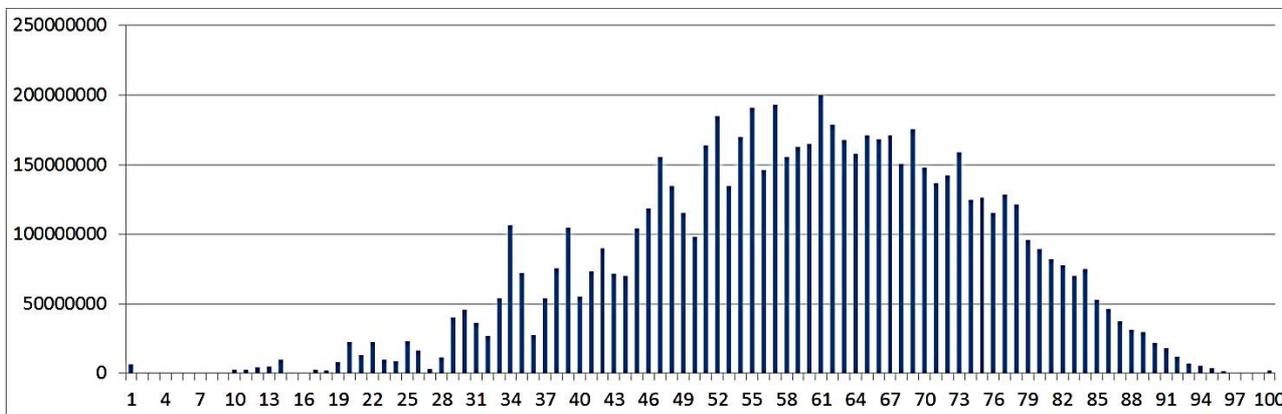


Рис. 2. Гистограмма распределения коэффициента  $W_a$  для  $m = 3$  и  $n = 5$

### Заключение

Рассмотрен альтернативный коэффициент конкордации, который в отличие от коэффициента конкордации Кендалла, оценивает близость имеющихся значений рангов альтернатив, выставленных экспертами, к случаям полной согласованности, что в большей степени отражает оценку согласованности мнений экспертов. Дано определение этого коэффициента при наличии связанных рангов с учетом того, что случаев полной согласованности может быть

несколько.

Показано, что альтернативный коэффициент конкордации и коэффициент конкордации Кендалла равны для упорядоченных таблиц, несмотря на различия в подходах к их определению. Выведена более простая формула для вычисления альтернативного коэффициента конкордации, чем непосредственно по определению. Рассмотрены некоторые примеры и статистические данные.

Применение альтернативного коэффициента конкордации позволит провести более

точную оценку согласованности мнений экспертов по сравнению с коэффициентом конкордации Кендалла.

#### Литература

1. Кендалл М. Ранговые корреляции. М.: Статистика, 1975. 216 с.
2. Прокофьев В.А., Головкин М.В. Новый аспект применения коэффициента конкордации в статистических исследованиях // Вестник Самарского государственного экономического университета. 2016. № 11 (145). С. 70-73.
3. Попов Г.А., Попова Е.А. Альтернативный вариант коэффициента конкордации // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика.

2013. № 2. С. 158 – 167.

4. Попов Г.А., Попова Е.А. Асимптотическое поведение альтернативного варианта коэффициента конкордации // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2014. № 1. С. 153 – 160.

5. Лубенец Ю.В. О модифицированном коэффициенте конкордации, учитывающем в большей степени согласованность лучших альтернатив // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2017. Т. 21. № 10. С. 32–39.

6. Лубенец Ю.В. Кластеризация признаков на основе использования проверки гипотезы о независимости // Экономика и менеджмент систем управления. 2016. № 1-3 (19). С. 382-389.

Поступила 07.12.2020; принята к публикации 18.02.2021

#### Информация об авторах

Лубенец Юрий Владимирович – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры прикладной математики, Липецкий государственный технический университет (398600, Россия, г. Липецк, ул. Московская, 30), e-mail: yuv791@gmail.com

## ALTERNATIVE COEFFICIENT OF CONCORDANCE IN CASE OF CONNECTED RANKS

Yu.V. Lubenets

Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia

**Abstract:** the article considers evaluation of expert opinion consistency when conducting an expert survey. The most commonly used score is Kendall's coefficient of concordance. However, this coefficient cannot be fully applied to establish good agreement of expert opinions, as it only shows deviations from cases of complete inconsistency. To eliminate this drawback, an alternative concordance coefficient can be considered, which estimates the proximity of the sums of the ranks of the alternatives to the case of complete consistency. The article gives the definition of this coefficient in the presence of connected ranks. The difficulty of this definition lies in the fact that in this case there are several cases of complete consistency with different sums of ranks. Definition of the alternative coefficient of concordance in the presence of tied ranks is carried out in two stages. First, its definition for ordered tables of a special kind is introduced and its coincidence with Kendall's coefficient of concordance in this case is shown. After that, the definition of the alternative coefficient of concordance in the general case is given and a simpler formula for its calculation is shown. Below are some examples of comparisons of the values of the considered concordance coefficients, their statistical characteristics, and histograms

**Key words:** coefficient of concordance, connected ranks, assessing agreement, expert evaluation

#### References

1. Kendall M. "Rank correlation methods", London: Griffin, 1970, 202 p.
2. Prokofev V.A., Golovko M.V. "New aspect of the application of concordance coefficient in statistical investigations", *Bulletin of Samara State University of Economics (Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo ekonomicheskogo universiteta)*, 2016, no. 11 (145), pp. 70-73.
3. Popov G.A., Popova E.A. "Alternative of concordance coefficient", *Bulletin of Astrakhan State Technical University (Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2013, no. 2, pp. 158–167.
4. Popov G.A., Popova E.A. "Asymptotic behavior of alternative of concordance coefficient", *Bulletin of Astrakhan State Technical University (Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2014, no. 1, pp. 153-160.
5. Lubenets Yu.V. "On modified coefficient of concordance better considering coherence of best alternatives", *Bulletin of Irkutsk State Technical University (Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2017, vol. 21, no. 10, pp. 32–39.
6. Lubenets Yu.V. "Clustering features based on the use of independence hypothesis testing", *Economics and Management of Control Systems (Ekonomika i menedzhment sistem upravleniya)*, 2016, no. 1-3 (19), pp. 382-389.

Submitted 07.12.2020; revised 18.02.2021

#### Information about the authors

Yuriy V. Lubenets, Cand. Sc. (Physics and Mathematics), Lipetsk State Technical University (30 Moskovskaya str., Lipetsk 398600, Russia), e-mail: yuv791@gmail.com

DOI 10.36622/VSTU.2021.17.1.006

УДК 621.396

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УГЛА НАКЛОНА ВЕРТИКАЛЬНЫХ СТАБИЛИЗАТОРОВ САМОЛЕТА НА ЭФФЕКТИВНУЮ ПОВЕРХНОСТЬ РАССЕЯНИЯ****А.В. Володько<sup>1,2</sup>, С.М. Фёдоров<sup>1,2</sup>, Е.А. Ищенко<sup>1</sup>, М.А. Сиваш<sup>1</sup>****<sup>1</sup>Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия****<sup>2</sup>Международный институт компьютерных технологий, г. Воронеж, Россия**

**Аннотация:** рассматривается зависимость значения эффективной площади рассеяния (ЭПР) самолета от угла наклона вертикальных стабилизаторов. Моделирование производится с использованием метода геометрической теории дифракции и физической оптики, так как размеры объекта во много раз превосходят размеры длины волны. Для облучения использовалась плоская волна X-диапазона – частота 10 ГГц. По полученным результатам отражения электромагнитной волны от объекта были построены диаграммы обратного рассеяния, на основе которых была сформирована таблица, содержащая максимальные значения эффективной площади рассеяния. Было замечено, что максимальное значение эффективной площади рассеяния возникает в ситуации, когда отсутствует какой-либо наклон вертикальных стабилизаторов, и при изменении угла наклона вертикальных стабилизаторов на 5 градусов наблюдается значительное понижение максимального уровня ЭПР. При этом возможно возникновение повторных отражений от горизонтальных хвостовых стабилизаторов, что, в свою очередь, приведет к повышению уровня эффективной площади рассеяния. Грамотная оптимизация угла наклона вертикальных стабилизаторов самолета позволяет добиться значительного снижения уровня ЭПР при сохранении аэродинамических характеристик самолета, а внедрение специальных композитных стелс материалов позволяет еще сильнее понизить уровень ЭПР

**Ключевые слова:** эффективная площадь рассеяния, моностатическая ЭПР, метод геометрической теории дифракции и физической оптики

**Введение**

При проектировании современных самолетов, у которых требуется понизить значение эффективной площади рассеяния, производится моделирование отражения электромагнитных волн от объекта. Для понижения уровня отражений применяется оптимизация геометрических характеристик, например углов наклона вертикальных стабилизаторов самолета, а после достижения оптимальных значений применяются сложные стелс покрытия, которые усиливают поглощение электромагнитной волны. Так самолеты третьего и четвертого поколения в своей конструкции имеют вертикально расположенный хвостовой стабилизатор, что негативно сказывается на характеристиках ЭПР, поэтому для улучшения скрытности первых стелс самолетов было обнаружено, что наклон хвостового оперения позволяет добиться значительного снижения уровня ЭПР. Примером таких самолетов, которые имеют значительный наклон вертикальных стабилизаторов, являются СУ-57, F-22A, F-35 и другие самолеты, которые принадлежат к 5 поколению.

**Методы исследования ЭПР геометрически крупных и сложных объектов**

С развитием вычислительной техники исследование характеристик эффективной площади рассеяния крупных объектов удалось значительно упростить, так как не требуется изготавливать на этапе проектирования большого количества прототипов, производить значительные измерения. Для исследования ЭПР сложных объектов с размерами, которые значительно превосходят размер волны, применяют две основные методики расчета отраженного поля – метод моментов (МоМ) и геометрической теории дифракции и физической оптики (SBR) [1]. Как показано в [2], метод моментов требует значительно больших вычислительных мощностей, при этом погрешность вычислений является достаточно небольшой, по сравнению с методом SBR, также стоит учитывать, что точность вычислений постоянно улучшается и оптимизируется. Для исследования характеристик ЭПР исследуемого в данной статье объекта выбран метод моделирования, основанный на свойствах физической оптики.

### Исследование зависимости ЭПР самолета в горизонтальной плоскости от угла наклона вертикальных стабилизаторов

Исследуемый объект приведен на рис. 1, моделирование производилось в X-диапазоне на частоте 10 ГГц.

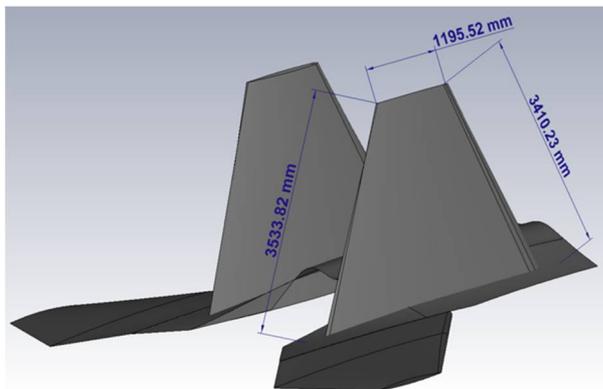


Рис. 1. Исследуемый объект

При моделировании производилось изменение угла наклона от  $0^\circ$  до  $60^\circ$ , тогда положение стабилизаторов соответствует рис. 2.

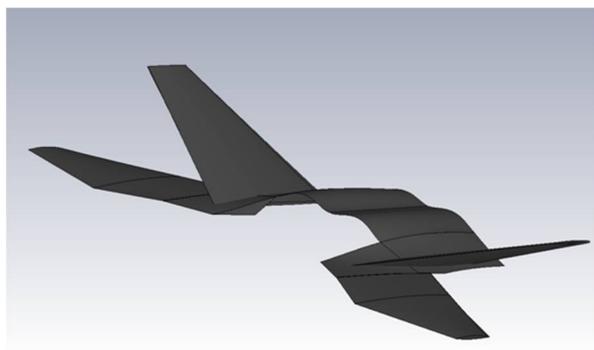


Рис. 2. Максимальный наклон вертикальных стабилизаторов (наклон  $60^\circ$ )

Построение диаграмм обратного рассеяния (ДОР) при применении метода SBR позволяет отследить теоретически ожидаемое отражение, которое отображается в виде отраженных лучей – рис. 3, а на основе полученных значений формируются диаграммы эффективной площади рассеяния.

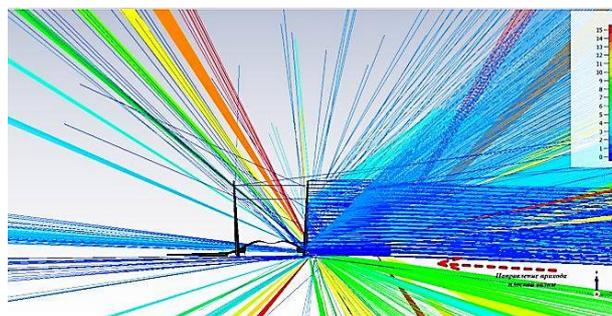


Рис. 3. Вид отраженных лучей при использовании метода SBR

На основе отраженных лучей от падающей электромагнитной волны формируются диаграммы обратного рассеяния. Для удобства анализа они приводятся в дБ ( $m^2$ ). На рис. 4 приведены диаграммы обратного рассеяния для углов наклона в  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $60^\circ$ , при этом на полученных картинах отмечены максимальные значения, так как конструкция полностью симметрична, показана ДОР только с одной стороны. В таблице приведены результаты с максимальными значениями ЭПР объекта, а также с углом наблюдения данного значения.

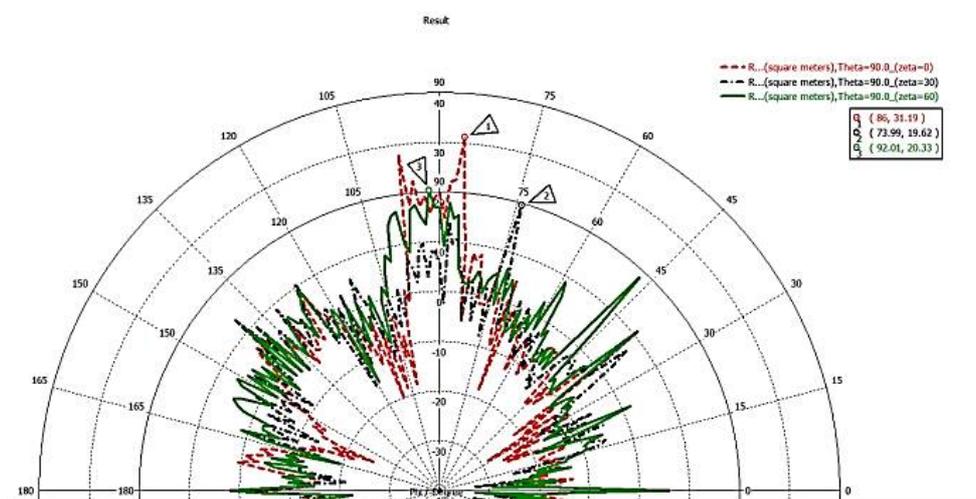


Рис. 4. Диаграммы обратного рассеяния

Значения ЭПР исследуемого объекта от угла наклона вертикальных стабилизаторов

Угол наклона, °	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
Направление максимума ЭПР, °	86	94	94	89	89	79	74	88	63	84	88	94	92
ЭПР, дБ (м <sup>2</sup> )	31,6	22,9	18,8	24	22,8	19,8	19,7	18,3	18,5	29,2	24,5	21,1	20,4
ЭПР, м <sup>2</sup>	1440	197	76,7	248	192	94,8	93	67,7	71,6	830	281	128	110
Доля ЭПР относительно 0°, %	100	14	5	17	13	7	6	5	5	58	20	9	8

По полученным результатам видно, что при изменении угла наклона вертикальных стабилизаторов даже на 5 градусов эффективная площадь рассеяния резко уменьшается, при этом очень важно учитывать отражения, которые могут возникнуть от горизонтального стабилизатора самолета, в данном случае подобная ситуация возникла при угле наклона в 45°, что привело к значительному повышению уровня ЭПР объекта, для борьбы с данной проблемой применяют самолеты без данного элемента в конструкции, например F-117, YF-23. Вертикальные стабилизаторы с различными углами наклона являются одной из отличительных особенностей самолетов пятого поколения.

### Заключение

Применение современной вычислительной техники позволяет упростить анализ многих электродинамических задач, таких как обнаружение оптимальных геометрических характе-

ристических крупных объектов для снижения ЭПР, обнаружение зон максимального отражения. Так было показано, что при облучении плоской волной с частотой 10 ГГц при изменении угла наклона вертикальных стабилизаторов на 5 градусов относительно вертикального положения максимальное значение ЭПР значительно уменьшается, при этом дополнительного понижения значений ЭПР можно достичь путем применения специальных композитных материалов и стелс покрытий.

### Литература

1. Brem R., Eibert T.F. A Shooting and Bouncing Ray (SBR) Modeling Framework Involving Dielectrics and Perfect Conductors // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2015. Vol. 63. No. 8. pp. 3599-3609.
2. Perotoni M.B., Andrade L.A. Numerical evaluation of an air-to-air missile radar cross section signature at X-band // Journal of Aerospace Technology and Management. 2011. Vol. 3. No. 3. pp. 287-294.

Поступила 24.11.2020; принята к публикации 16.02.2021

### Информация об авторах

**Володько Александр Владиславович** – канд. техн. наук, доцент кафедры радиоэлектронных устройств и систем, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), доцент кафедры информационной безопасности и систем связи, Международный институт компьютерных технологий (394026, Россия, г. Воронеж, ул. Солнечная, д. 29 б), тел. +7(473)243-77-29, e-mail: zavlabvgtu@mail.ru

**Фёдоров Сергей Михайлович** – канд. техн. наук, доцент кафедры радиоэлектронных устройств и систем, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), доцент кафедры информационной безопасности и систем связи, Международный институт компьютерных технологий (394026, Россия, г. Воронеж, ул. Солнечная, д. 29 б), тел. +7(473)243-77-29, e-mail: fedorov\_sm@mail.ru

**Ищенко Евгений Алексеевич** – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), тел. +7(473)243-77-29, e-mail: kursk1998@yandex.ru

**Сиваш Михаил Александрович** – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), тел. +7(473)243-77-29, e-mail: sivmikha@yandex.ru

## STUDY OF THE INFLUENCE OF THE TILT ANGLE OF VERTICAL STABILIZERS OF AN AIRCRAFT ON THE EFFECTIVE SCATTERING SURFACE

A. V. Volod'ko<sup>1,2</sup>, S. M. Fyedorov<sup>1,2</sup>, E. A. Ishchenko<sup>1</sup>, M. A. Sivash<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

<sup>2</sup>International Institute of Computer Technologies, Voronezh, Russia

**Abstract:** the article considers the dependence of the value of the effective scattering area (ESA) of the aircraft on the tilt angle of the vertical stabilizers. Modeling is performed using the method of the geometric theory of diffraction and physical optics since the dimensions of the object are many times larger than the dimensions of the wavelength. For irradiation, an X-band plane wave was used - a frequency of 10 GHz. Based on the results of the reflection of the electromagnetic wave from the object, backscatter diagrams were built, on the basis of which a table was formed containing the maximum values of the effective scattering area. It was noted that the maximum value of the effective scattering surface occurs in a situation where there is no inclination of the vertical stabilizers, while when the angle of inclination of the vertical stabilizers is changed by 5 degrees, a significant decrease in the maximum ESA level is observed. In this case, repeated reflections from horizontal tail stabilizers may occur, which, in turn, will lead to an increase in the level of the effective scattering surface. Competent optimization of the angle of inclination of the vertical stabilizers of the aircraft allows one to achieve a significant decrease in the ESA level while maintaining the aerodynamic characteristics of the aircraft, and the introduction of special composite stealth materials allows one to further reduce the ESA level

**Key words:** effective scattering area, monostatic ESA, method of geometric theory of diffraction and physical optics

### References

1. Brem R., Eibert T.F. "A Shooting and Bouncing Ray (SBR) modeling framework involving dielectrics and perfect conductors", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2015, vol. 63, no. 8, pp. 3599-3609.
2. Perotoni M.B., Andrade L.A. "Numerical evaluation of an air-to-air missile radar cross section signature at X-band", *Journal of Aerospace Technology and Management*, 2011, vol. 3, no. 3, pp. 287-294.

Submitted 24.11.2020; revised 16.02.2021

### Information about the authors

**Aleksandr V. Volod'ko**, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), International Institute of Computer Technologies (29 b Solnechnaya str., Voronezh 394026, Russia), tel. +7 (473)243-77-29, e-mail: zavlabvgtu@mail.ru

**Sergey M. Fyedorov**, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), International Institute of Computer Technologies (29 b Solnechnaya str., Voronezh 394026, Russia), tel. +7 (473)243-77-29, e-mail: fedorov\_sm@mail.ru

**Evgeniy A. Ishchenko**, student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel. +7 (473)243-77-29, e-mail: kursk1998@yandex.ru

**Mikhail A. Sivash**, student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel. +7 (473)243-77-29, e-mail: sivmikha@yandex.ru

## МЕТОД РАСЧЕТА РАДИОЧАСТОТНЫХ ПОМЕХ НА ОСНОВЕ ПЕРЕДАТОЧНОЙ ФУНКЦИИ

А.В. Башкиров, А.С. Демихова, Н.В. Астахов, М.В. Долженко, Д.Р. Елкин

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** предложен метод расчета передаточной функции для оценки задач помехоустойчивости и защищенности (RFI). Уравнения замкнутой формы аналитически выводятся из уравнений Максвелла и теоремы о взаимности. Задача RFI разложена на две части: дипольные моменты источника шума и передаточная функция связи с антенной. Передаточные функции могут быть получены либо из моделирования, либо из измерений. Простые измерения S-параметров могут помочь получить передаточные функции. Предложенный метод проверен с помощью численного моделирования и реальных экспериментов с использованием мобильного телефона. При моделировании источника помехи и связи помехи с антенной-приемником в предложенной работе задача разделяется на два этапа: прямая задача (источник шума излучает, а антенна выключена) и обратная задача (антенна возбуждается, а источник шума выключается). Инженеры могут использовать этот метод для выявления причин и устранения последствий воздействия электромагнитной помехи. Также предлагается метод расчета воздействия помех на основе передаточной функции для оценки степени искажения передаваемого сигнала. Данные уравнения позволяют четко разложить проблему радиопомех на две составляющие: источник шума и воздействие передаточной функции на антенну. В сравнении с обычным методом наименьших квадратов предлагаемый метод имеет лучшую точность (порядка 3 дБ)

**Ключевые слова:** электромагнитная обстановка, помехозащищенность линий передачи данных, выбор и анализ аналитических и эмпирических методов оценки помехозащищенности радиоэлектронных средств и комплексов, аналитический метод оценки, основанный на передаточной функции

### Введение

Благодаря быстрому развитию технологий в области Интернета вещей (IoT) и беспроводных технологий все больше и больше электронных устройств во всем мире теперь подключены к интернету. В электронном устройстве малого форм-фактора существует множество потенциальных источников шума, таких как система на кристалле (SoC), высокоскоростные трассы, гибкие кабели и силовые преобразователи и т. д.

Эти источники шума вызывают сбои в работе электронных устройств и связаны с радиочастотными помехами (RFI). Как правило, радиочастотные антенны часто обладают высокой чувствительностью, поэтому допустимые уровни RFI (в диапазоне от -90 дБм до -125 дБм для различных стандартов беспроводной связи) значительно ниже допустимых уровней эмиссии электромагнитной совместимости (ЭМС), указанных в документах Федеральной комиссии по связи США (FCC) и других аналогичных стандартах и правилах [1, 2, 5]. Радиочастотные помехи часто ограничивают эффективность беспроводных устройств.

Большое количество исследований было сосредоточено на понимании конкретной интерференционной задачи в разработке эффективных методов численного моделирования [1, 3, 4] влияния электромагнитных помех на электронные средства. Поскольку анализ и диагностика системы передачи данных основаны на их конкретных физических значениях, широко распространено мнение, что RFI - это непредсказуемая область на стадии разработки, где принимаются конкретные проектные решения. Поскольку разработка беспроводных систем передачи данных очень трудоемкая и наукоемкая проблема, необходимо разработать модель, которая лучше объяснит механизм RFI и предоставит больше информации инженерам-разработчикам.

Задачи оценки влияния RFI можно разделить на две составляющие: источники паразитного излучения и коэффициент связи с приёмной антенной, на которую наводится помеха. Реальные источники шума, такие как микросхемы, обычно трудно моделировать из-за их сложности. В последнее время была проделана большая работа по части моделирования источника излучения для построения эквивалентной модели источника шума.

В работе [2] для анализа RFI используется метод эквивалентности Гюйгенса. Этот метод

может быть реализован в инструментах полного волнового моделирования. Однако теоретически метод эквивалентности Гюйгенса требует наличия поля  $E$  или  $H$ , полученного на замкнутой поверхности. Измерение ближнего поля  $E$  или  $H$  сканирования поля на замкнутой поверхности часто довольно трудоемко, а иногда даже невозможно достичь из-за геометрических ограничений электрического устройства. Кроме того, этот метод дает мало физического представления о самом источнике излучения. Этот недостаток обусловлен свойством самой теоремы эквивалентности Гюйгенса. Он может только предсказать электромагнитное поле вне этой коробки Гюйгенса и не предоставляет никакой информации внутри коробки, где существует реальный шум.

В данной работе предложен метод расчета передаточной функции на основе быстрой и точной оценки RFI. Предложенный метод может помочь понять как источник шума, так и передаточную функцию связи с антенной. Задача RFI разделяется на две части: прямую и обратную задачу. Затем задача RFI аналитически моделируется путем интегрирования модели источника дипольного момента в теорему о взаимности. Предложенный метод позволяет получить передаточные функции для каждого эквивалентного дипольного момента. Инженеры могут использовать эквивалентные дипольные моменты и соответствующие передаточные функции, чтобы принять проектные решения. Он также может быть использован для эффективного численного моделирования. Независимо от количества дипольных моментов связь может быть рассчитана быстро и с требуемой точностью.

### Предложенный метод взаимности для оценки RFI

Чтобы смоделировать как источник шума, так и связь помехи с антенной-приемником, задача разделяется на два этапа: прямая задача и обратная задача, как показано на рис. 1. В прямой задаче источник шума включен, а антенна выключена. В обратной задаче антенна возбуждается, а источник шума выключается.

Предположим, что в прямой задаче источники имеют вид  $(\vec{J}^{fwd}, \vec{M}^{fwd})$ , генерируемые поля  $(\vec{E}^{fwd}, \vec{H}^{fwd})$ . В обратной задаче источники  $(\vec{J}^{rev}, \vec{M}^{rev})$ , генерируемые поля  $(\vec{E}^{rev}, \vec{H}^{rev})$ . Согласно [4], наиболее правиль-

ную форму теоремы о взаимности можно записать в виде

$$\iiint_V \left( \vec{E}^{rev} \cdot \vec{J}^{fwd} - \vec{H}^{rev} \cdot \vec{M}^{fwd} \right) dv = \iiint_V \left( \vec{E}^{fwd} \cdot \vec{J}^{rev} - \vec{H}^{fwd} \cdot \vec{M}^{rev} \right) dv, \quad (1)$$

где  $V$  – это бесконечно большой объем. В прямой задаче  $\vec{J}^{fwd}, \vec{M}^{fwd}$  имеют ненулевые значения только в области источника шума. Для левой части уравнения (1) интеграл объема по всей области может быть сведен к интегралу объема только по реальной области источника шума  $V_s$ .

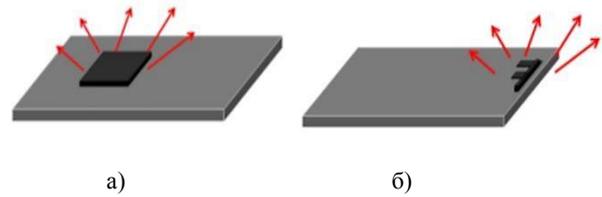


Рис. 1. Задача RFI делится на две части: а) прямая задача: источник шума излучает, антенна выключена; б) обратная задача: антенна включена и излучает, источник шума выключен

Область источника далее делится на  $N$  достаточно малых областей  $V_i$ . Объемный интеграл плотности электрического тока  $\vec{J}^{fwd}$  и плотности магнитного тока  $\vec{M}^{fwd}$  в достаточно малой области по существу является определением электрического и магнитного дипольного момента. Левую часть уравнения (1) можно записать в виде

$$\begin{aligned} & \iiint_V \left( \vec{E}^{rev} \cdot \vec{J}^{fwd} - \vec{H}^{rev} \cdot \vec{M}^{fwd} \right) dv = \\ & = \iiint_{V_s} \left( \vec{E}^{rev} \cdot \vec{J}^{fwd} - \vec{H}^{rev} \cdot \vec{M}^{fwd} \right) dv = \\ & = \sum_{i=1}^N \iiint_{V_i} \left( \vec{E}^{rev} \cdot \vec{J}^{fwd} - \vec{H}^{rev} \cdot \vec{M}^{fwd} \right) dv = \\ & = \sum_{i=1}^N \left[ \vec{E}^{rev} \cdot \iiint_{V_i} \left( \vec{J}^{fwd} \right) dv - \vec{H}^{rev} \cdot \right. \\ & \quad \left. \cdot \iiint_{V_i} \left( \vec{M}^{fwd} \right) dv \right] = \\ & = \sum_{i=1}^N \left( \vec{E}_i^{rev} \cdot \vec{P}_i^{fwd} - \vec{H}_i^{rev} \cdot \vec{M}_i^{fwd} \right), \quad (2) \end{aligned}$$

где  $\vec{E}_i^{rev}$  – поле  $E$  в области источника  $i^{th}$   $V_i$ . Поскольку электрический дипольный момент определен для этой достаточно малой области источника,  $\vec{E}_i^{rev}$  также можно рассматривать

как поле  $E$  в месте расположения электрического дипольного момента  $i^{th}$ .

Аналогично,  $H_i^{rev}$  – это поле  $H$  в области источника  $i^{th}$ , а также магнитный дипольный момент  $i^{th}$ .  $P_i^{fwd}$  – это электрический дипольный момент  $i^{th}$ , имеющий единицу измерения  $A \cdot m$ . В последней строке (2)  $M_i^{fwd}$  – магнитный дипольный момент ( $i^{th}$ ), который измеряется как  $V \cdot m$ . Следует отметить, что оба дипольных момента (магнитный и электрический) располагаются в дискретных местах.

В обратной задаче  $J_a^{rev}$  и  $M_a^{rev}$  имеют ненулевые значения только на поверхности порта антенны  $S_a$ . Интеграл объема по всей области может быть уменьшен до интеграла по поверхности порта антенны  $S_a$ .  $J_a^{rev}$  – плотность электрического поверхностного тока на  $S_a$ .

В обратной задаче порт один векторного анализатора спектра (VNA) соединен с антенной для возбуждения, порт два соединен с полевыми зондами  $E$  или  $H$ . Поскольку  $Z_L$  (импеданс приемника на антенном порту в режиме приема в прямой задаче) и коэффициенты зонда являются постоянными значениями, передаточные функции пропорциональны соответствующим измерениям  $S_{21}$ .

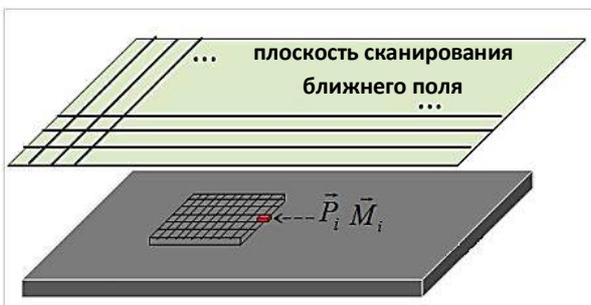


Рис. 2. Эквивалентное определение дипольного момента с помощью сканирования ближнего поля

После того, как передаточные функции получены в обратной задаче, можно получить соотношения связи между каждым единичным дипольным моментом и антенной, на которую наводится помеха. Для расчета связи с антенной необходима прямая задача получения эквивалентной модели дипольного момента для реального источника шума. Это  $P_i^{fwd}$  и  $M_i^{fwd}$  в (2).  $P_i^{fwd}$  и  $M_i^{fwd}$  могут быть получены путем моделирования источника с использованием сканирования ближних полей. Сканирование ближнего поля выполняется над реальным источником шума в прямой задаче. Затем мас-

сив электрических и магнитных дипольных моментов  $P$  и  $M$  может быть эквивалентно выбран для соответствия измеренным данным ближнего поля, как показано на рис. 2.

### Имитационное моделирование для подтверждения предложенного метода оценки

Из двухслойной печатной платы построен макет полного волнового моделирования для проверки предложенного метода. Антенна, на которую наводится помеха, – это патч-антенна. Источники излучения содержат два идеальных дипольных момента: магнитный дипольный момент и электрический дипольный момент, которые расположены в разных местах. Магнитный дипольный момент представляет собой бесконечно малый контур тока, обращенный в направлении  $x$  с величиной  $1$  в·М. Электрический дипольный момент представляет собой бесконечно малый сегмент тока, обращенный в направлении  $z$  с величиной  $0,001$  а·м. Два дипольных момента находятся в фазе. Подробная геометрия показана на рис. 3. Согласно (2), для расчета связанного напряжения от источника шума к пострадавшей антенне необходимы дипольные моменты от прямой задачи. Кроме того, необходимы передаточные функции, основанные на поле  $E$  и  $H$  обратной задачи.

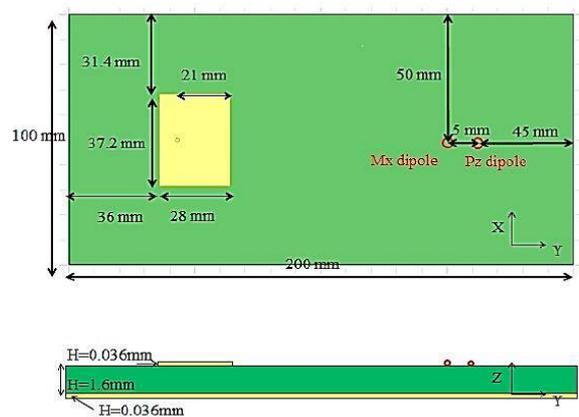


Рис. 3. Геометрическая информация для имитационной модели

Максимальная погрешность в данном примере моделирования составляет  $0,3$  дБ (рис. 4), что свидетельствует о валидности предложенного метода.

Измеренные фазово-разрешенные данные  $H$ -поля были использованы для восстановления магнитного дипольного момента  $M_y$  с использованием метода наименьших квадратов в

(3) путем определения местоположения одиночного дипольного момента  $M_y$  в месте разрыва земляного проводника.

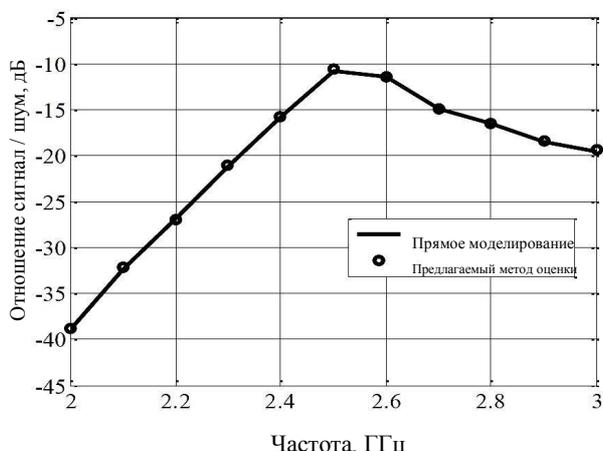


Рис. 4. Сравнение отношения сигнал/шум между прямым моделированием и предлагаемым методом

Результат измерения поля  $H$  и смоделированный по предложенному методу дипольный момент  $M_y$  показаны на рис. 5. Здесь мы можем наблюдать достаточно хорошее согласование между измеренным полем  $H$  и смоделированным. Отсюда мы можем сделать вывод о том, что диполь может являться реальным источником шума. Стоит отметить, что извлеченный дипольный момент в этом примере имеет как величину, так и фазу. Однако, поскольку существует только один единственный дипольный момент, фаза не имеет значения при расчете мощности, связанной с антенной.

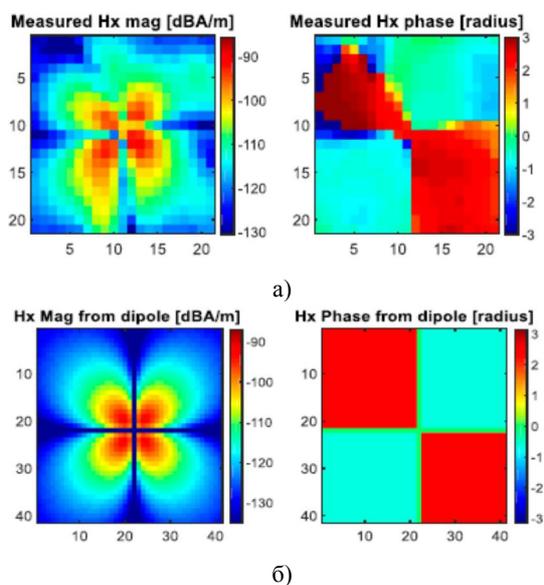


Рис. 5. Величина и фаза поля  $H$  в прямой задаче:  
а) измерение,  
б) реконструированный дипольный момент  $M_y$ .

### Анализ полученных результатов и выводы

На практике инженерам часто нужно знать, насколько улучшатся показатели помехоустойчивости радиоэлектронной системы передачи данных при том или ином изменении конструкции. Предложенный метод может помочь инженерам ответить на эти вопросы. Как уже упоминалось, проблемы RFI состоят из двух частей: источника шума и передаточной функции связи с антенной. В нашем исследовании рассматривается вопрос о наводке на приемную антенну. Концепция передаточной функции позволяет количественно оценить связь между каждым единичным дипольным моментом и антенной. Также оказывается, что передаточную функцию относительно легко получить из простого измерения площади приемной антенны  $S_{21}$ .

Приведем один из конкретных примеров применения в инженерной задаче предложенного метода – требовалось найти наилучшее размещение источника излучения, чтобы минимизировать RFI. Модель мобильного телефона и его антенны показана на рис. 6. На рис. 6 (б) и (в) показаны величины  $H_y$  и  $H_x$  на частоте 1 ГГц при излучении антенны. Если источник шума идентифицируется как дипольный момент, то в соответствии с [1] передаточная функция от каждого блока дипольного момента к антенне, на которую наводится помеха, пропорциональна  $H_y$  в обратной задаче. Таким образом, среди заданных местоположений 1, 2 и 3 местоположение 1 имеет наименьшую передаточную функцию, а местоположение 3 – наибольшую передаточную функцию. С точки зрения RFI, местоположение 1 будет лучшим местом для определения источника шума, где связь между дипольным моментом и антенной наименьшая.

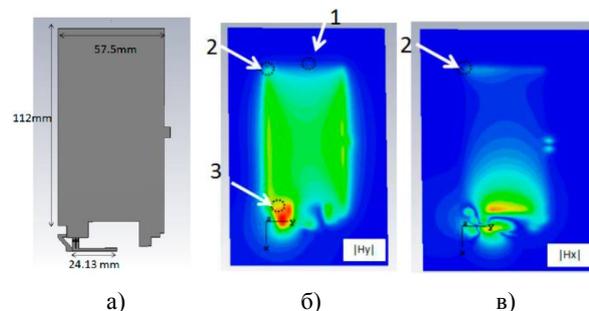


Рис. 6. Общепринятая модель антенны мобильного телефона (а); величина  $H_y$ , когда антенна излучает (б); величина  $H_x$ , когда антенна излучает (в)

## Литература

Предложенный метод также может помочь понять эффект вращения источника шума. Например, предположим, что источник шума зафиксирован в точке 2. При вращении источника шума  $90^\circ$ , дипольный момент становится дипольным моментом  $M_x$ .

Согласно [3], передаточная функция от каждого единичного дипольного момента  $M_x$  к антенне, на которую наводится помеха, пропорциональна  $H_x$  в обратной задаче. Поскольку  $H_x$  намного слабее, чем  $H_y$  в местоположении 2, передаточная функция намного слабее после поворота источника шума на  $90^\circ$ . Таким образом, для этой конкретной антенны на частоте 1 ГГц вращение исходного источника шума  $M_y$  на  $90^\circ$  поможет значительно уменьшить электромагнитную помеху.

1. Fan J. A new EMC challenge: Intra-system RMI and RF interference // *Safety and EMC*, 2015. Pp. 1-3.
2. Park H.H. Reduction of Electromagnetic Noise Coupling to Antennas in Metal-Framed Smartphones Using Ferrite Sheets and Multi-Via EBG Structures // *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, 2018. Vol. 60. № 2. Pp. 394-401.
3. Реализация на ПЛИС схемы квантования сообщения для NB-LDPC-декодера / Н.В. Астахов, А.В. Башкиров А.В., М.В. Хорошайлова, С.Ю. Белецкая // *Радиотехника*. 2017. № 6. С. 184-189.
4. Преимущества и недостатки LDPC кодов на примере алгоритма инвертирования бита и распространения доверия / А.С. Костоюков, А.В. Башкиров, Л.Н. Никитин, А.А. Пирогов, Н.В. Астахов // *Надежность и качество: тр. междунар. симпозиума. Пенза: Пензенский государственный университет*, 2019. Т. 2. С. 120-124.
5. Частотно-временной анализ нестационарных сигналов методами вейвлет-преобразования и оконного преобразования Фурье / Н.В. Астахов, А.В. Башкиров, О.Е. Журилова, О.Ю. Макаров // *Радиотехника*. 2019. Т. 83. № 6 (8). С. 109-112.

Поступила 02.12.2020; принята к публикации 18.02.2021

## Информация об авторах

**Башкиров Алексей Викторович** – д-р техн. наук, заведующий кафедрой конструирования и производства радиоаппаратуры, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), e-mail: fabi7@mail.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0939-722X>

**Демикова Алесья Сергеевна** – магистр, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), e-mail: kigr@vorstu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2948-3240>

**Астахов Николай Владимирович** – канд. техн. наук, доцент кафедры конструирования и производства радиоаппаратуры, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), e-mail: fabi7@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7156-8574>

**Долженко Мария Викторовна** – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), e-mail: mashad51@gmail.com

**Елкин Дмитрий Романович** – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), e-mail: Zixpon49@gmail.com

## METHOD FOR CALCULATION OF RADIO FREQUENCY INTERFERENCE BASED ON THE TRANSFER FUNCTION

A.V. Bashkirov, A.S. Demikhova, N.V. Astakhov, M.V. Dolzhenko, D.R. Elkin

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

**Abstract:** a method for calculating the transfer function for assessing noise immunity and security (RFI) is proposed. Closed-form equations are analytically derived from Maxwell's equations and the reciprocity theorem. The RFI problem is decomposed into two parts: the dipole moments of the noise source and the transfer function of coupling to the antenna. Transfer functions can be obtained either from simulations or measurements. Simple S-parameter measurements can provide transfer functions. The proposed method was verified using numerical simulation and real experiments using a mobile phone. When simulating the source of interference, and the communication of the interference with the antenna-receiver, in the proposed work the problem is divided into two stages: the direct problem (the noise source emits, and the antenna is turned off) and the inverse problem (the antenna is activated, and the noise source is turned off). Engineers can use this method to diagnose and correct the effects of electromagnetic interference. A method for calculating the effect of interference based on the transfer function is also proposed to assess the degree of distortion of the transmitted signal. These equations allow us to clearly decompose the problem of radio interference into two components: the noise source and the effect of the transfer function on the antenna. In comparison with the conventional least-squares method, the proposed method has better accuracy (about 3 dB)

**Keywords:** electromagnetic environment, noise immunity of data transmission lines, selection and analysis of analytical and empirical methods for assessing noise immunity of radio electronic means and complexes, analytical method of assessment based on the transfer function

### References

1. Fan J. "A new EMC challenge: Intra-system RMI and RF interference," *Safety and EMC*, 2015, pp. 1-3.
2. Park H.H. "Reduction of electromagnetic noise coupling to antennas in metal-framed smartphones using ferrite sheets and multi-via EBG structures," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, 2018, vol. 60, no. 2, pp. 394-401.
3. Astakhov N.V., Bashkirov A.V., Khoroshailova M.V., Beletskaya S.Yu. "Implementation on FPGA of a message quantization scheme for NB-LDPC decoder", *Radio Engineering (Radiotekhnika)*, 2017, no. 6, pp. 184-189.
4. Kostyukov A.S., Bashkirov A.V., Nikitin L.N., Pirogov A.A., Astakhov N.V. "Advantages and disadvantages of LDPC codes by the example of the bit inversion algorithm and the propagation of trust", *Proc. of Int. Symposium: Reliability and Quality (Nadezhnost' i kachestvo: tr. mezhdunar. simpoziuma)*, Penza State University, 2019, vol. 2, pp. 120-124.
5. Astakhov N.V., Bashkirov A.V., Zhurilova O.E., Makarov O.Yu. "Time-frequency analysis of non-stationary signals by methods of wavelet transform and window Fourier transform", *Radio Engineering (Radiotekhnika)*, 2019, vol. 83, no. 6 (8), pp. 109-112.

Submitted 02.12.2020; revised 18.02.2021

### Information about the authors

**Aleksey V. Bashkirov**, Dr. Sc. (Technical), Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: fabi7@mail.ru

**Alesya S. Demikhova**, MA, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: kipr@vorstu.ru

**Nikolay V. Astakhov**, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: kokakoller@gmail.com

**Mariya V. Dolzhenko**, student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: mashad51@gmail.com

**Dmitriy R. Elkin**, student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: Zixpon49@gmail.com

## АМПЛИТУДНЫЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЛИНЕЙНЫХ АНТЕННЫХ СИСТЕМ С НЕПРЕРЫВНЫМ РАСКРЫВОМ

Е.А. Рогожина, О.А. Шипоша, К.А. Лайко, А.С. Разумихин, Ю.О. Филимонова

Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия

**Аннотация:** проведены исследования известных амплитудных распределений для линейных непрерывных раскрывов, а также получен ряд новых распределений с наилучшим соотношением коэффициента использования поверхности раскрыва для заданного уровня боковых лепестков. Среди рассмотренных известны амплитудные распределения типа “косинус  $m$ -й степени”. Отмечены амплитудные распределения из данного класса, диаграммы направленности которых обладают противофазными боковыми лепестками. Предложен новый класс амплитудных распределений для непрерывных раскрывов типа суперпозиции “косинус  $m$ -й степени” и “косинус  $m-2$  степени” с разными весовыми коэффициентами, диаграммы направленности которых с противофазными боковыми лепестками дают результирующую с узким главным лепестком, меньшим значением уровня боковых лепестков и более высоким коэффициентом использования поверхности раскрыва в сравнении с классическим распределением “косинус  $m$ -й степени”. Приведен сравнительный анализ полученных непрерывных распределений с Дольф-Чебышевскими амплитудными распределениями для дискретных структур по критерию максимального коэффициента использования поверхности раскрыва для заданного уровня боковых лепестков. Показано, что коэффициент использования поверхности раскрыва сравниваемых амплитудных распределений при высоком уровне боковых лепестков отличается на 35%. Предложенный класс амплитудных распределений позволяет получать высокие значения коэффициента использования поверхности раскрыва для непрерывных структур и, следовательно, высокий коэффициент направленного действия

**Ключевые слова:** амплитудное распределение, уровень боковых лепестков, диаграмма направленности, коэффициент использования поверхности раскрыва, ширина главного луча

### Введение

Одним из важнейших параметров в антенных системах является коэффициент направленного действия (КНД):

$$КНД = \frac{4\pi \cdot S_G \cdot \nu}{\lambda^2} \quad (1)$$

Для заданного относительного геометрического размера апертуры КНД пропорционален коэффициенту использования поверхности раскрыва (КИПР), т.е. КИПР можно трактовать как относительный КНД.

Также известен такой параметр, как чувствительность к ошибкам [1], которая определяется по формуле (2). Для упрощения расчетов считается, что чувствительность к ошибкам обратно пропорциональна величина КИПР. Чем выше КИПР, тем менее чувствительно данное амплитудное распределение к ошибкам.

$$\sigma = \frac{1}{2\pi} \cdot \int_0^\infty \left| \frac{f(\theta)}{f(0)} \right|^2 d\theta \quad (2)$$

Из вышесказанного следует, что задача увеличения КИПР является актуальной.

Как известно, КИПР определяется амплитудным распределением антенной системы, поэтому данная работа посвящена исследованию и синтезу линейных амплитудных распределений антенных систем (рупорных, зеркально-параболических антенн и других конструкций) с непрерывным раскрывом. Существует ряд хорошо исследованных распределений, которые подробно рассмотрены в литературе [1-5]. Из данных распределений для непрерывных раскрывов на практике широко используется распределение типа “косинус  $m$ -й степени”.

В работе изучаемые амплитудные распределения сравниваются по параметру КИПР при заданном уровне боковых лепестков (УБЛ).

### Исследование амплитудных распределений типа “косинус $m$ -й степени”

Рассмотрим характеристики диаграммы направленности (ДН) с распределением типа “косинус  $m$ -й степени”. Расчет ДН для непрерывной линейной структуры длиной  $L = 2Lx$  находится с помощью выражения (3):

$$f(\theta) = \int_0^{Lx} A(x) \cdot \cos(k \cdot x \cdot \sin(\theta)) dx, \quad (3)$$

где  $A(x)$  – амплитудное распределение,  $k = \frac{2 \cdot \pi}{\lambda}$  – волновое число,  $\lambda$  – длина волны,  $x$  – текущая координата раскрыва линейной антенны,  $\theta$  – угловая координата,  $Lx$  – длина половины раскрыва.

Амплитудное распределение типа “косинус  $m$ -й степени” для непрерывных раскрывов описывается следующим соотношением (4):

$$A(x) = \cos^m \left( 90^\circ \cdot \frac{x}{Lx} \right). \quad (4)$$

Для примера на рис. 1 представлены амплитудные распределения (4) для разных значений  $m = 0, 1, 2$  соответственно: 1 – “равно-

мерное”; 2 – типа “косинус”; 3 – типа “косинус в квадрате”.

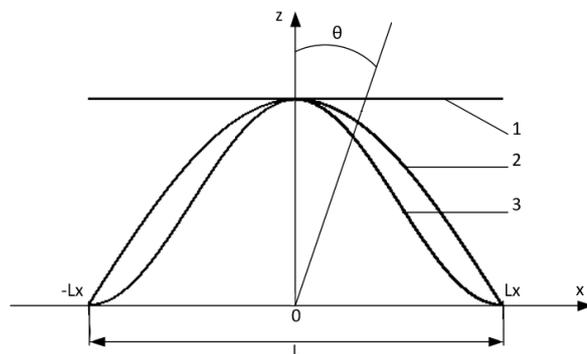


Рис. 1. Амплитудные распределения в раскрыве антенны

На рис. 2 представлена диаграмма направленности линейной непрерывной излучающей системы длиной  $L = 10\lambda$  с параметром амплитудного распределения  $m = 0$ .

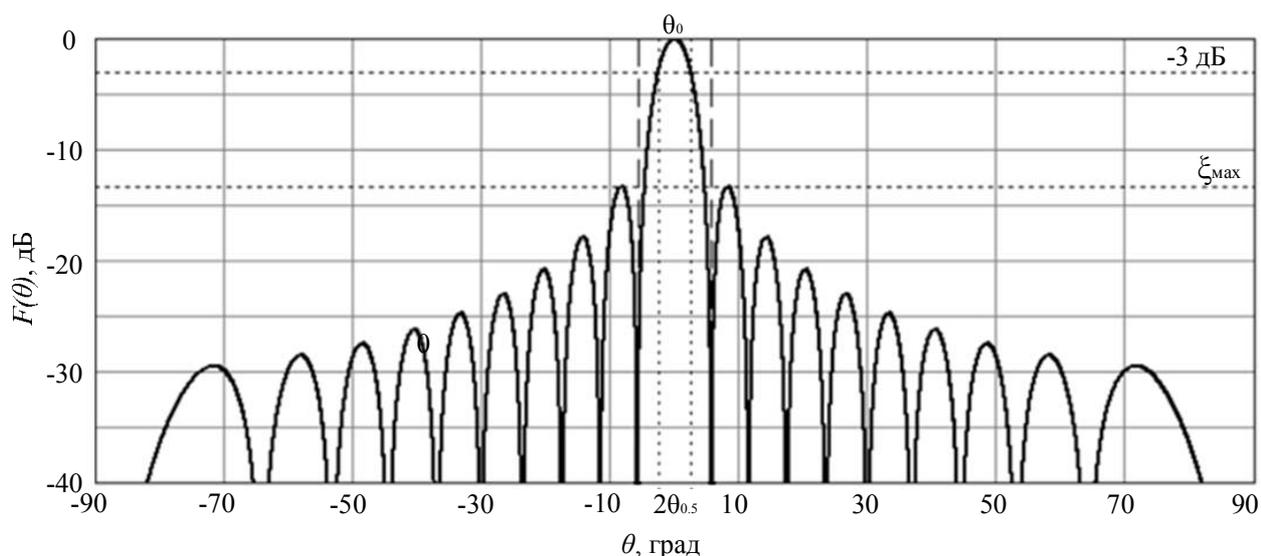


Рис. 2. ДН линейной непрерывной излучающей системы

На графике представлены следующие обозначения:

$2\theta_{0.5}$  - ширина диаграммы по уровню половинной мощности (-3дБ);

$\theta_0$  - положение первого нуля;

$\xi_{\max}$  - максимальный уровень бокового лепестка (УБЛ).

Коэффициент использования поверхности раскрыва (КИПР)  $\nu$ , который рассчитывается по следующей формуле (5):

$$\nu = \frac{\left[ \int_0^{Lx} A(x) dx \right]^2}{Lx \cdot \left[ \int_0^{Lx} A^2(x) dx \right]}. \quad (5)$$

Проанализируем основные характеристики ДН с распределением типа “косинус  $m$ -й степени” со следующим параметром  $m = 0 \dots 5$ , представленные на рис. 3.

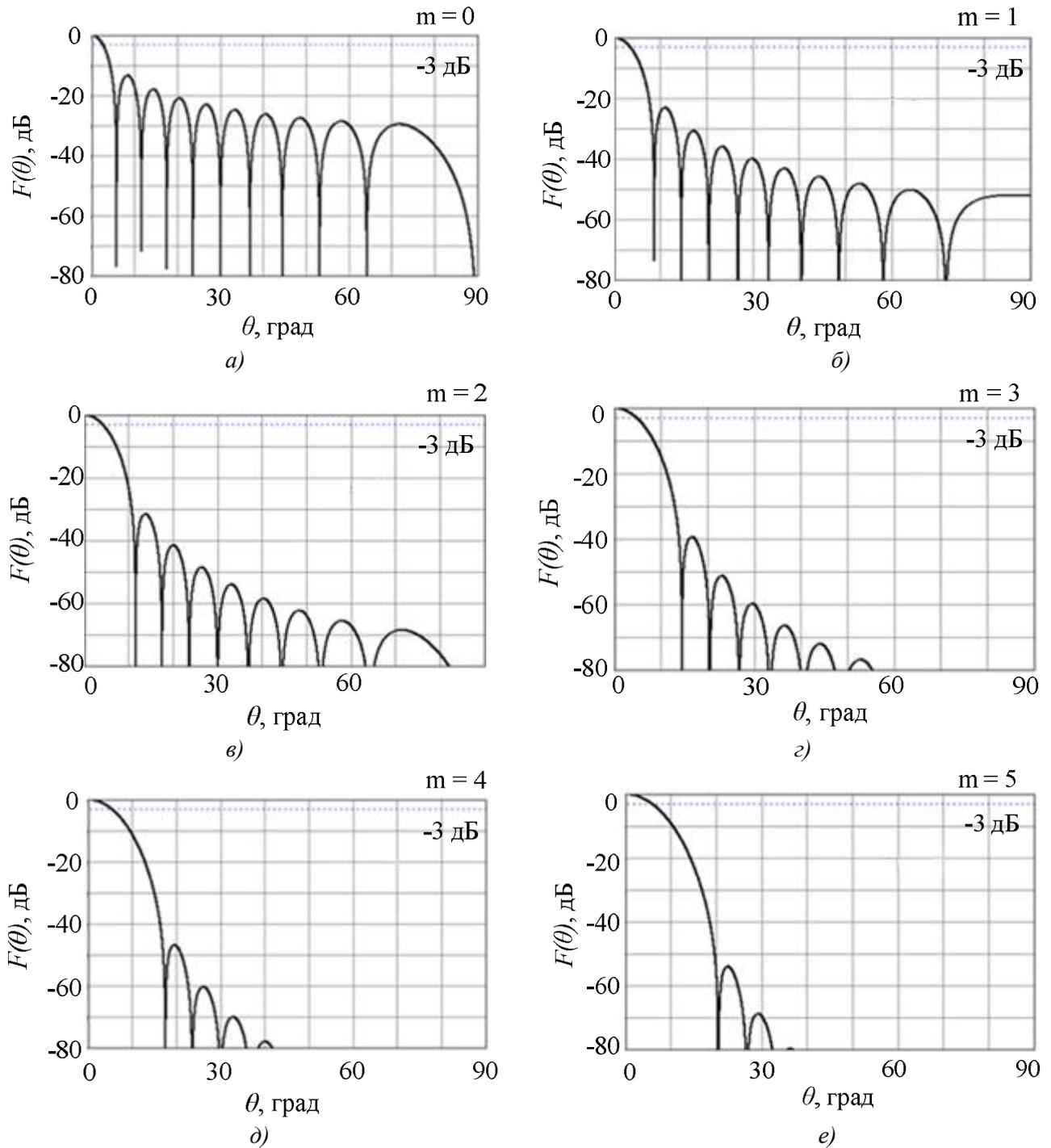
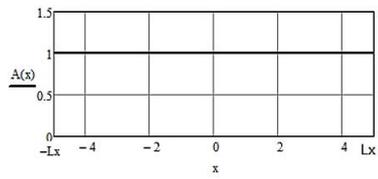
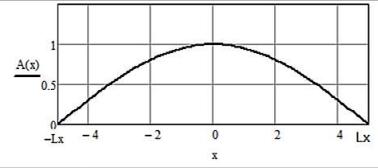
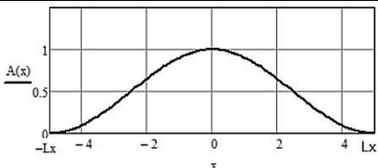
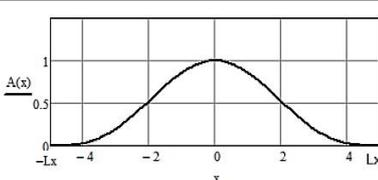
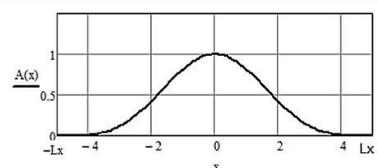
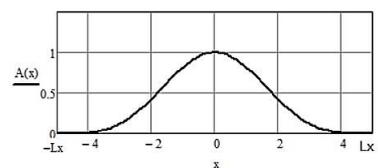


Рис. 3. ДН с амплитудным распределением типа “косинус  $m$ -й степени”  $m = 0 \dots 5$  соответственно

Основные параметры ДН для рассматриваемого амплитудного распределения “косинус  $m$ -й степени” занесены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры ДН для амплитудного распределения типа “косинус m-й степени”

Параметр амплитудного распределения	График амплитудного распределения	Параметры множителя направленности			
		$2\theta_{0.5}$ , град	$2\theta_0$ , град	$\xi_{\max}$ , дБ	$\nu$
$m = 0$		$50.8 \frac{\lambda}{L}$	$115 \frac{\lambda}{L}$	-13.3	1
$m = 1$		$67 \frac{\lambda}{L}$	$172 \frac{\lambda}{L}$	-22.9	0.811
$m = 2$		$83 \frac{\lambda}{L}$	$231 \frac{\lambda}{L}$	-31.4	0.667
$m = 3$		$95 \frac{\lambda}{L}$	$289 \frac{\lambda}{L}$	-39.3	0.576
$m = 4$		$107 \frac{\lambda}{L}$	$370 \frac{\lambda}{L}$	-42.1	0.514
$m = 5$		$114 \frac{\lambda}{L}$	$409 \frac{\lambda}{L}$	-53.9	0.468

Анализ полученных ДН показывает, что некоторые из них обладают противофазными боковыми лепестками. К примеру, на рис. 4 представлены ДН для параметров  $m = 0$  (представлена сплошной линией) и  $m = 2$  (отмечена пунктиром) соответственно.

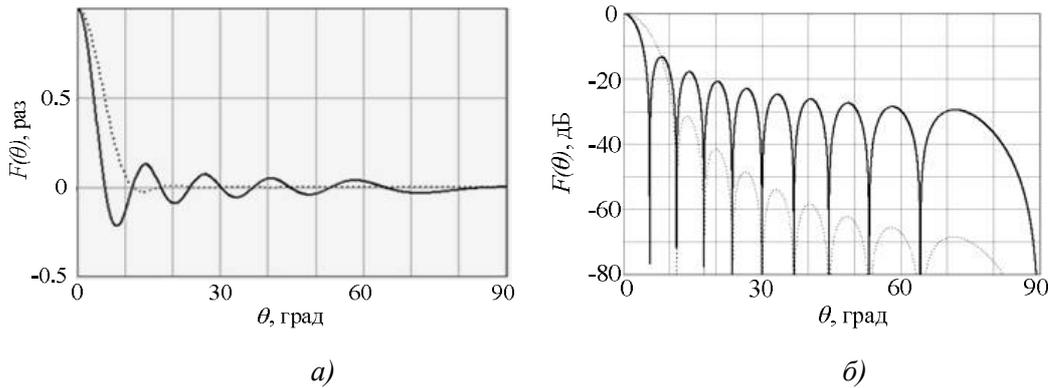


Рис. 4. ДН для параметров амплитудного распределения  $m = 2$  и  $m = 0$ : а) в относительных единицах; б) в дБ

Эту особенность можно использовать для получения нового класса амплитудных распределений для непрерывных раскрытов, обеспечивающих более оптимальное соотношение УБЛ и КИПР в сравнении с распределением типа “косинус  $m$ -й степени”.

**Синтез нового класса амплитудных распределений методом суперпозиции**

Представим новый класс амплитудных распределений как суперпозицию косинусов

$$A(x) = \cos^m(90^\circ \cdot \frac{x}{Lx}) + \Delta_{m-2} \cdot \cos^{m-2}(90^\circ \cdot \frac{x}{Lx}). \tag{6}$$

На рис. 5 показана ДН для полученного типа амплитудного распределения (6) с параметром  $m = 2$  и  $\Delta = 0.29$ . Данное распреде-

ление известно, как “косинус в квадрате на пьедестале” или распределение Хэмминга. разной степени с различными весовыми коэффициентами. Наилучшие сочетания дают амплитудные распределения, ДН которых обладают противофазными боковыми лепестками. Данным распределениям соответствует суперпозиция типа “косинус  $m$ -й степени” и типа “косинус  $m-2$  степени” (6). Минимальное значение параметра  $m$  в этом случае равно 2, где  $\Delta$  - это весовой коэффициент.

ление известно, как “косинус в квадрате на пьедестале” или распределение Хэмминга.

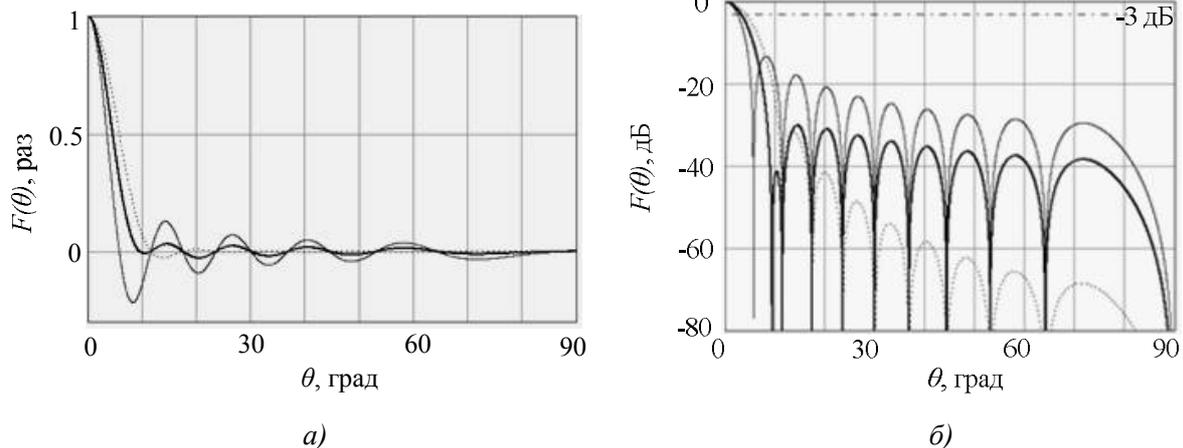


Рис. 5. ДН для суперпозиции “косинус  $m$ -й степени” и “косинус  $m-2$  степени”: а) в относительных единицах; б) в дБ

Из приведенного рисунка следует, что две диаграммы с противофазными боковыми лепестками дают результирующую с более узким главным лепестком, меньшим значением УБЛ и более высоким КИПР, чем у ДН с амплитудным распределением “косинус  $m$ -й степени”.

Тем самым, задавая параметр  $m$  и варьируя пьедесталом, добиваемся результирующей

ДН с заданным уровнем максимального бокового лепестка.

На рис. 6 представлены ДН для предложенного класса амплитудного распределения (6) с параметром  $m = 3...5$ .

Основные параметры ДН для полученного класса амплитудных распределений (6) представлены в табл. 2.

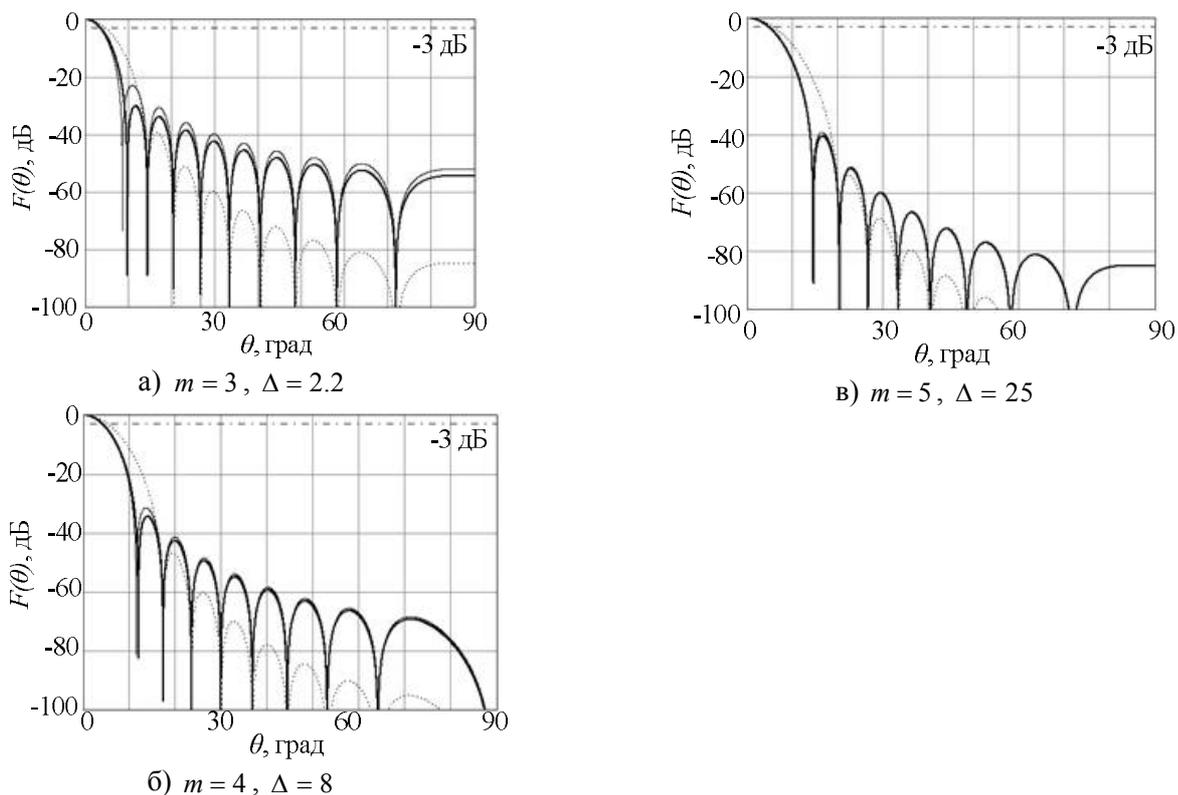


Рис. 6. ДН для параметров: а)  $m = 3, \Delta = 2.2$ ; б)  $m = 4, \Delta = 8$ ; в)  $m = 5, \Delta = 25$

Таблица 2

Характеристики ДН для полученного класса амплитудных распределений

Параметр амплитудного распределения	Параметр $\Delta$	Параметры множителя направленности			
		$2\theta_{0.5}$ , град	$\theta_0$ , град	$\xi_{\max}$ , дБ	$\nu$
$m = 2$	0.085	7.8	11.5	-43	0.732
	0.18	7.2	11.3	-35	0.787
	0.29	7	9.6	-30	0.833
$m = 3$	0.22	8	15	-55	0.635
	1.3	7.6	10.6	-35	0.735
	2.2	7.3	9.9	-30	0.76
$m = 4$	0.373	9.7	17.4	-65	0.564
	8	7.6	12.1	-35	0.654
$m = 5$	0.55	11.3	20.31	-75	0.512
	25	9.7	14.7	-40	0.573

Проведем сравнение по критерию максимума КИПР для заданного УБЛ, параметров ДН с амплитудным распределением типа “косинус  $m$ -й степени” (табл. 1) и предложенным амплитудным распределением (табл. 2). Для классического амплитудного распределения типа “косинус  $m$ -й степени” при  $m = 4$  получаем  $\xi_{\max} = -42.1$  дБ и  $\nu = 0.514$ . Для предложенного класса амплитудных распределений при

$m = 2$  и  $\Delta = 0.085$  получаем  $\xi_{\max} = -43$  дБ и  $\nu = 0.732$ . Выигрыш по КИПР составляет 42%. Исследуя полученные данные и проводя сравнительный анализ с амплитудными распределениями типа “косинус  $m$ -й степени”, можно сделать вывод о том, что предложенное в работе амплитудное распределение обладает наилучшим соотношением КИПР для заданного УБЛ.

### Сравнительный анализ синтезированных амплитудных распределений с Дольф-Чебышевским распределением

В литературе [6] представлены Дольф-Чебышевские антенные решетки. Особенностью их ДН является одинаковый уровень боковых лепестков во всем секторе пространства. Дольф-Чебышевские амплитудные распределения используются только для дискретных структур, и в литературе не предложены способы реализации данных распределений для непрерывных раскрывов.

Антенные решетки с Дольф-Чебышевским амплитудным распределением являются оптимальными по критерию максимального КИПР для заданного УБЛ [7]. Проведем сравнительный анализ полученного класса амплитудных распределений с Дольф-Чебышевскими по заданному критерию. Для обеспечения равенства боковых лепестков выбраны следующие параметры: длина непрерывного раскрыва  $L = 50\lambda$ ; для Дольф-Чебышевской антенной решетки количество излучателей  $N = 100$  с шагом  $d = 0.5\lambda$ . Результаты сведены в табл. 3.

Таблица 3

Сравнительная таблица КИПР для Дольф-Чебышевского амплитудного распределения и полученного класса

УБЛ, дБ	КИПР	
	Дольф-Чебышевское	Полученный класс
-20	0.71	0.96
-25	0.85	0.91
-30	0.87	0.84

Из табл. 3 следует, что для рассмотренных классов амплитудных распределений при заданном уровне боковых лепестков значение КИПР существенно отличается при высоком УБЛ - выигрыш составляет до 35%, и практически не отличается при низком УБЛ.

#### Заключение

В работе рассмотрены классические амплитудные распределения типа “косинус  $m$ -й степени”, на основании которых предложен новый класс для непрерывных раскрывов. Синтезированные амплитудные распределения являются суперпозицией “косинус  $m$ -й степени” и “косинус  $m-2$  степени” с различными весовыми коэффициентами. В работе показано, что ДН с новым классом амплитудных распределений обладают меньшим значением уровня боковых лепестков и более высоким КИПР, чем ДН с классическими амплитудными распределениями типа “косинус  $m$ -й степени”. Также проведен сравнительный анализ нового класса амплитудного распределения с Дольф-Чебышевскими по критерию максимума КИПР для заданного УБЛ. Показано, что по данному критерию КИПР сравниваемых амплитудных распределений при высоком УБЛ отличается на 35%. Тем самым, предложенный класс амплитудных распределений позволяет получать высокие значения КИПР для непрерывных струк-

тур. Синтезированный класс амплитудных распределений актуален для антенных систем, работающих в режиме «передача», когда требуется излучить максимальную мощность.

#### Литература

1. Кюн Р. Микроволновые антенны. Л.: Судостроение, 1967. 518 с.
2. Устройства СВЧ и антенны. Проектирование фазированных антенных решеток / под ред. Д.И. Воскресенского; изд. 4-е, перераб. и доп. М.: Радиотехника, 2012. 742 с.
3. Лайко К.А., Филимонова Ю.О. Амплитудный синтез диаграмм направленности множителя антенной решетки с контролируемым законом распределения боковых лепестков // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2014. № 1 (31). С. 23–27.
4. Марков Г.Т., Сазонов Д.М. Антенны. М.: Энергия, 1975. 528с.
5. Филимонова Ю.О. Оптимальные соотношения амплитудных распределений вида косинус  $m$ -ой степени для дискретных излучающих систем / науч. рук. В.С. Данилов // Наука. Технологии. Инновации: материалы Всерос. науч. конф. молодых ученых. В 10 ч. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2013. Ч. 2. С. 234–237.
6. Айзенберг Г.З. Антенны УКВ. М.: Связь, 1977. Ч. 2. 288с.
7. Филимонова Ю.О., Лайко К.А. Применение Дольф-Чебышевских амплитудных распределений по критерию максимального коэффициента использования поверхности раскрыва для заданного уровня боковых лепестков//Сборник трудов конференции НГТУ. Новосибирск: НГТУ, 2016. Т. 1. С. 92–94.

### Информация об авторах

**Рогожина Екатерина Александровна** - студент, Новосибирский государственный технический университет (630073, Россия, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20), тел.8 (383) 346-06-33, e-mail: rogozhina.ekaterina99@mail.ru

**Шипоша Ольга Андреевна** - студент, Новосибирский государственный технический университет (630073, Россия, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20), тел. 8(383) 346-06-33, e-mail: shiposhaolya@gmail.com

**Лайко Константин Алексеевич** - канд. техн. наук, доцент, Новосибирский государственный технический университет (630073, Россия, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20), тел.8 (383) 346-06-33, e-mail: play-byte@mail.ru

**Разумихин Анатолий Сергеевич** - аспирант, Новосибирский государственный технический университет (630073, Россия, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20), тел. 8(953)778-82-37, e-mail: at-te1@mail.ru

**Филимонова Юлия Олеговна** - канд. техн. наук, доцент, Новосибирский государственный технический университет (630073, Россия, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20), тел.8 (383) 346-06-33, e-mail: jul7788@mail.ru

## AMPLITUDE DISTRIBUTION OF LINEAR ANTENNA SYSTEMS WITH CONTINUOUS APERTURES

**E.A. Rogozhina, O.A. Shiposha, K.A. Layko, A.S. Razumikhin, Yu.O. Filimonova**

**Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia**

**Abstract:** we carried out investigations of the known amplitude distributions for linear continuous apertures and obtained a number of new distributions with the best ratio of the utilization factor of the aperture surface for a given level of side lobes. Among the considered, there are the well-known amplitude distributions of the “cosine of the m-th degree” type. We note amplitude distributions from this class, the directional patterns of which have antiphase side lobes. We propose a new class of amplitude distributions for continuous apertures of the superposition type “cosine of the m-th degree” and “cosine of the m-2 degree” with different weight coefficients, the radiation patterns of which with antiphase side lobes give the resultant with a narrow main lobe, a lower value of the level of side lobes and a higher utilization of the aperture surface in comparison with the classical distribution “cosine of the m-th degree”. We present a comparative analysis of the obtained continuous distributions with the Dolph-Chebyshev amplitude distributions for discrete structures according to the criterion of the maximum utilization of the aperture surface for a given level of side lobes. We show that the utilization factor of the aperture surface of the compared amplitude distributions at a high level of side lobes differs by 35%. The proposed class of amplitude distributions allows one to obtain high values of the coefficient of use of the aperture surface for continuous structures and, therefore, a high coefficient of directional action

**Key words:** amplitude distribution, level of side lobes, directional pattern, utilization of the aperture surface, width of the main beam

### References

1. Kyun R. “Microwave antennas” (“Mikrovolnovye anteny”), Leningrad, Sudostroenie, 1967, 518 p.
2. Voskresenskiy D.I. ed. “Microwave devices and antennas. Designing phased antenna arrays” (“Ustroystva SVCh i anteny. Proektirovaniye fazirovannikh antennikh reshyetok”), Moscow, Radiotekhnika, 2012, 742 p.
3. Layko K.A., Filimonova Yu.O. “Amplitude synthesis of the directional patterns of the antenna array multiplier with a controlled law of side lobe distribution”, *Reports of the Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki)*, 2014, vol. 31, no. 1, pp. 23-27.
4. Markov G.T., Sazonov D.M. “Antenny” (“Antennas”), Moscow, Energiya, 1975, 528 p.
5. Filimonova Yu.O., Danilov V.S. “Optimal ratios of amplitude distributions in the form of m-th cosine for discrete radiating systems”, *Proc. of All Russian Scientific Conf. of Young Scientists: Science. Technology. Innovation (Nauka. Tekhnologii. Innovatsii: materialy Vseros. nauch. konf. molodykh uchenykh)*, 2013, vol. 2, pp. 234-237.
6. Aizenberg G.Z. “VHF Antennas” (“Anteny UKV”), vol. 2, Moscow, Svyaz, 1977, 288 p.
7. Filimonova Yu.O., Layko K.A. “Application of Dolph-Chebyshev amplitude distributions by the criterion of the maximum utilization of the aperture surface for a given level of side lobes”, *Proc. of the NSTU conf. (Sbornik trudov konferentsii NGTU)*, 2016, vol. 1, pp. 92-94.

Submitted 10.12.2020; revised 18.02.2021

### Information about the authors

**Ekaterina A. Rogozhina**, student, Novosibirsk State Technical University (20 Karla Marksa av., Novosibirsk 630073, Russia), tel.: +7 (383) 346-06-33, e-mail: rogozhina.ekaterina99@mail.ru

**Ol'ga A. Shiposha**, student, Novosibirsk State Technical University (20 Karla Marksa av., Novosibirsk 630073, Russia), tel.: +7 (383) 346-06-33, e-mail: shiposhaolya@gmail.com

**Konstantin A. Layko**, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Novosibirsk State Technical University (20 Karla Marksa av., Novosibirsk 630073, Russia), tel.: +7 (383) 346-06-33, e-mail: play-byte@mail.ru

**Anatoliy S. Razumikhin**, graduate student, Novosibirsk State Technical University (20 Karla Marksa av., Novosibirsk 630073, Russia), tel.: +7 (953)778-82-37, e-mail: at-te1@mail.ru

**Yulia O. Filimonova**, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Novosibirsk State Technical University (20 Karla Marksa av., Novosibirsk 630073, Russia), tel.: +7 (383) 346-06-33, e-mail: jul7788@mail.ru

**УЛУЧШЕНИЕ РАЗЛИЧНЫХ СВОЙСТВ АНТЕННЫ УДА-ЯГИ**

С.М. Фёдоров<sup>1,2</sup>, Е.А. Ищенко<sup>1</sup>, И.А. Зеленин<sup>1</sup>, Е.В. Папина<sup>1</sup>, А.В. Бунина<sup>1</sup>, Л.В. Сопина<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

<sup>2</sup>Международный институт компьютерных технологий, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** рассматривается антенна Уда-Яги, которая предназначена для приема сигнала наземного телевидения в 57 частотном канале. Самыми важными характеристиками для антенны Уда-Яги являются коэффициент направленного действия, передне-заднее отношение (коэффициент защитного действия), при этом данные характеристики сильно зависят от числа директоров, применяемых в конструкции антенны. На основе произведенного электродинамического моделирования было определено, как изменятся характеристики диаграмм направленности антенны на частоте 762 МГц при применении различного числа директоров – от 1 (3-элементная антенна Уда-Яги) до 12 (14-элементная антенна Уда-Яги), при этом определено оптимальное количество директоров для ситуации, когда требуется достижение максимальной помехозащищенности (максимальное значение передне-заднего отношения). Приводятся диаграммы направленности при различном числе директоров на частоте 762 МГц, графики коэффициентов защитного действия (ПЗО) от числа директоров и от частоты, таблицы со сравнительными характеристиками диаграмм направленности. Моделирование производилось с использованием метода моментов, так как при его применении достигаются высокая скорость расчетов, а также высокая точность результатов. При моделировании антенна имела один рефлектор и активный элемент в виде полуволнового диполя

**Ключевые слова:** антенна Уда-Яги, коэффициент направленного действия, передне-заднее отношение

**Введение**

Антенна Уда-Яги (Волновой канал) является одной из самых распространенных для приема сигналов телевизионного вещания [1]. На территории Воронежской области одним из используемых в телевидении частотных диапазонов выступает 57 частотный канал:  $\Delta f_{57} = 758 - 766$  МГц. Так как антенна Уда-Яги является направленной, то ее основными параметрами являются – коэффициент направленного действия (КНД) и передне-заднее отношение (ПЗО).

При проектировании данного типа антенн очень важно обеспечить оптимальные характеристики антенны при сохранении оптимальных геометрических размеров.

**Геометрические параметры исследуемой антенны Уда-Яги**

Антенная система Уда-Яги представляет собой систему из металлических проводящих прутьев, причем один выполняет роль рефлектора – обеспечивает блокировку излучения в обратном направлении; следом идет активный элемент, который представляет собой или полуволновой диполь или петлевой диполь; далее

идет система из директоров, которые обеспечивают требуемый уровень КНД в направлении основного излучения. Вид исследуемой антенны приведен на рис. 1.

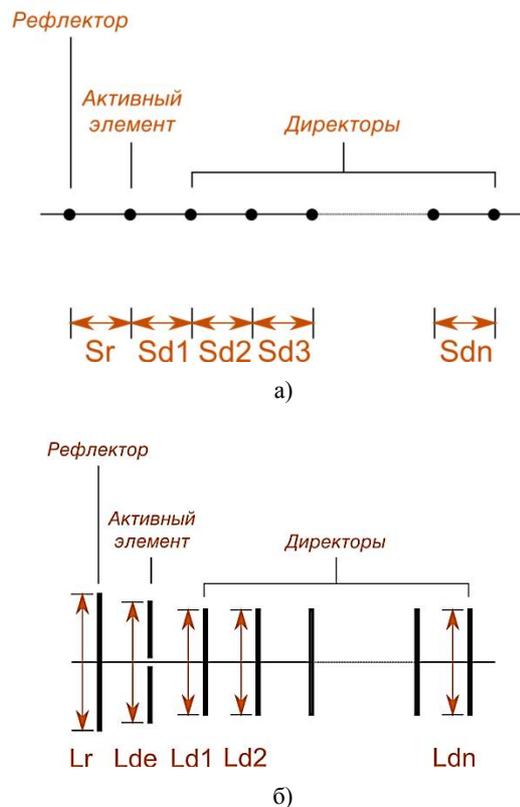


Рис. 1. Вид антенны Уда-Яги: а) вид сбоку; б) вид сверху

В процессе исследования моделировались антенны, которые имеют один рефлектор длиной 193,2 мм; активный элемент длиной 184,9 мм, при этом число директоров изменялось от 1 (3-элементная антенна) до 12 (14-элементная антенна) (рис. 2), что позволит произвести сравнение значений КНД и ПЗО.

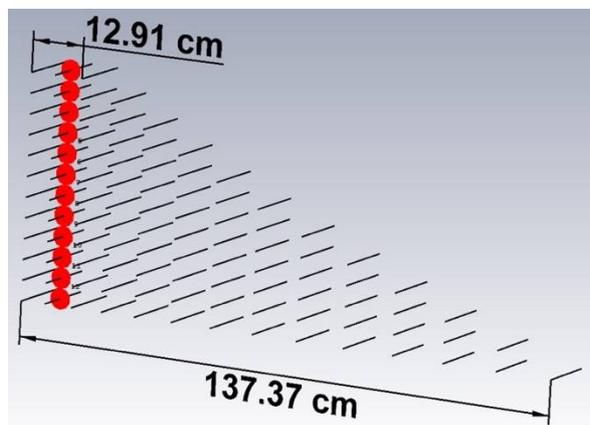


Рис. 2. Сравнение размеров антенн Уда-Яги при использовании 1 директора (верхняя антенна) и при использовании 12 директоров (нижняя антенна)

Моделирование производилось методом моментов, так как это позволяет обеспечить высокую скорость моделирования и высокую точность результатов.

### Зависимость характеристик антенны Уда-Яги от числа директоров

При моделировании особый акцент был уделен диаграмме направленности на частоте 762 МГц, так как она является центральным значением 57 частотного канала телевизионного вещания. По полученным результатам – диаграммы направленности при разном количестве директоров приведены на рис. 3, а значения ПЗО – рис. 4. Для удобства анализа итоговые данные приведены в таблице (частота анализа диаграмм направленности 762 МГц).

Зависимость характеристик антенны Уда-Яги от числа директоров

Число директоров	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
КНД, раз	8,95	9,67	11,9	13,1	14,6	15,8	18	20,2	21,8	24,5	27,7	29,9
КНД, дБ	9,52	9,86	10,8	11,2	11,7	12	12,6	13	13,4	13,9	14,4	14,8
Ширина гл. лепестка (3 дБ), °	73	67,1	54,3	51,4	46,6	43,4	42,3	39,5	37,8	36,7	35,1	33,6
Уровень боковых лепестков, дБ	-9,5	-12,2	-8,5	-16,4	-8,5	-12,8	-14,1	-13,9	-13,3	-14	-15	-15,4
ПЗО, дБ	9,49	15,17	10,26	28,08	12,12	17,22	19,74	14,30	21,09	22,30	16,24	18,8

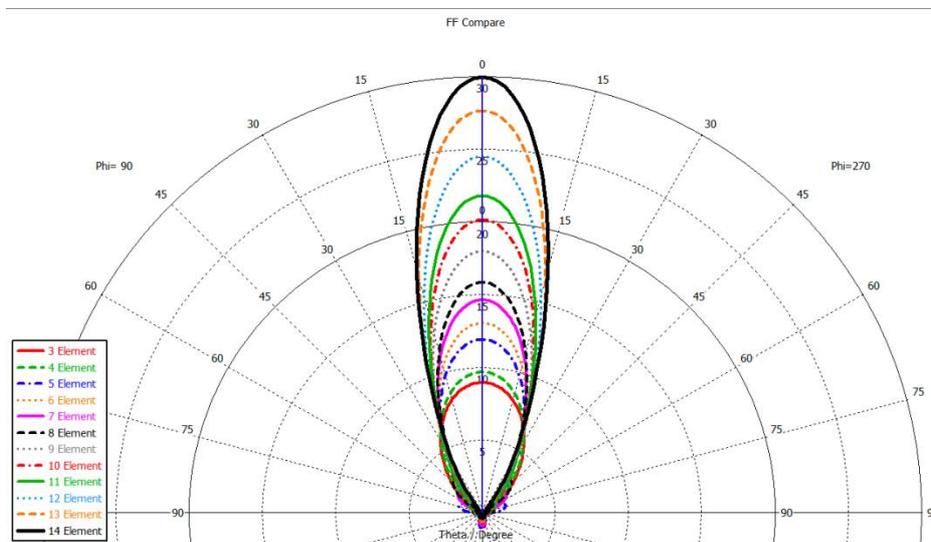


Рис. 3. Диаграммы направленности исследуемой антенны Уда-Яги при разном числе директоров (линейный масштаб), частота построения – 762 МГц,  $\varphi = 90^\circ$

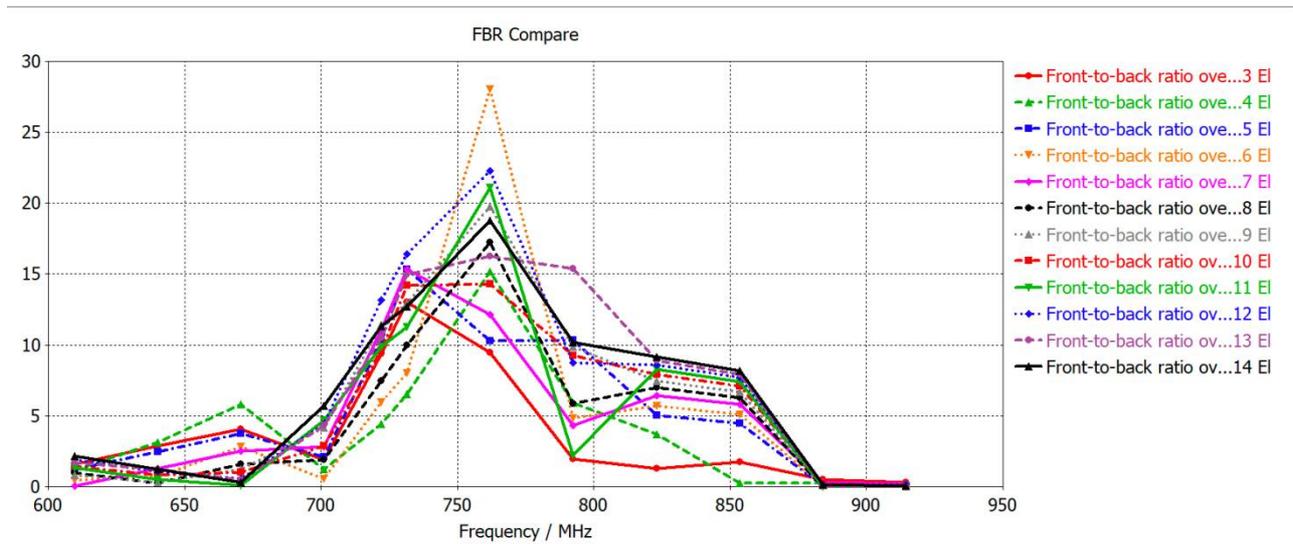


Рис. 4. Сравнение значений ПЗО при разном количестве директоров

По полученным результатам видно, что наибольшим передне-задним отношением обладает антенна с 4 директорами (6-элементная антенна Уда-Яги); также заметно, что при увеличении числа директоров происходит сужение ширины главного лепестка, слишком узкий главный лепесток приводит к тому, что настройка антенны должна быть более точной; при увеличении числа директоров происходит увеличение КНД антенны, при этом наибольшее изменение наблюдается, когда происходит увеличение числа директоров с 2 до 3 (0,94 дБ).

### Заключение

В статье была рассмотрена антенна Уда-Яги и определена зависимость ее характеристик от числа директоров. Исследование произ-

водилось для частот наземного телевидения на территории Воронежской области (57 частотный канал). По полученным результатам видно, что наиболее оптимальной антенной будет выступать 6-элементная система (1 рефлектор, 1 активный элемент, 4 директора), при этом если не стоит задача обеспечения высокой защищенности от приема сигнала на заднем лепестке, а акцент делается на максимальных значениях КНД – возможно увеличение числа директоров, однако данное действие приводит к серьезному увеличению размеров антенны.

### Литература

1. Constantine A. Balanis, Antenna theory analysis and design, fourth edition, John Wiley & Sons: Canada, 2016, 1072 p.

Поступила 28.11.2020; принята к публикации 17.02.2021

### Информация об авторах

**Фёдоров Сергей Михайлович** – канд. техн. наук, доцент кафедры радиоэлектронных устройств и систем, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84); доцент кафедры информационной безопасности и систем связи, Международный институт компьютерных технологий (394026, Россия, г. Воронеж, ул. Солнечная, д. 29 б), тел. +7(473)243-77-29, e-mail: fedorov\_sm@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9027-6163>

**Ищенко Евгений Алексеевич** – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), тел. +7(473)243-77-29, e-mail: kursk1998@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5270-0792>

**Зеленин Иван Алексеевич** – старший преподаватель кафедры радиоэлектронных устройств и систем, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), тел. +7(473)243-77-29

**Папина Елизавета Владимировна** – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), тел. +7(473)243-77-29, e-mail: cool.pykhtina@mail.ru

**Бунина Алина Владимировна** – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), тел. +7(473)243-77-29, e-mail: Alina.bunina@list.ru

**Сопина Лилия Вячеславовна** – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), тел. +7(473)243-77-29, e-mail: sopina1803@gmail.com

## IMPROVING THE VARIOUS PROPERTIES OF THE UDA-YAGI ANTENNA

S.M. Fedorov<sup>1,2</sup>, E.A. Ishchenko<sup>1</sup>, I.A. Zelenin<sup>1</sup>, E.V. Papina<sup>1</sup>, A.V. Bunina<sup>1</sup>, L.V. Sopina<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

<sup>2</sup>International Institute of Computer Technologies, Voronezh, Russia

**Abstract:** the article considers the Uda-Yagi antenna, which is designed to receive a terrestrial television signal in a 57-frequency channel. The most important characteristics for an Uda-Yagi antenna are directivity, front-to-back ratio, and these characteristics are highly dependent on the number of directors used in the antenna design. On the basis of the electrodynamic simulation, we determined how the characteristics of the antenna directivity patterns at a frequency of 762 MHz will change when using a different number of directors - from 1 (3-element Uda-Yagi antenna) to 12 (14-element Uda-Yagi antenna), at the same time, we determined the optimal number of directors for the situation when the achievement of maximum noise immunity is required (the maximum value of the front-to-back ratio). The article gives directivity patterns for different numbers of directors at a frequency of 762 MHz, dependencies of directivity coefficients on the number of directors and on the frequency, tables with comparative characteristics of directivity patterns. We carried out the simulation using the method of moments, since it achieves a high speed of calculations, as well as high accuracy of results. During simulation, the antenna had one reflector and an active element in the form of a half-wave dipole

**Key words:** Uda-Yagi dipole array, directivity, front-to-back ratio

### References

1. Balanis C.A. "Antenna theory analysis and design", fourth edition, Canada: John Wiley & Sons, 2016, 1072 p.

Submitted 28.11.2020; revised 17.02.2021

### Information about the authors

**Sergey M. Fyedorov**, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), International Institute of Computer Technologies (29 b Solnechnaya str., Voronezh 394026, Russia), tel.: +7(473)221-00-69, e-mail: fedorov\_sm@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9027-6163>

**Evgeniy A. Ishchenko**, student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel.: +7 (473)243-77-29, e-mail: kursk1998@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5270-0792>

**Ivan A. Zelenin**, Assistant Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel.: +7 (473)243-77-29

**Elizaveta V. Papina**, student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel.: +7 (473)243-77-29, e-mail: cool.pykhtina@mail.ru

**Alina V. Bunina**, student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel.: +7 (473)243-77-29, e-mail: Alina.bunina@list.ru

**Liliya V. Sopina**, student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel.: +7 (473)243-77-29, e-mail: sopina1803@gmail.com

## МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ПОТЕРЬ ИМПУЛЬСНОГО СИГНАЛА В ПОДСИСТЕМЕ АУТЕНТИФИКАЦИИ КОММУТАЦИОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

О.А. Кулиш

Краснодарское высшее военное орденов Жукова и Октябрьской Революции краснознаменное училище имени генерала армии С.М. Штеменко, г. Краснодар, Россия

**Аннотация:** для аутентификации коммутаторов второго уровня можно использовать код аутентификации, переданный отправителем информации получателю с помощью модуля аутентификации, встроенного в коммутатор. Для формирования кода аутентификации используется оптический импульс, энергия которого равна энергии фотона. При передаче оптического импульса актуальной является оценка потерь энергии в оптических устройствах модуля аутентификации. Разработана методика оценки потерь оптического импульса на изгибах интегрально-оптических волноводов. Новая методика получена в результате модификации расчета потерь оптической энергии на изгибах волноводов для непрерывного лазерного излучения. Используется классическое моделирование распространения оптического импульса гауссовой формы, при этом для замены изогнутого волновода эквивалентным прямолинейным волноводом применяется метод конформного отображения. С помощью метода конформного отображения изменен профиль показателя преломления прямолинейного волновода и преобразовано волновое уравнение для электрического поля. В результате применения новой методики выведена формула для расчета отношения энергетической мощности оптического импульса к мощности постоянного оптического сигнала. На основе графика полученной зависимости сделан вывод, что для импульсов длительностью 10 фс потери оптического импульса сильно отличаются от потерь непрерывного лазерного излучения, для импульсов длительностью 100 фс это отличие незначительно. Таким образом, для коротких импульсов при расчете потерь оптического сигнала в устройствах подсистем аутентификации необходимо использовать методику решения волнового уравнения с процедурой конформного отображения

**Ключевые слова:** оптическая связь, аутентификация, коммутаторы, изогнутый волновод, оптический импульс, потери излучения

### Введение

В ходе информационного обмена между автоматизированными системами, пакеты передаваемой информации проходят через не защищенную, не авторизованную среду (сеть провайдера связи) и могут быть перехвачены и скопированы любым абонентом, подключенным к адресному пространству провайдера связи. Проверка коммутационного оборудования отправителя на подлинность в сетях связи не осуществляется, кроме способов, которые могут быть скомпрометированы (например, проверка IP адреса, MAC – адреса оборудования) [1].

Таким образом, существует угроза перехвата передаваемой информации, её последующего анализа (с предварительным дешифрованием за обозримый промежуток времени) из-за отсутствия технологии гарантированной верификации (проверки) взаимодействующего оборудования.

Можно выделить три типа аутентификации:

1) аутентификация на основе конфиденциальной информации (паролей), находящейся у отправителя и получателя информации;

2) аутентификация на основе владения криптографическим сертификатом или другой дополнительной информацией;

3) аутентификация, основанная на уникальности определенных характеристик человека.

Проблема аутентификации в сети связи заключается в том, что отсутствует непосредственный контакт с аутентифицируемым пользователем. Чаще всего для аутентификации используются пароли, но при наличии определенных ресурсов у злоумышленника перехват или подбор пароля является делом времени [2].

Для устранения проблемы аутентификации коммутационного оборудования второго уровня модели OSI возможно использовать код аутентификации, сформированный при передаче случайной двоичной последовательности у отправителя и получателя информации с помощью модуля аутентификации, встроенного в коммутатор. На рис. 1 приведена обобщенная модель аутентификации коммутатора.

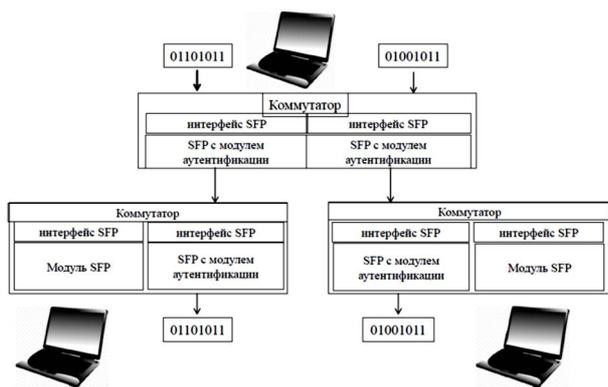


Рис. 1. Обобщенная модель аутентификации коммутатора

Модуль аутентификации (рис. 2) отправителя состоит из источника оптических импульсов (лазера), аттенюатора, оптического интерферометра с линией задержки в одном плече и фазового модулятора в другом. Модуль аутентификации получателя состоит из идентичного интерферометра и двух детекторов излучения, работающих в режиме счета ослабленных оптических импульсов. ФМ1 и ФМ2 – фазовые модуляторы оптического излучения. НО1, НО2, НО3, НО4 – разделители оптического излучения.

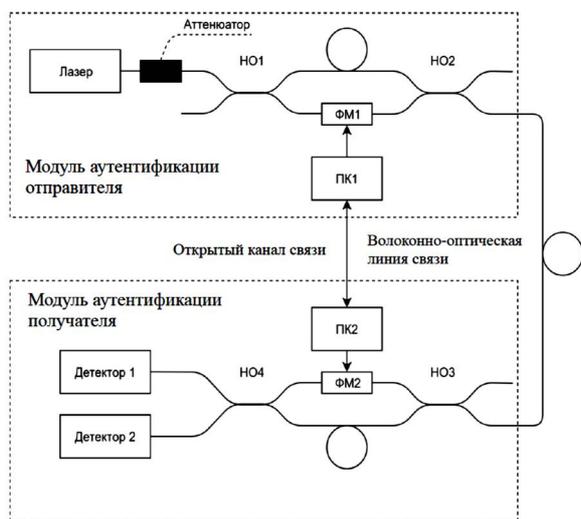


Рис. 2. Структурно-функциональная модель подсистемы аутентификации

Применение интегрально-оптических интерферометров для создания модуля аутентификации позволит уменьшить размер устройств, повысить достоверность передаваемой информации. Код аутентификации формируется у отправителя получателя с помощью протокола BB84 или другого протокола с фазовым кодированием информации в нескольких базисах. Чтобы исключить перехват информа-

ции злоумышленником, для формирования кода аутентификации используются ослабленные аттенюатором оптические импульсы с энергией, равной энергии одного фотона.

### Постановка задачи

Так как код аутентификации передается с помощью оптических импульсов с энергией, равной энергии одного фотона, при разработке подсистемы аутентификации необходимо определение уровня затухания импульса. Интегрально-оптические устройства подсистемы аутентификации имеют высокие потери оптического излучения. Методы расчета потерь непрерывного лазерного излучения в интегрально-оптических волноводах могут быть неприменимы к расчету потерь оптического импульса. Энергетические потери импульсного сигнала при распространении в оптическом волноводе могут отличаться от потерь непрерывного лазерного излучения, так как импульс состоит из большого числа гармоник с различными длинами волн. Таким образом, уровень потерь оптического импульса может накладывать ограничения на параметры волноводной структуры устройств подсистем аутентификации.

### Методы исследования

В работе был разработан метод расчета потерь оптического импульса в интегрально-оптических волноводах на основе метода моделирования непрерывного излучения. На рис. 3 приведена схема изогнутого волновода.

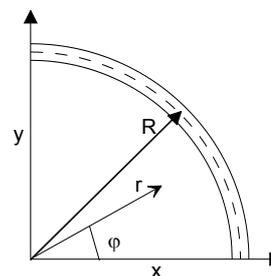


Рис. 3. Схематический вид изогнутого волновода:  
 $R$  – радиус кривизны волновода;  $r$ ,  
 $\varphi$  – полярные координаты

Математическое моделирование распространения оптического импульса, имеющего гауссовую форму, было применено с учетом формул конформного отображения к дифференциальному волновому уравнению [3]. Метод конформного отображения дает возмож-

ность заменить формулы для изогнутого волновода на формулы для эквивалентного ему прямолинейного волновода с помощью изменения системы координат и профиля показателя преломления.

В случае затухающего электрического поля моды волновой пакет оптического импульсного сигнала может быть представлен в полярной системе координат в виде:

$$E(r, \varphi, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{B}(\varphi, \omega) \psi(r, \omega) e^{i(\beta(\omega)R\varphi - \omega t)} d\omega, \quad (1)$$

где  $\omega$  – угловая частота оптического излучения;  $\tilde{B}(\varphi, \omega)$  – спектральная амплитуда оптического импульса поля моды волновода  $\psi(r, \omega)$ ;  $\beta(\omega)$  – постоянная распространения волноводной моды.

Постоянную распространения  $\beta(\omega)$  в уравнении (1) можно представить с помощью формулы  $\beta(\omega) = (\beta - \beta_0) + \beta_0$ .

Запишем функцию амплитуды спектра оптического импульса в виде:

$$\tilde{A}(\varphi, \omega) = \tilde{B}(\varphi, \omega) \exp(i(\beta - \beta_0)R\varphi), \quad (2)$$

где  $\beta_0 = \beta_{0r} + i\beta_{0i}$  – комплексная постоянная распространения волноводной моды при фиксированном значении угловой частоты  $\omega_0$ .

Проведем нормировку поля так, чтобы энергия импульсного сигнала в его направляемой части можно было представить формулой:

$$\frac{1}{2\pi} e^{-2\beta_{0i}R\varphi} \int_{-\infty}^{\infty} |\tilde{A}(\varphi, \omega)|^2 d\omega. \quad (3)$$

Волновое дифференциальное уравнение для напряженности электрического поля в случае, когда разность показателей преломления подложки и волноводного слоя мала, будет иметь вид:

$$\nabla_{xy}^2 E + \frac{n^2(x, y)}{c^2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = 0, \quad (4)$$

где  $n(x, y)$  – показатель преломления волновода. В общем случае показатель преломления волновода будет зависеть от координат. Подставим выражение волнового пакета оптического импульсного сигнала (1) в волновое уравнение (4). Проведем над результатом подстановки преобразование Фурье и получим дифференциальное волновое уравнение в виде:

$$\nabla_{xy}^2 (\tilde{A}(\varphi, \omega) \psi(r, \omega) e^{i\beta_0 R\varphi}) = -n^2 k^2 \psi(r, \omega) \cdot \tilde{A}(\varphi, \omega) e^{i\beta_0 R\varphi}, \quad (5)$$

где  $k = \omega / c$ .

К полученной формуле (5) применим метод конформного отображения, с помощью которого произойдет замена полярных координат  $r$  и  $\varphi$  на новые координаты  $u$  и  $v$  [4]. Замена координат производится по формулам:

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} = R \cdot \exp \frac{u}{R} \quad (6)$$

$$\varphi = \arctan \frac{y}{x} = \frac{v}{R}.$$

В результате применения конформного отображения уравнение (5) примет вид:

$$\nabla_{uv}^2 \left( \tilde{A} \left( \frac{v}{R}, \omega \right) \psi \left( \rho \cdot e^{\frac{u}{R}}, \omega \right) e^{i\beta_0 v} \right) = -n_e^2 k^2 \psi \left( \rho \cdot e^{\frac{u}{R}}, \omega \right) \cdot \tilde{A} \left( \frac{v}{R}, \omega \right) e^{i\beta_0 v}, \quad (7)$$

где  $\rho$  –  $1/2$  ширины волновода,  $\nabla_{uv}^2 = \frac{\partial^2}{\partial u^2} + \frac{\partial^2}{\partial v^2}$ .

В результате применения метода конформного отображения профиль показателя преломления преобразуется к виду:

$$n_e^2(u) = \frac{\rho^2}{R^2} e^{2u/R} n^2(x, y). \quad (8)$$

В результате рассмотренных преобразований расчет энергетических потерь импульса в изогнутом волноводе заменяется расчетом потерь импульса в прямолинейном волноводе. При этом был произведен переход к новым координатам и изменен профиль показателя преломления (рис. 4).

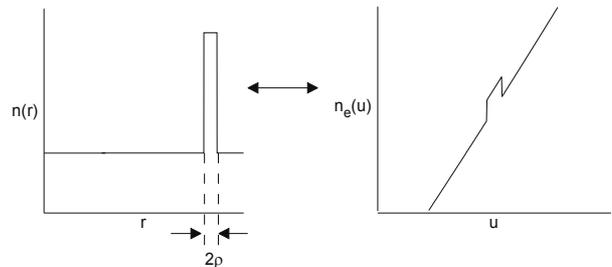


Рис. 4. Изменение профиля показателя преломления волновода при конформном отображении

На частоте  $\omega_0$  выполняется равенство  $A\left(\frac{v}{R}, t\right) = a(v, t) e^{-i\omega_0 t}$ , где  $A\left(\frac{v}{R}, t\right)$  является обратным Фурье-преобразованием  $\tilde{A}\left(\frac{v}{R}, \omega\right)$ . В результате применения теоремы модуляции получим формулу:

$$\tilde{A}\left(\frac{v}{R}, \omega\right) = \tilde{a}(v, \omega - \omega_0). \quad (9)$$

Введем обозначение  $\Psi(u, \omega) = \psi\left(\rho \cdot e^{\frac{u}{R}}, \omega\right)$ , тогда волновое дифференциальное уравнение (7) можно представить формулой:

$$\nabla_{uv}^2 (\tilde{a}\Psi e^{i\beta_0 v}) = -n_e^2 k^2 \Psi \cdot \tilde{a} e^{i\beta_0 v} \quad (10)$$

Произведем дифференцирование левой части преобразованного волнового уравнения (10) по переменным  $u$  и  $v$ . Сократим выражение (10) на экспоненту и получим формулу:

$$\tilde{a} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial u^2} + \Psi \frac{\partial^2 \tilde{a}}{\partial v^2} + 2i\beta_0 \Psi \frac{\partial \tilde{a}}{\partial v} - \Psi \beta_0^2 \tilde{a} = -n_e^2 k^2 \Psi \tilde{a} \quad (11)$$

С помощью введенной функции  $h(\omega)$  волновое уравнение (11) разделим на две части, в каждой из которых будет теперь только одна переменная:

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial u^2} + (n_e^2 k^2 - (\beta_0^2 + h(\omega))) \Psi = 0, \quad (12a)$$

$$\frac{\partial^2 \tilde{a}}{\partial v^2} + 2i\beta_0 \frac{\partial \tilde{a}}{\partial v} + h(\omega) \tilde{a} = 0. \quad (12б)$$

Проведем замену:

$$\beta_0^2 + h(\omega) = \beta^2(\omega). \quad (13)$$

Выражение (13) подставим в уравнение (12 б), в результате получим уравнение:

$$\frac{\partial^2 \tilde{a}}{\partial v^2} + 2i\beta_0 \frac{\partial \tilde{a}}{\partial v} + (\beta^2 - \beta_0^2) \tilde{a} = 0. \quad (14)$$

Формула решения уравнения (14) будет иметь вид:

$$\tilde{a} = f_1(\omega - \omega_0) e^{i(\beta - \beta_0)v} + f_2(\omega - \omega_0) e^{-i(\beta - \beta_0)v}. \quad (15)$$

В формуле (15) второе слагаемое соответствует отраженной волне и поэтому его можно отбросить. Введем выражение для входного импульсного сигнала, имеющего форму кривой Гаусса с шириной  $\tau$ :

$$a(0, t) = a_0 e^{-t^2/2\tau^2}. \quad (16)$$

В результате сравнения Фурье-преобразования  $(0, t)$  с уравнением (15) получаем выражение:

$$\tilde{a}(v, \omega - \omega_0) = a_0 \tau \sqrt{2\pi} e^{-(\omega - \omega_0)^2 \tau^2 / 2} e^{i(\beta - \beta_0)v} \quad (17)$$

Разложим  $\beta(\omega)$  в степенной ряд Тейлора и получим выражение для постоянной распространения волноводной моды:

$$\beta(\omega) = \beta_0 + \beta_1(\omega - \omega_0) + \frac{1}{2} \beta_2(\omega - \omega_0)^2 + \dots, \quad (18)$$

где  $\beta_n = \left. \frac{d^n \beta}{d\omega^n} \right|_{\omega=\omega_0}$ .

Для приближенных вычислений ограничимся слагаемыми второго порядка в разложении по формуле Тейлора и получим формулу:

$$\tilde{a}(v, \omega - \omega_0) \approx a_0 \tau \sqrt{2\pi} e^{-(\omega - \omega_0)^2 \tau^2 / 2} \cdot e^{i(\beta_1(\omega - \omega_0) + \frac{1}{2} \beta_2(\omega - \omega_0)^2)v} \quad (19)$$

Разделим постоянную распространения волноводной моды на действительную и мнимую части. С помощью равенства Персиваля найдем формулу связи энергии импульсного сигнала  $P_{pulse}$  с его энергией на входе в волновод  $P_0$ :

$$\begin{aligned} P_{pulse}(v) / P_0 &\approx \\ &\approx \frac{\tau}{\sqrt{\pi}} e^{-2\beta_{0i}v} \times \\ &\times \int_{-\infty}^{\infty} e^{-(\omega - \omega_0)^2 \tau^2} \cdot e^{-2v(\beta_{1i}(\omega - \omega_0) + \frac{1}{2} \beta_{2i}(\omega - \omega_0)^2)} d\omega = \quad (20) \\ &= \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{\beta_{2i}}{\tau^2} v}} \times \\ &\times \exp \left( -2\beta_{0i}v \left[ 1 - \left( \frac{1}{1 + \frac{\tau^2}{\beta_{2i}v}} \right) \frac{\beta_{1i}^2}{2\beta_{0i}\beta_{2i}} \right] \right), \end{aligned}$$

где  $\beta_{1i}$  и  $\beta_{2i}$  – мнимые части постоянных распространения  $\beta_1$  и  $\beta_2$ .

Из формулы (20) с учетом выражения для потерь моды

$$P_w(v) / P_0 = \exp(-2\beta_{0i}v) \quad (21)$$

получим выражение:

$$\begin{aligned} P_{pulse}(v) / P_w(v) &= \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{\beta_{2i}}{\tau^2} v}} \times \\ &\times \exp \left( \left( \frac{1}{1 + \frac{\tau^2}{\beta_{2i}v}} \right) \frac{\beta_{1i}^2}{\beta_{2i}} v \right) \quad (22) \end{aligned}$$

С помощью формулы (22) можно найти отношение мощности оптического импульса для его средней частоты к мощности непрерывного лазерного излучения.

Расчет энергетических потерь непрерывного сигнала в изогнутом волноводе может быть произведен одним из методов расчета потерь волновода с утечкой. Рассматриваемый волновод с функцией показателя преломления, преобразованной с помощью конформного отображения [4], обладает потерями оптического излучения на изгибах. Для построения математической модели волновода с утечкой и расчета постоянных распространения волноводных мод в работе был применен проекционный метод конечных элементов [5].

При расчетах принимались следующие па-

параметры волновода и оптического излучения: длина волны в диапазоне от 1,2 мкм до 1,4 мкм; показатель преломления подложки волновода  $n_s=1,447$ ; приращение показателя преломления волновода (разность между показателем преломления подложки и волноводящим слоем)  $\Delta n=0,01$ .

### Результаты

На рис. 5 приведен график зависимости потерь оптического излучения на изгибах интегрально-оптических волноводов от длины волны. Из графика видно, что потери излучения на изгибах волноводов могут сильно отличаться при различных длинах волн.

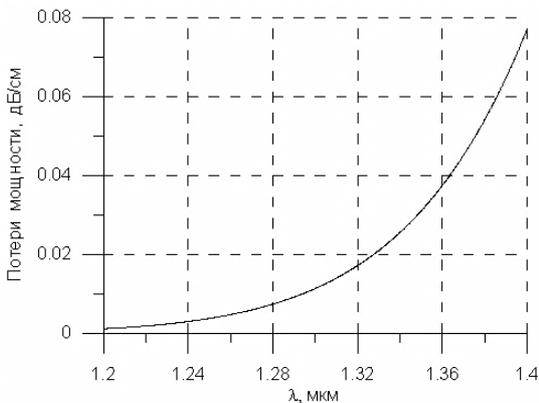


Рис. 5. График зависимости потерь на изгибе волноводов для непрерывного сигнала от длины волны

На основе формулы для отношения мощностей импульсного сигнала и непрерывного оптического излучения (22) был построен график, приведенный на рис. 6.

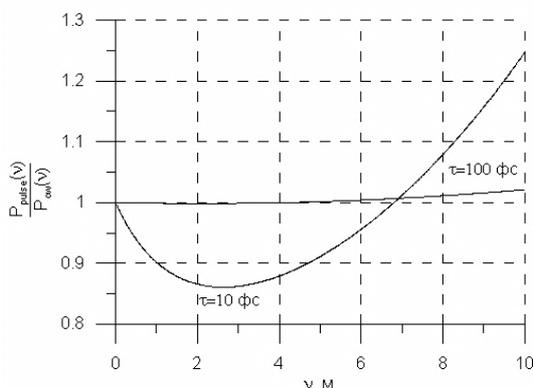


Рис. 6. Зависимость отношения мощности оптического импульса к мощности непрерывного излучения от длины волновода

### Заключение

Из полученного графика (рис. 6) был сделан вывод, что при длительности оптических импульсных сигналов 10 фс существует большее отличие величины потерь оптического импульса от потерь непрерывного излучения на изгибах волноводов. Таким образом, при создании интегрально-оптических устройств подсистемы аутентификации для коротких импульсных сигналов необходимо учитывать различие потерь импульсного сигнала и непрерывного излучения.

Из графика на рис. 6 следует также, что для импульсного сигнала длительностью 100 фс при малых длинах волновода энергетические потери оптического импульса и непрерывного излучения друг от друга практически не отличаются.

При малых длинах волноводов (рис. 6) потери оптического импульса будут даже меньше, чем потери соответствующего непрерывного монохроматического сигнала. Полученные данные можно объяснить тем, что гармоники импульсного сигнала с высокой частотой имеют потери меньше, чем гармоники этого же сигнала, имеющие низкие частоты.

### Литература

1. Давыдов А.Е., Максимов Р.В., Савицкий О.К. Защита и безопасность ведомственных интегрированных инфокоммуникационных систем. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2015. 192 с.
2. Таненбаум Э., Уэзеролл Д. Компьютерные сети. 5-е изд. СПб.: Питер, 2012. 960 с.
3. Численные методы / под ред. М.П. Лапчика. М.: Academia, 2017. 608 с.
4. Heiblum M., Harris J.H. Analysis of curved optical waveguides by conformal transformation// IEEE Journal of Quantum Electronics. 1975. V. QE-11. Pp. 75-83.
5. Tsuji Y., Koshiha M. Guided-mode and leaky-mode analysis by imaginary distance beam propagation method based on finite element scheme // Journal Lightwave Technology. 2000. V. 18. No. 4. Pp. 618-623.

**Информация об авторах**

**Кулиш Ольга Александровна** – канд. физ.-мат. наук, доцент, доцент кафедры математики (и математических основ криптографической защиты информации), Краснодарское высшее военное орденов Жукова и Октябрьской Революции краснознаменное училище имени генерала армии С.М. Штеменко (350063, Россия, г. Краснодар, ул. Красина, д. 4), тел. 8-961-521-35-77, e-mail: [culish\\_olga@mail.ru](mailto:culish_olga@mail.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2295-9792>

**PULSE SIGNAL LOSS ESTIMATION TECHNIQUE IN SWITCHING EQUIPMENT  
AUTHENTICATION SUBSYSTEM**

**O.A. Kulish**

**Krasnodar Higher Military Order of Zhukov and the October Revolution Red Banner School named  
after Army General S.M. Shtemenko, Krasnodar, Russia**

**Abstract:** to authenticate L2 switches, you can use the authentication code transmitted by the sender of information to the recipient using the authentication module built into the switch. To generate the authentication code, an optical pulse is used, the energy of which is equal to the photon energy. When transmitting an optical pulse, it is important to estimate the energy losses in the optical devices of the authentication module. A technique was developed for assessing the loss of an optical pulse at bends in integrated optical waveguides. The new technique was obtained as a result of a modification of the calculation of optical energy losses at bends of waveguides for continuous laser radiation. The classical simulation of the propagation of a Gaussian optical pulse was used, while the conformal mapping method was used to replace a curved waveguide with an equivalent rectilinear waveguide. Using the conformal mapping method, the profile of the refractive index of a rectilinear waveguide was changed and the wave equation for the electric field was transformed. As a result of applying the new technique, a formula was derived for calculating the ratio of the energy power of an optical pulse to the power of a constant optical signal. On the basis of the plot of the obtained dependence, it was concluded that for pulses with a duration of 10 fs, the loss of an optical pulse differs greatly from the loss of continuous laser radiation; for pulses with a duration of 100 fs, this difference is insignificant. Thus, for short pulses, when calculating the loss of an optical signal in devices of authentication subsystems, it is necessary to use the method for solving the wave equation with the conformal mapping procedure

**Key words:** optical communication, authentication, switches, integrated optics, pulse signals, radiation loss

**References**

1. Davydov A.E., Maksimov R.V., Savitsky D.C. "Protection and security of departmental integrated information communication systems" ("Zashchita i bezopasnost' vedomstvennykh integrirovannykh infokommunikatsionnykh sistem"), St. Petersburg, SPbPU, 2015, 192 p.
2. Tanenbaum E., Weatherall D. "Computer networks" ("Komp'yuternye seti"), St. Petersburg, Piter, 2012, 960 p.
3. Lapchika M.P. ed. "Numerical methods" ("Chislennye metody"), Moscow, Academiya, 2017, 608 p.
4. Heiblum M., Harris J.H. "Analysis of curved optical waveguides by conformal transformation", *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1975, vol. QE-11, pp. 75-83.
5. Tsuji Y., Koshiba M. "Guided-mode and leaky-mode analysis by imaginary distance beam propagation method based on finite element scheme", *Journal Lightwave Technology*, 2000, vol. 18, no. 4, pp. 618-623

Submitted 03.12.2020; revised 15.02.2021

**Information about the author**

**O'lga A. Kulish**, Cand. Sc. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Krasnodar Higher Military Order of Zhukov and the October Revolution Red Banner School named after Army General S.M. Shtemenko (4 Krasin str., Krasnodar 350063, Russia), e-mail: [culish\\_olga@mail.ru](mailto:culish_olga@mail.ru), tel.: +7-961-521-35-77, <https://orcid.org/0000-0003-2295-9792>

**СМЕШАННАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА S-ПАРАМЕТРОВ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ СТРУКТУР**

**Т.С. Глотова, Д.В. Журавлёв, В.В. Готов**

**Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия**

**Аннотация:** различные типы СВЧ-устройств можно описать с помощью падающих и отражённых волн, которые распространяются в подключенных к ним линиях передач. Связь между этими волнами описывается волновой матрицей рассеяния или матрицей s-параметров. Оценка дифференциальных структур необходима для обеспечения оптимальных характеристик схемы. Комбинированные дифференциальные и синфазные (смешанные) параметры рассеяния (s-параметры) хорошо адаптированы для точных измерений линейных сетей на радиочастотах. Представлено преобразование между стандартными s-параметрами и s-параметрами смешанного режима, также описано графическое сравнение графиков стандартных и смешанных потерь s-параметра. S-параметры смешанного режима, полученные с помощью описанного метода, имеют хорошее согласие для возбудителя и реакции с одним и тем же режимом (общий или дифференциальный) и небольшую вариацию с разными режимами. Была изготовлена дифференциальная структура, которая измеряется с помощью двухпортового векторного анализатора цепей и четырехпортового анализатора цепей смешанного режима. Для прогнозирования поведения параметров смешанного режима с использованием традиционного двухпортового векторного анализатора цепей можно применить метод преобразования режимов, однако четырехпортовый анализатор цепей смешанного режима по-прежнему необходим для точного измерения влияния режима преобразования в реальные интегрированные дифференциальные тестовые структуры

**Ключевые слова:** s-параметр смешанного режима, дифференциальная структура, многопортовый векторный анализатор цепей

**Введение**

Дифференциальные структуры широко используются в радиочастотных, микроволновых и высокоскоростных широкополосных устройствах. Оценка дифференциальных структур необходима для обеспечения оптимальных характеристик схемы. Комбинированные дифференциальные и синфазные (смешанные) параметры рассеяния (s-параметры) хорошо адаптированы для точных измерений линейных сетей на радиочастотах. Однако измерения дифференциальной структуры с помощью традиционного двухпортового векторного анализатора цепей (ВАЦ) создают множество проблем [1]. Основным препятствием для применения дифференциальных структур в радиочастотах является то, что большая часть испытательного оборудования предназначена для несимметричных устройств [2].

**Методология**

Напряжения и токи стандартного и смешанного режима s-параметров дифференциальной структуры для несимметричных устройств ВЧ могут быть определены на каждой клемме устройства. Исходя из определений напряжения, тока и импеданса, нормализованные волны

мощности можно определить как возбудитель и отклик. Волны мощности возбудителя распространяются в тестируемом устройстве, а волны мощности отклика распространяются от него [3]. Блок-схема четырехпортового устройства показана на рис. 1.

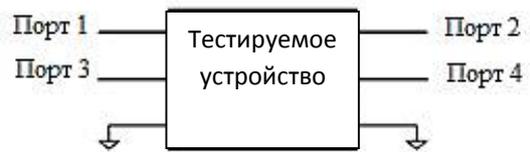


Рис. 1. Схема несимметричного 4-портового тестируемого устройства

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Соотношение между мощными волнами показано в формуле, где  $B_{std} = S_{std}$ ,  $A_{std}$ ,  $B_{std}$  и  $A_{std}$  представляет матрицу волн возбудителя и отклика соответственно; тогда как  $S_{std}$  - это стандартная матрица s-параметров с четырьмя портами. Матричное представление волн показано в формулах (2) и (3) соответственно.

$$B_{std} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \end{bmatrix} \quad A_{std} = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$S_{std} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Для симметричных устройств дифференциальные и синфазные напряжения и токи могут быть определены для каждого симметричного порта отдельно. Аналогичным образом можно определить дифференциальный и синфазный импеданс. Блок-схема двухпортового дифференциального тестового устройства показана на рис. 2.



Рис. 2. Схема дифференциального 2-портового тестового устройства

Смешанная s-матрица может быть организована так, чтобы она была похожа на несимметричную матрицу, где каждый столбец (строка) представляет различные условия возбудителя. Информация о режиме, а также информация о порте должны быть включены в s-матрицу смешанного режима [4].

$$\begin{bmatrix} b_{d1} \\ b_{d2} \\ b_{c1} \\ b_{c2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{d1d1} & S_{d1d2} & S_{d1c1} & S_{d1c2} \\ S_{d2d1} & S_{d2d2} & S_{d2c1} & S_{d2c2} \\ S_{c1d1} & S_{c1d2} & S_{c1c1} & S_{c1c2} \\ S_{c2d1} & S_{c2d2} & S_{c2c1} & S_{c2c2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{d1} \\ a_{d2} \\ a_{c1} \\ a_{c2} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$S_{didj}$  и  $S_{cicj}$  ( $i, j = 1, 2$ ) - это s-параметры дифференциального и синфазного режима соответственно.  $S_{dicj}$  и  $S_{cidj}$  ( $i, j = 1, 2$ ) - это s-параметры преобразования мод или перекрестные моды. Дифференциальный ответ представлен параметрами  $S_{didj}$  ( $i, j = 1, 2$ ) в верхнем левом углу s-матрицы смешанного режима (4) из-за дифференциального возбудителя. Преобразование синфазных волн в дифференциальные волны характеризуется параметрами  $S_{dicj}$  ( $i, j = 1, 2$ ).

### Преобразование между стандартным режимом и смешанным s-параметром

S-параметры смешанного режима могут быть напрямую связаны со стандартными четырехпортовыми s-параметрами, если узлы 1 и 2, показанные на рис. 1, аппроксимированы как один дифференциальный порт [5]. Аналогично узлы 3 и 4, показанные на рис. 1, также сгруппированы как еще один дифференциальный порт. Взаимосвязь между портами в стандартном и смешанном режимах описана в формулах (5) и (6) соответственно, где  $a_i$  и  $b_i$  ( $i$  - от 1 до 4) - волны, измеренные в портах 1-4.

$$\begin{aligned} a_{d1} &= \frac{1}{\sqrt{2}} (a_1 - a_3) \\ a_{c1} &= \frac{1}{\sqrt{2}} (a_1 + a_3) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} a_{d1} &= \frac{1}{\sqrt{2}} (b_1 - b_3) \\ a_{c1} &= \frac{1}{\sqrt{2}} (b_1 + b_3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} a_{d2} &= \frac{1}{\sqrt{2}} (a_2 - a_4) \\ a_{c2} &= \frac{1}{\sqrt{2}} (a_2 + a_4) \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} a_{d2} &= \frac{1}{\sqrt{2}} (b_2 - b_4) \\ a_{c2} &= \frac{1}{\sqrt{2}} (b_2 + b_4) \end{aligned}$$

Матрица преобразования между стандартными s-параметрами и s-параметрами смешанного режима может быть получена из следующих уравнений: падающие волны смешанного режима  $A_{mm}$  в (7); волны смешанного режима  $B_{mm}$  в (8); матрица s-параметров смешанного режима  $S_{mm}$  в (11); стандартная четырехпортовая матрица s-параметров  $S_{std}$  в (3); и матрица преобразования  $M$  в (9) и  $M^{-1}$  в (10).

$$A_{mm} = M A_{std} = \begin{bmatrix} a_{d1} \\ a_{d2} \\ a_{c1} \\ a_{c2} \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$B_{mm} = M B_{std} = \begin{bmatrix} b_{d1} \\ b_{d2} \\ b_{c1} \\ b_{c2} \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$M = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$M^{-1} = \frac{M^*}{|M|} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$B_{mm} = S_{mn}A_m = \begin{bmatrix} b_{d1} \\ b_{d2} \\ b_{c1} \\ b_{c2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{d1d1} & S_{d1d2} & S_{d1c1} & S_{d1c2} \\ S_{d2d1} & S_{d2d2} & S_{d2c1} & S_{d2c2} \\ S_{c1d1} & S_{c1d2} & S_{c1c1} & S_{c1c2} \\ S_{c2d1} & S_{c2d2} & S_{c2c1} & S_{c2c2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{d1} \\ a_{d2} \\ a_{c1} \\ a_{c2} \end{bmatrix} \quad (11)$$

Тестируемое устройство представляет собой 4-слойную подложку стеклотекстолита (FR4) с конструкцией спаренной дифференциальной структуры. Изготовленная тестовая плата показана на рис. 3. Тестовая структура была спроектирована как сильно связанная микрополосковая дифференциальная структура, и ее дифференциальное сопротивление составляет 100 Ом. Разъемы SMA использовались для подключения ВАЦ. В таблице представлены основные параметры тестовой платы.



Рис. 3. Изготовленная тестовая плата

Параметры тестовой платы

Медь	Толщина (мкм)	42,5
	Ширина линии (мкм)	290
	Расстояние (мкм)	510
Препрег	Диэлектрическая проницаемость, $\epsilon_r$	4.0
	Толщина (мкм)	190
	Касательная потеря	0,02

Во время измерения любые два порта тестируемого устройства подключены к двухпортовому анализатору цепей, а два оставшихся порта были подключены к нагрузке 50 Ом. Все комбинации четырех отдельных портов измеряются для получения стандартных матриц s-параметров [6]. Эти результаты двухпортовых измерений могут использоваться для формирования стандартной четырехпортовой матрицы s-параметров  $S_{std}$  в формуле (3). Стандартная матрица s-параметров  $S_{std}$  будет преобразована

в матрицу s-параметров смешанного режима  $S_{mm}$ .

На рис. 4–6 представлены кривые, обозначенные как «Стандартные», представляют s-параметры смешанного режима, преобразованные из измерений двухпортового векторного анализатора цепей, а кривые, обозначенные как «смешанные», представляют s-параметры смешанного режима, измеренные с помощью ВАЦ. На рис. 4 вносимые потери  $S_{d1d2}$  дифференциального возбудителя и дифференциального отклика очень хорошо согласуются между «стандартным» и «смешанным». По графикам можно увидеть, что метод преобразования режима между s-параметрами стандартного и смешанного режима может использоваться для описания характеристик дифференциальных структур, у которых есть только традиционный двухпортовый анализатор цепей.

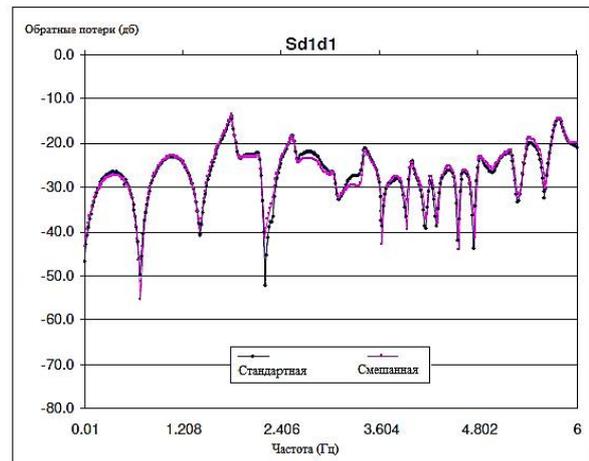


Рис. 4. Обратные потери в дифференциальном режиме реакции и стимула

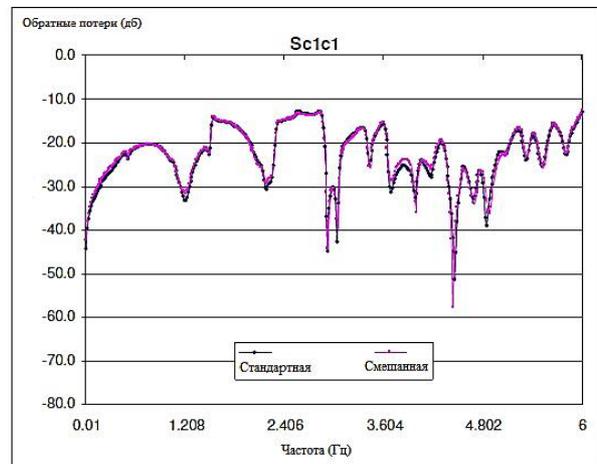


Рис. 5. Обратные потери в синфазном режиме реакции и стимула

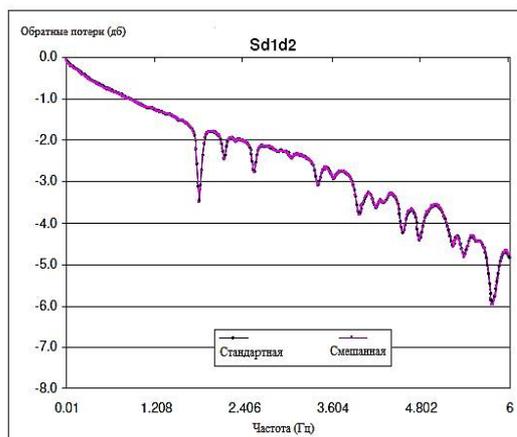


Рис. 6. Вносимые потери в дифференциальном режиме ответа и стимула

### Вывод

Преобразование мод между стандартными  $s$ -параметрами и  $s$ -параметрами смешанного режима было представлено в этой статье. Определение характеристик изготовленной дифференциальной структуры показало, что существует тесная корреляция между  $s$ -параметрами смешанного режима, преобразованными из двухпортового векторного анализатора цепей, и измерениями смешанного четырехпортового анализатора цепей.  $S$ -параметры

смешанного режима, полученные с помощью двух методов, имеют хорошее согласие для возбуждателя и реакции с одним и тем же режимом (общий или дифференциальный) и небольшую вариацию с разными режимами (общий / дифференциальный, дифференциальный / общий).

### Литература

1. Кечиев Л.Н. Проектирование печатных плат для цифровой быстродействующей аппаратуры. М.: ООО «Группа ИДТ», 2007. 616 с.
2. Ромащенко М.А. Основные задачи анализа обеспечения ЭМС в конструкциях РЭС и принципы его выполнения // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2011. Т. 7. № 4. С. 106-109.
3. Суриков В.В. Электромагнитная совместимость приемно-передающих устройств, расположенных на элементах конструкций сложной формы: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 01.04.03. СПб., 2010. 36 с.
4. Князев А.Д., Кечиев Л.Н., Петров Б.В. Конструирование радиоэлектронной и электронно-вычислительной аппаратуры с учетом электромагнитной совместимости. М.: Радио и связь, 1989. 224 с.
5. Ромащенко М.А. Методы оптимального проектирования конструкций радиоэлектронных средств с учетом электромагнитной совместимости и помехоустойчивости: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.12.04. Воронеж, 2014. 36 с.
6. Ромащенко М.А. Методика анализа помехоустойчивости печатных плат при проектировании РЭС с учетом ЭМС // Радиотехника. 2014. № 3. С. 92-95.

Поступила 08.01.2020; принята к публикации 17.02.2021

### Информация об авторах

**Глотова Татьяна Сергеевна** - аспирант, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: tatyana-livny@mail.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9122-8988>

**Журавлёв Дмитрий Владимирович** – канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой радиоэлектронных устройств и систем, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: faddey52@mail.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1087-9704>

**Глотов Вадим Валерьевич** - ассистент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: vadik-livny@mail.ru, ORCID: <http://orcid.org/https://0000-0001-5129-4369>

## MIXED CHARACTERISTIC OF S-PARAMETERS OF DIFFERENTIAL STRUCTURES

T.S. Glotova, D.V. Zhuravlyev, V.V. Glotov

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

**Abstract:** various types of microwave devices can be described using incident and reflected waves that propagate in the transmission lines connected to them. The relationship between these waves is described by the scattering wave matrix or the  $S$ -parameter matrix. Evaluation of differential structures is necessary to ensure optimal circuit performance. The combined differential and common-mode (mixed) scatter parameters ( $s$ -parameters) are well suited for accurate measurements of linear networks at radio frequencies. We present the transformation between standard  $s$ -parameters and mixed-mode  $s$ -parameters, and a graphical comparison of graphs of standard and mixed  $s$ -parameter losses is also described.  $S$ -parameters of the mixed mode, obtained using the described method, have good agreement for the pathogen and the reaction with the same mode (general or differential) and little variation with different modes. We fabricated and measured a differential structure with a two-port vector network analyzer and a four-port mixed-mode network analyzer. Mode conversion can be used to predict the behavior of mixed-mode parameters using a traditional 2-port vector network analyzer, but a four-port mixed-mode network analyzer is still required to accurately measure the effect of conversion mode on real integrated differential test structures

**Key words:** mixed mode s-parameter, differential structure, multiport vector network analyzer

#### References

1. Kechiev L.N. "Design of printed circuit boards for digital high-speed equipment" ("Proektirovanie pechatnykh plat dlya tsifrovoy bystrodeystvuyushchey apparatury"), Moscow, Gruppya IDT, 2007, 616 p.
2. Romashchenko M.A. "The main tasks of the analysis of the provision of EMC in the structures of RES and the principles of its implementation", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2011, vol. 7, no. 4, pp. 106-109.
3. Surikov V.V. "Electromagnetic compatibility of receiving and transmitting devices located on structural elements of complex shapes" ("Elektromagnitnaya sovmestimost' priemno-peredayushchikh ustroystv, raspolozhennykh na elementakh konstruktivnykh slozhnoy formy"), Cand. Tech. Sciences dis., 01.04.03, St. Petersburg, 2010, 36 p.
4. Knyazev A.D., Kechiev L.N., Petrov B.V. "Design of radio-electronic and electronic computing equipment, taking into account electromagnetic compatibility" ("Konstruirovaniye radioelektronnoy i elektronno-vychislitel'noy apparatury s uchetoem elektromagnitnoy sovmestimosti"), Moscow, Radio I svyaz', 1989, 224 p.
5. Romashchenko M.A. "Methods of optimal design of structures of radio-electronic means, taking into account electromagnetic compatibility and noise immunity" ("Metody optimal'nogo proektirovaniya konstruktivnykh radioelektronnykh sredstv s uchetoem elektromagnitnoy sovmestimosti i pomekhoustoychivosti"), Cand. Tech. Sciences dis., 05.12.04, Voronezh, 2014, 36 p.
6. Romaschenko M.A. "Methodology for analyzing the noise immunity of printed circuit boards in the design of radio electronic devices taking into account EMC", *Radio Engineering (Radiotekhnika)*, 2014, no. 3, pp. 92-95.

Submitted 08.01.2020; revised 17.02.2021

#### Information about the authors

**Tat'yana S. Glotova**, Graduate student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: tatyana-livny@mail.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9122-8988>

**Dmitriy V. Zhuravlyev**, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: faddey52@mail.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1087-9704>

**Vadim V. Glotov**, Assistant, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: vadik-livny@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5129-4369>

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ КАЛИБРОВКИ АНАЛОГОВЫХ МИКРОСХЕМ

А.В. Башкиров, Н.В. Астахов, Н.В. Ципина, А.Б. Антиликаторов, А.С. Демихова

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** предложен один из методов машинного обучения, который можно применить для разработки нейросети, предсказывающей габариты элементов аналоговых интегральных схем на примере двух усилителей, при этом учитываются их предполагаемые целевые характеристики. Эта научная работа показывает, что должным образом обученная нейросеть способна изучить шаблоны проектирования и генерировать схемы калибровки, которые являются адекватными и подходят под требования спецификаций, в том числе и тех, которые не содержались в обучающих данных. Представлены три варианта организации нейросети, по результатам анализа которых был сделан вывод о том, что нейросети показали себя, как очень гибкие модели, способные выполнять расчет топологии аналоговых интегральных схем. Предложенная в работе методика продемонстрировала достаточную эффективность в преодолении высокой нелинейности задач расчета топологии и может использоваться конструкторами на практике. Применение такого подхода позволяет существенно сократить время проектирования (в отдельных задачах в 6 и более раз) и предоставить более широкий инструментарий средств автоматизации проектирования аналоговых интегральных схем

**Ключевые слова:** машинное обучение, проектирование аналоговых интегральных схем, топология интегральных схем, проектирование операционных усилителей, глубокое обучение нейронных сетей

### Введение

Машинное обучение ML (*ML*, Machine Learning) - это процесс, в ходе которого компьютер совершенствует свои возможности посредством анализа прошлого опыта. В настоящее время разработчиками систем искусственного интеллекта принято считать, что для огромного числа приложений обучение системы путем демонстрации ей примеров желаемого поведения ввода-вывода может быть проще запрограммировать, чем предвидеть все возможные реакции на все входные данные [1, 3].

Тем не менее процесс автоматического улучшения поведения с помощью опыта может быть дорогостоящим и длительным, особенно когда необходимо интерпретировать и обрабатывать большие объемы данных.

Существует большое разнообразие методов, которые развивались на протяжении многих лет, которые могут быть использованы для преодоления этих проблем, и выбор правильного может быть сложной задачей. Хотя первоначальная цель при обработке данных может состоять в том, чтобы найти узнаваемый паттерн, исследователи машинного обучения (ML) идут дальше и пытаются построить алгоритмы, которые могут учиться и делать прогнозы на основе имеющихся данных.

Чем больше данных доступно, тем лучше будет работать алгоритм. С появлением больших облачных сервисов, где пользователи имеют достаточную вычислительную мощность и неограниченное место для сбора и обработки большего количества данных, чем в прошлые десятилетия, ML сделал еще один шаг вперед.

Самые последние достижения ML можно ощутить в области развития искусственного интеллекта (ИИ), в таких областях, как компьютерное зрение, распознавание речи, перевод с различных иностранных языков, медицинская диагностика, экономика и поисковые системы.

Тот факт, что методы ML были разработаны для анализа экспериментальных данных с высокой пропускной способностью новыми способами, делает их привлекательным подходом при решении более сложных задач. Тем не менее, какими бы мощными эти методы ни казались на первый взгляд, есть некоторые ограничения при их использовании. Проблема заключается в количестве данных, которые мы можем собрать и проанализировать. Алгоритмы ML очень сильно зависят от количества доступных данных и их характеристик. Если решаемая проблема описывается небольшим количеством исследуемых данных, будет трудно построить модель, из которой мы можем извлечь набор правил, которые будут использоваться для получения наилучшего воз-

возможного обобщения. Обобщение - одна из ключевых целей любой техники ML. Это означает, что модели должны быть обучены, чтобы правильно классифицировать данные, избегая при этом быть слишком специфичными для примеров, которые использовались для обучения алгоритма (проблема, обычно известная как переобучение) [2].

ML - это обширная область исследований и предлагает множество решений. При автоматической калибровке аналоговых интегральных схем (ИС) возникают следующие задачи и трудности:

- какие части процесса калибровки могут извлечь наибольшую пользу из методологий ML?

- после их идентификации, какие наиболее подходящие методы мы можем выбрать из имеющихся?

В данной статье предлагаются некоторые подходы к использованию алгоритмов ML при калибровке аналоговых ИС. Проектирование аналоговых ИС все еще очень зависит от вмешательства проектировщика на всех этапах процесса проектирования, в отличие от процессов проектирования цифровых интегральных схем, где применение систем автоматизированного проектирования занимает львиную долю. Автоматическое проектирование аналоговых ИС можно разделить на две категории [2]:

1. Автоматическое проектирование, задачей которого является поиск размеров устройств, таких как ширина и длина резисторов и конденсаторов, для заданной топологии из набора спецификаций;

2. Автоматическое проектирование, задачей которого является поиск топологии схемы и определение характеристик элементов из набора спецификаций.

Основная цель применения ML при проектировании аналоговых ИС - ускорить процесс калибровки аналоговых ИС с помощью методологий ML. В статье был использован процесс проектирования, который работает параллельно с генетическим алгоритмом *non-dominated sorted genetic algorithm II (NSGA-II)*, который является одним из основных блоков в ядре оптимизации среды автоматизации проектирования аналоговых интегральных схем (AIDA), разработанной в Instituto Superior Técnico. Основные цели этой работы:

- Улучшить процесс проектирования аналоговых ИС путем повторного использования

данных, собранных в ходе предыдущих проектов;

- Сделать обзор методологий ML для оценки их применимости к автоматизации проектирования аналоговых ИС;

- Создавать и внедрять функциональные и автоматизированные модели, которые могут изучать шаблоны из прошлых проектов и обобщать эти знания для новых проектов;

- Применять разработанные модели при проектировании аналоговых ИС.

### Машинное обучение применительно к калибровке аналоговых ИС

Модели нейронных сетей (ANN), представленные в этой работе, использовали данные, полученные из пакета SPICE, где зависящие от времени и частоты данные были созданы для многочисленных топологий схем, используемых при создании операционного усилителя. Обучающий набор состоял из 3095 данных, а проверочный - из 1020 данных. Для моделирования сетей был использован инструментариум ANN, сформированный на MATLAB. Узлы скрытого слоя (от 8 до 14) были итеративно протестированы для получения наилучшего обобщения и точности как на обучающих, так и на валидационных примерах. В качестве активационной функции для всего набора узлов скрытого слоя использовалась гиперболическая касательная сигмовидная функция (рис. 1), а в качестве активационной функции для всего набора узлов для выходного слоя применена линейная функция, показанная на рис. 2. Каждая сеть имеет только один выходной узел, поскольку для моделирования каждого отдельного параметра производительности операционного усилителя была применена отдельная сеть [4].

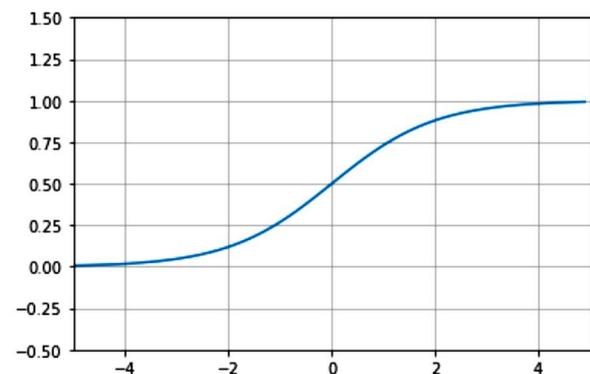


Рис. 1. Сигмовидная функция

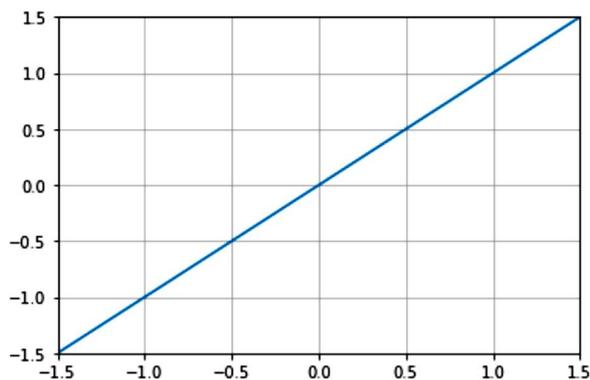


Рис. 2. Линейная функция

### Глубокое обучение

Глубокое обучение - это подмножество машинного обучения, характеризующееся сложными и надежными моделями, которые могут обрабатывать данные с высокой пропускной способностью, превосходя по производительности некоторые из наиболее традиционных методов, применяемых в машинном обучении. Сверточные нейронные сети (CNN) и глубокие нейронные сети стали основными в современных приложениях, таких как компьютерное зрение, распознавание речи, биоинформатика и синтез лекарств [1-2].

Слово "свертка" используется для обозначения ANN сетей, поскольку операции, связанные с ними, такие как линейные преобразования, записываются в виде свертки. В 1-мерном случае свертка вектора  $x \in \mathbb{R}^p$  с фильтром  $g_{1-p}, g_{2-p}, \dots, g_{p-2}, g_{p-1}$  имеет компонент  $k^{th}$ , заданный:

$$y_k = \sum_{n=1}^p x_n g_{k-n}$$

### Проектирование потока калибровки ИС

Предлагаемый в данной статье автоматический поток калибровки аналоговых ИС с использованием ANN выглядит следующим образом:

1. Определение целевого прогнозирования;
2. Сбор данных для обучения;
3. Создание модели обучения;
4. Модель обучения;
5. Подтверждение точности прогноза;
6. Рассмотрение и анализ полученных результатов;

7. Испытания отобранных результатов в AIDA.

AIDA, архитектура которой показана на рис. 3, представляет собой среду автоматизации проектирования аналоговых интегральных схем, реализующую поток проектирования от спецификации на уровне схемы до описания физической компоновки. AIDA является результатом интеграции двух собственных инструментов, а именно AIDA-C и Aida-L.

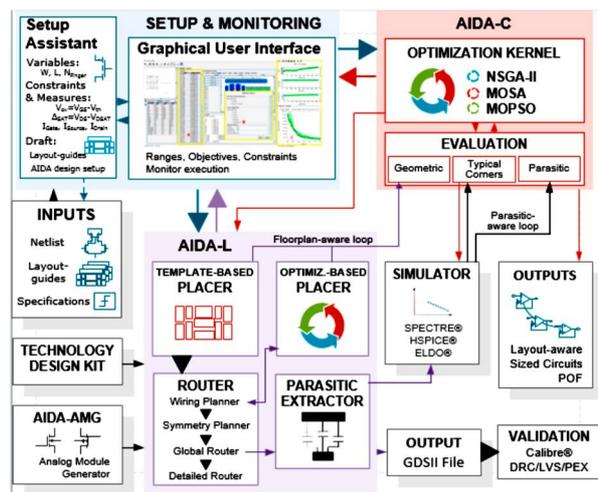


Рис. 3. Архитектура AIDA

### Обучение системы

Для доказательства предложенного метода был использован одноступенчатый (VCOTA), а для второго примера был рассмотрен двухкаскадный усилитель Miller (рис. 4).

Для обучения ANN были использованы следующие исходные данные из прошлых проектов: потребляемый ток ( $I_{dis}$ ), потребляемая мощность ( $P_{dis}$ ), усиления по постоянному току (PM), увеличение пропускной способности (GBP), скорость нарастания выходного сигнала (SR), суммарный коэффициент гармонических искажений (THD), коэффициент сброса единого режима (CMRR), коэффициент подавления помех питания (PSRR), диапазон выходного напряжения (OVR), общий режим входного диапазона (CMIR), выходное сопротивление (OR), и наведенный на входной сигнал шум (IRN). Используемый набор данных состоял из 13 500 различных точек, из которых 13 490 использовались в качестве обучающего набора и 10 - в качестве тестового набора. TensorFlow использовался в качестве библиотеки ресурсов машинного обучения. Два скрытых слоя ANN содержали 100 и 200 узлов соответственно. Оба скрытых слоя использовали

линейную функцию в качестве функции активации [3].

Сбор данных для питания нейронной сети занял примерно 18 часов, и только 19 минут было потрачено на обучение сети. Результаты моделирования показали, что предложенный метод глубокого обучения успешно предсказал 7 значений элементов, которые удовлетворяют требуемым 13 характеристикам с точностью в 93%. Диапазоны значений, найденных в наборе данных, показаны в табл. 1.

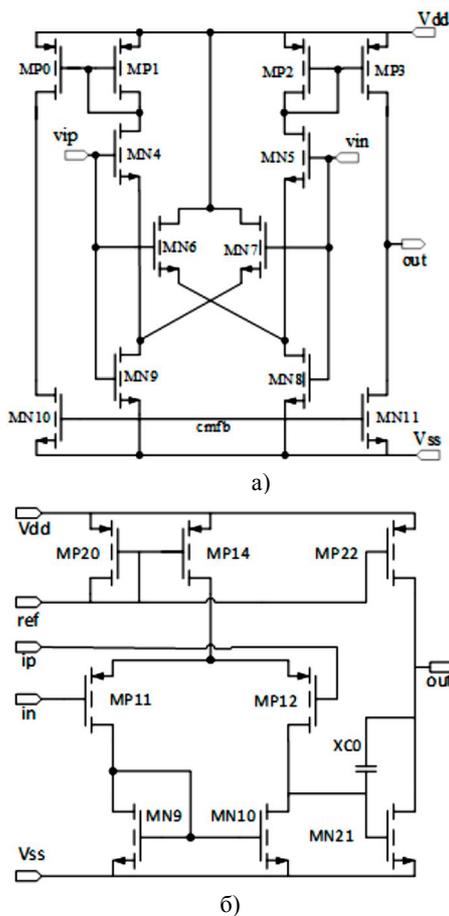


Рис. 4. Принципиальная схема: а) одноступенчатый усилитель; б) двухступенчатый усилителя Миллера

Сбор данных занял примерно 1 час 47 минут, а генерация всех семи оценок производительности с использованием моделей ANN заняла около 51,9 МКС, что по сравнению с непосредственным использованием SPICE привело к ускорению примерно в 40 000 раз.

Все тесты проводились с помощью набора инструментов MATLAB neural network toolbox.

Таблица 1

Диапазоны производительности в двух наборах данных

		Усиление постоянного тока	Произведение коэффициента усиления на полосу частот (GBW)	Потребляемый ток	Запас по фазе
VCOTA	Max	56,8 дБ	78 МГц	395 мкА	80°
	Min	44,7 дБ	34 МГц	221 мкА	60°
Двухступенчатый Miller	Max	97,2 дБ	102,8 МГц	0,8 мкА	89,9°
	Min	59,8 дБ	1,5 МГц	0,3 мкА	55°

Для обучения были применены три различных ANN с разным числом переменных и узлов. Каждая из них имеет 3 скрытых слоя с 120, 240, 60 узлами, а выходной слой имеет 12 узлов.

ANN-1 был обучен на исходном наборе данных для 5000 выборок с партиями из 512 образцов. Его обучение заняло менее 15 минут. ANN-2 был обучен на наборе данных, увеличенном в 40 раз (почти 700 тысяч выборок) за те же 5000 выборок. Его обучение заняло около 8 часов. ANN-3 также был обучен на том же дополненном наборе данных, только для 500 выборок, но был инициализирован данными из ANN-1. Его обучение заняло меньше часа. Их эффективность после обучения на обучающих и валидационных наборах суммируется в табл. 2.

Таблица 2

Производительность обученных ANN для топологии VCOTA

VCOTA		Обучение с учетом средней квадратичной ошибки (MSE)	Значение средней квадратичной ошибки (MSE)	Обучение с учетом абсолютной ошибки (MAE)	Значение абсолютной ошибки (MAE)
		ANN-1	0,0159	0,0157	0,0775
ANN-2	0,0124	0,0123	0,0755	0,0750	
ANN-3	0,0124	0,0124	0,0754	0,0753	

**Анализ полученных результатов и выводы**

С точки зрения производительности, ANN-2 и ANN-3 показали лучшие результаты.

Из табл. 2 видно, что ошибки MSE и MAE для обучающих и валидационных наборов были ниже для этих сетей по сравнению с ANN-1, но не намного. С точки зрения индивидуального MAE для размеров каждого устройства результаты были очень схожи во всех ANN, с небольшим преимуществом для ANN-1.

Наблюдая за данными в табл. 2, можно сделать вывод о том, что ANN-1 может исследовать новые спецификации, но генерирует большую вариабельность и худшие конструкции при отборе проб. ANN-2 и ANN-3 являются более стабильными, с их помощью можно получить более оптимальные конструктивные параметры аналоговых интегральных схем. ANN-2 показывает больше ограничений при загрузке и анализе новых спецификаций. ANN-3, поскольку использовал данные для обучения из ANN-1, более гибок к новым спецификациям, но все же уступает по производительности ANN-1.

При анализе полученных результатов можно сделать однозначный вывод о том, что ANN оказали себя, как очень гибкие модели, способные выполнять расчет топологии аналоговых интегральных схем. Данная методика показала себя достаточно эффективной в пре-

одолении высокой нелинейности такого рода задач и может использоваться конструкторами на практике. Применение такого подхода позволяет существенно сократить время проектирования (в отдельных задачах в 6 и более раз) и предоставить более широкий инструментарий средств автоматизации проектирования аналоговых интегральных схем.

#### Литература

1. Lourenço N., Martins R. and Horta N. Automatic Analog IC Sizing and Optimization Constrained with PVT Corners and Layout Effects, 2017.
2. Jordan M.I. and Mitchell T.M. Machine Learning: Trends, Perspectives and Prospects // Science. 2015. Vol. 349. Pp. 255-260.
3. Декодирование линейных блоковых кодов с использованием нейронных сетей на основе перцептронных высокого порядка / Н.В. Астахов, А.В. Башкиров, А.В. Муратов, М.В. Хорошайлова, Н.В. Ципина // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2020. Т. 16. № 3. С. 87-94.
4. Higham C.F. and Higham D.J. Deep Learning: An Introduction for Applied Mathematicians, 2018.
5. Частотно-временной анализ нестационарных сигналов методами вейвлет-преобразования и оконного преобразования Фурье / Н.В. Астахов, А.В. Башкиров, О.Е. Журилова, О.Ю. Макаров // Радиотехника. 2019. Т. 83. № 6 (8). С. 109-112.

Поступила 21.12.2020; принята к публикации 18.02.2021

#### Информация об авторах

**Башкиров Алексей Викторович** – д-р техн. наук, заведующий кафедрой конструирования и производства радиоаппаратуры, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), e-mail: fabi7@mail.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0939-722X>

**Астахов Николай Владимирович** – канд. техн. наук, доцент кафедры конструирования и производства радиоаппаратуры, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), e-mail: fabi7@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/> <https://orcid.org/0000-0001-7156-8574>

**Ципина Наталья Викторовна** – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), e-mail: kivr@vorstu.ru

**Антиликаторов Александр Борисович** – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), e-mail: kivr@vorstu.ru

**Демикова Алеся Сергеевна** – магистр, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), e-mail: kivr@vorstu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2948-3240>

## USING MACHINE LEARNING TO CALIBRATE ANALOG MICROCIRCUITS

**A.V. Bashkirov, N.V. Astakhov, N.V. Tzipina, A.B. Antilikatorov, A.S. Demikhova**

**Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia**

**Abstract:** we propose one of the machine learning methods that can be used to develop a neural network that predicts the dimensions of the elements of an analog integrated circuit using the example of two amplifiers, while taking into account their intended target characteristics. This scientific work shows that a properly trained neural network is able to learn design patterns and generate calibration schemes that are adequate and suitable for the requirements of the specifications, including those that were not contained in the training data. We present three options for organizing a neural network, based on the analysis of which it was concluded that neural networks showed themselves to be very flexible models capable of calculating the topology of analog integrated circuits. The method proposed in this work showed itself to be quite effective in overcoming the high non-linearity of topology calculation problems and can be used by designers in practice. The use of this approach allows one to sig-

nificantly reduce the design time (in individual tasks by 6 or more times) and provide a wider toolkit for the design automation of analog integrated circuits

**Key words:** operational amplifier design, machine learning, integrated circuit topology, analog integrated circuit design, deep learning of neural networks

#### References

1. Lourenço N., Martins R., Horta N. “Automatic analog IC sizing and optimization constrained with PVT corners and layout effects”, 2017.
2. Jordan M.I., Mitchell T.M. “Machine learning: trends, perspectives and prospects,” *Science*, 2015, vol. 349, pp. 255-260.
3. Astakhov N.V., Bashkirov A.V., Muratov A.V., Khoroshailova M.V., Tsipina N.V. “Decoding linear block codes using neural networks based on high-order perceptrons”, *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2020, vol. 16, no. 3, pp. 87-94.
4. Higham C.F., Higham D.J. “Deep learning: an introduction for applied mathematicians”, 2018.
5. Astakhov N.V., Bashkirov A.V., Zhurilova O.E., Makarov O.Yu. “Time-frequency analysis of non-stationary signals by methods of wavelet transform and window Fourier transform”, *Radio Engineering (Radiotekhnika)*, 2019, vol. 83, no. 6 (8), pp. 109-112.

Submitted 21.12.2020; revised 18.02.2021

#### Information about the authors

**Aleksey V. Bashkirov**, Dr. Sc. (Technical), Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: fabi7@mail.ru

**Nikolay V. Astakhov**, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: kokakoller@gmail.com

**Natal'ya V. Tsipina**, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: kivr@vorstu.ru

**Aleksandr B. Antilikatorov**, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: kivr@vorstu.ru

**Alesya S. Demikhova**, MA, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: kivr@vorstu.ru

## МИНИМИЗАЦИЯ ЭФФЕКТИВНОЙ ПЛОЩАДИ РАССЕЯНИЯ С ПОМОЩЬЮ ИЗМЕНЕНИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ МАГНИТНОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ

А.В. Володько<sup>1,2</sup>, С.М. Фёдоров<sup>1,2</sup>, Е.А. Ищенко<sup>1</sup>, М.А. Сиваш<sup>1</sup>, Л.В. Сопина<sup>1</sup>, А.В. Бунина<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

<sup>2</sup>Международный институт компьютерных технологий, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** исследуется зависимость эффективной площади рассеяния (ЭПР) от относительной магнитной проницаемости материала, из которого изготавливается структура. В качестве тела моделирования был выбран шар, который изготовлен из диэлектрического материала, у которого возможно выполнять изменение относительной магнитной проницаемости. По полученным результатам моделирования построены графики зависимости максимального значения моноэлектрической ЭПР от частоты, а также от относительной магнитной проницаемости среды. Было показано, что с увеличением относительной магнитной проницаемости материала изготовления происходит увеличение значения ЭПР объекта, а также обнаружена зависимость эффективной площади рассеяния от соотношения размеров шара и длиной волны, так при превышении порогового значения, после которого шар становится крупным объектом, ЭПР резко возрастает. По результатам исследования был построен график зависимости эффективной площади рассеяния шара от относительной магнитной проницаемости материала изготовления. Доказана возможность применения материала с частотозависимой относительной магнитной проницаемостью в качестве стелс-покрытия. В статье содержится исследуемая модель, графики полученных результатов, по которым можно легко определить зависимость ЭПР от частоты и от относительной магнитной проницаемости материала изготовления

**Ключевые слова:** эффективная площадь рассеяния шара, моноэлектрическая ЭПР, относительная магнитная проницаемость среды

### Введение

Диэлектрические материалы описываются двумя параметрами, которые оказывают важное влияние на поведение электромагнитных волн: диэлектрической и магнитной проницаемостью. Причем применение материалов с различными значениями диэлектрической проницаемости с целью уменьшения эффективной площади рассеяния изучено достаточно подробно, так разработаны материалы, у которых диэлектрическая проницаемость изменяется в зависимости от частоты падающего облучения.

Однако исследование влияния относительной магнитной проницаемости среды на ЭПР структуры является малоизученным, что потенциально может позволить добиться большого выигрыша в значениях эффективной площади рассеяния.

### Математические выражения для расчета ЭПР шара

Для расчета ЭПР шара в [1, 2] описываются выражения для следующих случаев:

1. Крупный шар, радиус которого значительно превышает длину волны:

$$\sigma = \pi r^2, \quad (1)$$

где  $\sigma$  – эффективная площадь рассеяния объекта, м<sup>2</sup>;

$r$  – радиус шара, м.

2. Малый шар, при условии, что его радиус много меньше длины волны, материал изготовления – проводник (формула Ми):

$$\sigma = \pi \left( \frac{m-1}{m+2} \right)^2 \cdot \frac{(2r)^6}{\lambda^4}, \quad (2)$$

где  $\sigma$  – эффективная площадь рассеяния объекта, м<sup>2</sup>;

$r$  – радиус шара, м;

$m$  – комплексный показатель преломления;

$\lambda$  – длина волны, м.

3. Малый шар, который выполнен из диэлектрического материала:

$$\sigma = \pi \cdot \left( \frac{\sqrt{\varepsilon}-1}{\sqrt{\varepsilon}+1} \right)^2 \cdot r^2, \quad (3)$$

где  $\sigma$  – эффективная площадь рассеяния объекта, м<sup>2</sup>;

$r$  – радиус шара, м;

$\varepsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость.

Однако, как видно по приведенным выражениям, в источниках отсутствуют формулы для расчета ЭПР шара (сферы) с отличными от 1 значениями относительной проницаемости. Поэтому воспользуемся моделированием ЭПР в специализированном программном обеспечении.

### Моделирование зависимости эффективной площади рассеяния шара от относительной магнитной проницаемости

Для выполнения моделирования был выбран случай, когда плоская волна падает под прямым углом на шар, выполненный из диэлектрического материала, у которого можно изменять относительную магнитную проницаемость в любых пределах.

Частоты падающей плоской волны от 2 до 20 ГГц, радиус шара 3.7 мм. Для определения влияния относительной магнитной проницаемости на значение ЭПР данный параметр варьировался от 1 до 20, при этом относительная диэлектрическая проницаемость оставалась равной 1. Рассматриваемые в процессе моделирования структура и падающая волна приведены на рис. 1.

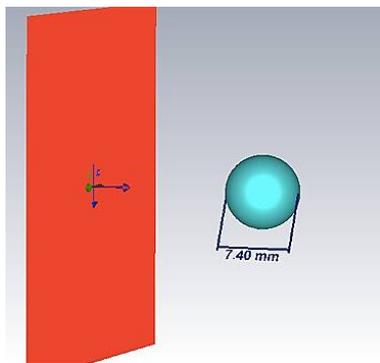


Рис. 1. Моделируемая ситуация

Для оптимального анализа результатов моделирования были построены графики зависимости моностатической ЭПР от частоты, причем значения эффективной площади рассеяния выражались в мм<sup>2</sup>. Для удобства анализа полученных зависимостей произведем группировку результатов по значениям относительной магнитной проницаемости на 3 группы:

- 1)  $\mu = 1 \dots 7$  (рис. 2);
- 2)  $\mu = 8 \dots 14$  (рис. 3);
- 3)  $\mu = 15 \dots 20$  (рис. 4);

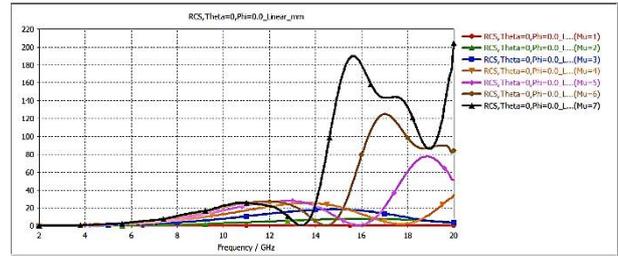


Рис. 2. Максимальные значения моностатической ЭПР,  $\mu = 1 \dots 7$

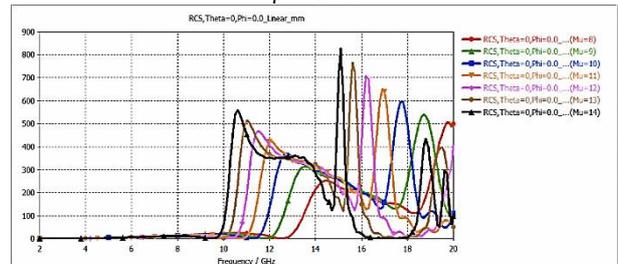


Рис. 3. Максимальные значения моностатической ЭПР,  $\mu = 8 \dots 14$

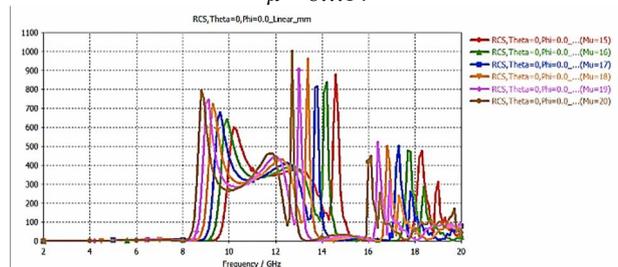


Рис. 4. Максимальные значения моностатической ЭПР,  $\mu = 15 \dots 20$

По полученным зависимостям можно сделать вывод, что в частотном диапазоне от 2 до 8 ГГц наблюдается «зона скрытности», то есть ЭПР имеет малый уровень, не превышая 13 мм<sup>2</sup>, максимальное значение на частоте 8 ГГц достигается при  $\mu = 11$ , при этом  $\sigma = 12.65$  мм<sup>2</sup>. Малый уровень ЭПР в данном частотном диапазоне вызван тем, что длина волны превышает радиус шара в 10 раз, что соответствует условию малого объекта ( $\lambda \gg r$ ). После прохождения данной точки моделирования наблюдается рост ЭПР, причем, чем больше значение относительной магнитной проницаемости, тем более резко происходит изменение эффективной площади рассеяния. После чего происходит плавное снижение уровня ЭПР до уровня 417 мм<sup>2</sup>, после чего возникают резкие всплески уровней моностатической ЭПР, причем, чем больше относительная магнитная проницаемость, тем на более низкой частоте наблюдается данная картина. Для удобства анализа максимальных значений ЭПР была сформирована таблица, на основе которой был построен график зависимости максимальных значений ЭПР

относительно магнитной проницаемости материала изготовления (рис. 5).

В таблице не указывается ситуация, когда  $\mu = 1$ , так как при таком случае возникает ситу-

ация прозрачного материала, а соответственно, и отсутствуют отражения.

Зависимость максимальных значений моностатической ЭПР от относительной магнитной проницаемости материала изготовления

$\mu$	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$\sigma$ , мм <sup>2</sup>	8	18	35	78	125	205	507	540	595	651	706	766	828	879	839	816	963	902	1005
$f$ , ГГц	16	15	20	19	17	20	20	19	18	17	16	16	15	15	14	14	13	13	13

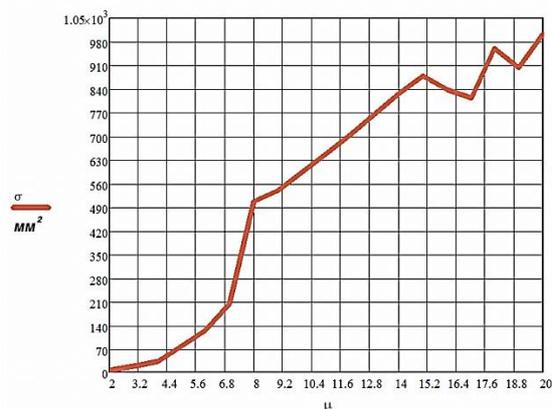


Рис. 5. Зависимость максимального значения моностатической ЭПР от относительной магнитной проницаемости материала изготовления

По полученному графику видно, что присутствует тенденция на увеличение максимального значения ЭПР с увеличением значения относительной магнитной проницаемости.

### Заключение

В ходе исследования было установлено, что с увеличением магнитной проницаемости среды наблюдается увеличение максимального значения моностатической ЭПР шара. При этом при построении графика зависимости ЭПР от частоты отчетливо видно влияние относительных размеров сферы и длины волны.

По полученным результатам можно судить, что применение материалов с частотозависимым показателем относительной магнитной проницаемости позволяет понизить эффективную площадь рассеяния объекта.

### Литература

1. Павельев В.А., Хаминев Д.В. Рассеяние электромагнитных волн миллиметрового диапазона природными и антропогенными объектами. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. 277 с.
2. Rajyalakshmi P., Raju G.S.N. Characteristics of Radar Cross Section with Different Objects // International Journal of Electronics and Communication Engineering. 2011. Vol. 4. No. 2. Pp. 205-216.

Поступила 30.11.2020; принята к публикации 16.02.2021

### Информация об авторах

**Володько Александр Владиславович** – канд. техн. наук, доцент кафедры радиоэлектронных устройств и систем, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84); доцент кафедры информационной безопасности и систем связи, Международный институт компьютерных технологий (394026, Россия, г. Воронеж, ул. Солнечная, д. 29 б), тел. +7(473)221-00-69, e-mail: zavlabvgtu@mail.ru

**Фёдоров Сергей Михайлович** – канд. техн. наук, доцент кафедры радиоэлектронных устройств и систем, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84); доцент кафедры информационной безопасности и систем связи, Международный институт компьютерных технологий (394026, Россия, г. Воронеж, ул. Солнечная, д. 29 б), тел. +7(473)221-00-69, e-mail: fedorov\_sm@mail.ru

**Ищенко Евгений Алексеевич** – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), тел. +7(473)243-77-29, e-mail: kursk1998@yandex.ru

**Сиваш Михаил Александрович** – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), тел. +7(473)243-77-29, e-mail: sivmikka@yandex.ru

**Сопина Лилия Вячеславовна** – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), тел. +7(473)243-77-29, e-mail: sopina1803@gmail.com

**Бунина Алина Владимировна** – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), тел. +7(473)243-77-29, e-mail: Alina.bunina@list.ru

**MINIMIZING THE EFFECTIVE AREA OF SCATTERING BY MEANS OF CHANGING THE RELATIVE MAGNETIC PERMEABILITY****A.V. Volod'ko<sup>1,2</sup>, S.M. Fyedorov<sup>1,2</sup>, E.A. Ishchenko<sup>1</sup>, M.A. Sivash<sup>1</sup>, L.V. Sopina<sup>1</sup>, A.V. Bunina<sup>1</sup>**<sup>1</sup>**Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia**<sup>2</sup>**International Institute of Computer Technologies, Voronezh, Russia**

**Abstract:** the article investigates the dependence of the effective scattering area (ESA) on the relative magnetic permeability of the material from which the structure is made. We chose a sphere as the modeling body, which is made of a dielectric material, in which it is possible to change the relative magnetic permeability. Based on the obtained simulation results, graphs of the dependence of the maximum value of monostatic ESA on frequency, as well as on the relative magnetic permeability of the medium, were constructed. It was shown that with an increase in the relative magnetic permeability of the material of manufacture, an increase in the value of the ESA of the object occurs, and the dependence of the effective scattering area on the ratio of the size of the ball and the wavelength was found, so when the threshold value is exceeded, after which the ball becomes a large object, ESA rises sharply. Based on the results of the study, a graph of the dependence of the effective scattering area of the sphere on the relative magnetic permeability of the material of manufacture was built. The possibility of using a material with a frequency-dependent relative magnetic permeability as a stealth coating was proven. The article contains the investigated model, graphs of the results obtained, by which it is easy to determine the dependence of the ESA on the frequency and on the relative magnetic permeability of the material of manufacture

**Key words:** effective scattering area of a ball, monostatic ESA, relative magnetic permeability of the medium

**References**

1. Pavelev V.A. Khaminov D.V. "Scattering of millimeter-wave electromagnetic waves by natural and man-made objects" ("Rasseyanie elektro-magnitnykh voln millimetrovogo diapazona prirodnymi i antropogennymi ob'yektami"), Moscow, Publishing House of Bauman MSTU, 2009, 267 p.
2. Rajyalakshmi P., Raju G.S.N. "Characteristics of radar cross section with different objects", *International Journal of Electronics and Communication Engineering*, 2011, vol. 4, no. 2, pp. 205-216.

Submitted 30.11.2020; revised 16.02.2021

**Information about the authors**

**Aleksandr V. Volod'ko**, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), International Institute of Computer Technologies (29 b Solnechnaya str., Voronezh 394026, Russia), tel.: +7(473)221-00-69, e-mail: zavlabvgtu@mail.ru

**Sergey M. Fyedorov**, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), International Institute of Computer Technologies (29 b Solnechnaya str., Voronezh 394026, Russia), tel.: +7(473)221-00-69, e-mail: fedorov\_sm@mail.ru

**Evgeniy A. Ishchenko**, student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel.: +7 (473)243-77-29, e-mail: kursk1998@yandex.ru

**Mikhail A. Sivash**, student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel.: +7 (473)243-77-29, e-mail: sivmikha@yandex.ru

**Liliya V. Sopina**, student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel.: +7 (473)243-77-29, e-mail: sopina1803@gmail.com

**Alina V. Bunina**, student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel.: +7 (473)243-77-29, e-mail: Alina.bunina@list.ru

## *Машиностроение и машиноведение*

DOI 10.36622/VSTU.2021.17.1.014

УДК 621.9.047

### ТЕХНОЛОГИЯ КОМБИНИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ КАНАЛОВ ПО МНОГОСЛОЙНЫМ ШАБЛОНАМ

**А.В. Щеднов, В.П. Смоленцев, Н.С. Поташникова**

**Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия**

**Аннотация:** рассмотрена технология изготовления дополнительных элементов систем охлаждения ракетных двигателей в форме местных углублений, расположенных на имеющихся фрезерованных каналах на наружных поверхностях камер сгорания и реактивного сопла. Такая проблема требует решения в перспективных изделиях с повышенной теплонапряженностью зоны горения топлива. Проведен анализ конструкции и возможностей обработки дополнительных элементов охлаждения в донной части и на боковых поверхностях узких каналов с ограниченным доступом инструмента в зону удаления припуска. Изучены новые конструкции инструмента для комбинированной обработки с использованием шаблонов различной конструкции и обоснована возможность их использования для изготовления углублений в каналах. Предложены новые способы комбинированной локальной обработки углублений с несимметричной геометрией сечения, форма которых обоснована в процессе отработки технологичности конструкции создаваемых двигателей, что ранее считалось неосуществимым или чрезмерно трудоемким. Исследована возможность многоместной обработки локальных углублений для дополнительного охлаждения в каналах на участках с переменным профилем камер сгорания современных и перспективных изделий по многослойным шаблонам. Здесь разработанные комбинированные технологии дают наибольший эффект и способствуют повышению ресурса двигателей новых поколений до уровня, обеспечивающего многократное увеличение количества безотказных пусков космических систем, что значительно снижает затраты на изготовление ракетных двигателей новых поколений

**Ключевые слова:** двигатели, охлаждение, комбинированная технология, многослойные шаблоны, многоместная обработка, ресурс

#### **Введение**

Необходимость в интенсификации охлаждения камер сгорания и реактивного сопла обострилась в период создания ракетных водородно-кислородных двигателей с большой тягой. Для этого на отечественных предприятиях были созданы новые системы охлаждения, в основном жидким водородом, прокачиваемым по продольным каналам через фрезерованные узкие пазы на наружной поверхности камеры сгорания и реактивного сопла. Здесь охлаждающий компонент переходит в газожидкостную смесь и возникает возможность перекрытия охлаждающего канала газовой составляющей среды. Были сделаны попытки изготовить внутри каналов локальные углубления, позволяющие повысить площадь охлаждающей поверхности и обеспечить отрыв потока от стенки канала до его перекрытия газом. В работе [1] была доказана возможность получения единичных углублений, в основном на донной поверхности каналов, в деталях с плоской и цилиндрической поверхностью детали без значительных изменений геометрии, свойственных камерам сгорания. Однако этих результатов оказалось недо-

статочно для заметного снижения теплонапряженности горячей зоны и освоения низкотемпературного серийного производства изделий.

#### **Объект исследования**

На рис. 1 приведена горячая зона ракетного двигателя, включающая размещенную в корпусе 1 камеру сгорания 3 и реактивное сопло 4. Топливо перед сгоранием поступает через патрубков (б) по каналам на поверхности реактивного сопла 4 и камеры сгорания 3 к смесительной головке 2 с поясом завесы (б), оказывающей эффективное локальное охлаждение зоны горения, но весьма трудоемкой при изготовлении и снижающей прочностные характеристики деталей. Консольное крепление (в) корпуса 1 вызывает вибрацию системы, что может положительно сказываться на течении охладителя по каналам.

На ряде изделий каналы имеют прямоугольную форму в виде узкого паза (рис. 2) с размерами, приведенными в таблице. Здесь представлены размеры применяемых в изделиях охлаждающих каналов: ширины  $H_1$ ; толщины ребер между боковыми стенками паза  $H_2$ ; глубины  $B$ .

На рис. 2 R – наружный радиус детали. В донной части канала на рис. 2 показано расположение местного углубления для дополнительного охлаждения детали, геометрия которого обоснована в [1] для опытных изделий.

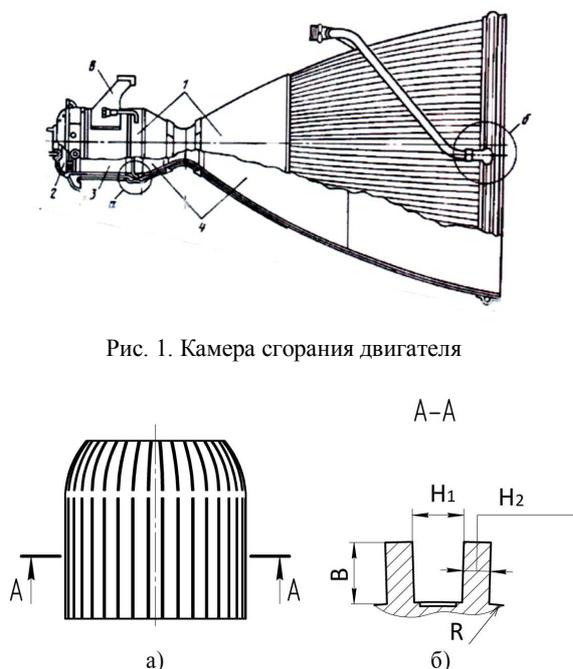


Рис. 1. Камера сгорания двигателя

Рис. 2. Типовое сечение охлаждающего канала

Размеры фрезерованных охлаждающих каналов

H <sub>1</sub>		H <sub>2</sub>		B	
min	max	min	max	min	max
0,9	1,5	0,8	1,5	1,0	7

Каналы (таблица) обычно выполняют фрезерованием дисковыми фрезами и на долбежных станках (последнее используют в ряде случаев для обработки мест сопряжения каналов).

Анализ рис. 2 и таблицы показывает, что доступ металлорежущего инструмента в каналы ограничен, усложняется с уменьшением ширины паза и возрастанием его глубины, что ограничивает возможности получения дополнительных охладителей в канале, особенно на боковой стенке ребра. Задача еще более усложняется при изготовлении пазов на переходных участках камеры сгорания и реактивного сопла, где между участком с уклоном (сфера) и цилиндрической частью требуется получить плавное сопряжение каналов, например в месте расположения пояса завесы на рис. 1. Эту операцию приходится выполнять трудоемким долблением или исключать ее из технологического процесса путем увеличения кольцевой проточки под завесу на ширину, достаточную

для сопряжения пазов каналов. С повышением размеров паза (таблица) подход инструмента упрощается, но снижается площадь теплообмена и ухудшается эффективность охлаждения камеры сгорания и реактивного сопла. Обычно при достаточной глубине канала дополнительные охладители не требуются, хотя глубокие пазы могут нарушать прочностные характеристики деталей.

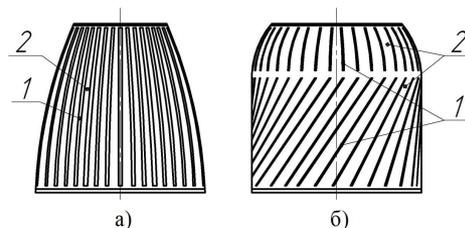


Рис. 3. Типовые каналы охлаждения под нанесение дополнительных охладителей

Изготовление углублений на донной части и особенно на ребрах у боковых стенок канала становится не рентабельным при традиционных методах обработки, особенно если каналы имеют переменный профиль и ось, отличающуюся от линейной (рис. 3). Реактивное сопло (рис. 3,а) может иметь сферическую форму, что усложняет изготовление дополнительных охладителей особенно на донной части каналов, т.к. здесь сложно обеспечить требуемые сопряжения переходных элементов. Иногда целесообразно на поверхности одной детали выполнять сопряженные каналы различного сечения и направления оси (рис. 3,б), что также усложняет интенсификацию охлаждения и изготовление локальных углублений. В ряде случаев дополнительные охладители выполняют только на камере сгорания и планируют применять в перспективных изделиях. В местах сопряжения участков (рис. 3, а) камеры сгорания (зона подачи топлива через пояс завесы) происходит локальное охлаждение канала и дополнительные охладители не требуются, но при этом следует учитывать, что групповое изготовление поясов дополнительных охладителей по многослойным шаблонам на порядок проще, быстрее и дешевле по сравнению с созданием поясов завесы, особенно на участках ребер с ограниченным доступом инструмента в зону обработки.

#### Технологичность каналов для нанесения дополнительных охладителей

Проведенный анализ (рис. 1, 2, 3) дал возможность классифицировать каналы по слож-

ности нанесения на них дополнительных охладителей, что позволяет отработать производственную технологичность, т.е. обосновать выбор наиболее эффективных и малозатратных способов и инструментов для получения углублений на донной и на боковых поверхностях охлаждающих каналов. Из рис. 2 и таблицы видно, что доступ металлорежущего инструмента в каналы ограничен и все более усложняется с уменьшением ширины паза а также с возрастанием его глубины, что ограничивает возможности получения углублений дополнительных охладителей в канале с минимальными затратами на эту операцию. Задача еще более усложняется при необходимости изготовления углублений в каналах на переходных участках деталей (критическое сечение реактивного сопла на рис. 1), где между участком с сужением (дозвуковая часть) и сверхзвуковой частью сопла требуется получить плавное сопряжение каналов несколькими радиусами малых размеров. Эту операцию приходится выполнять трудоемким долблением или исключать в этом месте изготовление требуемых дополнительных охладителей. Для камер сгорания большего диаметра подвод любого вида инструмента к переходным участкам облегчается, но из-за сложной геометрической формы этой зоны возрастает стоимость инструмента, усложняется его конструкция (например, многослойных шаблонов) и базирование при настройке параметров технологической операции. Обычно на реактивном сопле при достаточной глубине каналов дополнительные охладители не выполняют. Эффективные для охлаждения глубокие каналы с дополнительными охладителями не всегда делают не только из-за больших трудозатрат, но и из-за опасения нарушить прочностные характеристики деталей. Однако в перспективных изделиях такие элементы предусматриваются и для реактивных сопел. Для них (рис. 3,а) при изготовлении углублений дополнительных охладителей наиболее целесообразно использование комбинированной обработки с наложением поля с применением многослойных шаблонов, предложенных в изобретениях [2-4], выполненных с участием авторов.

Камера сгорания (рис. 1, 3) может иметь цилиндрическую форму и здесь комбинированный метод имеет несомненные преимущества за счет использования недорогого доступного инструмента с гибким шаблоном.

Наибольшую сложность представляет изготовление углублений на участке критического сечения сопла между сужением (дозвуковая

часть) и расширяющемся концом детали (сверхзвуковой отрезок на рис. 1), где для повышения теплозащиты и ресурса камеры сгорания и реактивного сопла на внутреннюю поверхность деталей наносят минералокерамическое покрытие [5] с последующей обработкой [6] для устранения торможения струи горения и перегрева стенки. Здесь (рис. 1) наиболее необходимо дополнительное охлаждение в каналах, хотя его изготовление требует разработки новых способов, из которых наиболее перспективным является использование многослойных шаблонов [2; 3], предлагаемых в статье.

Приведенная в [1] информация позволяет утверждать, что дополнительные охладители необходимы в основном на камере сгорания, хотя для создаваемых двигателей новых поколений такие устройства могут потребоваться на поверхности реактивного сопла и в зоне работы форсунок на огневом диске.

#### Обоснование геометрической формы дополнительных охладителей

В [1] приведены исследования, позволяющие проектировать геометрию дополнительных охладителей, часть которых представлена на рис. 4, где показан профиль каналов, используемых на моделях при экспериментальных исследованиях.

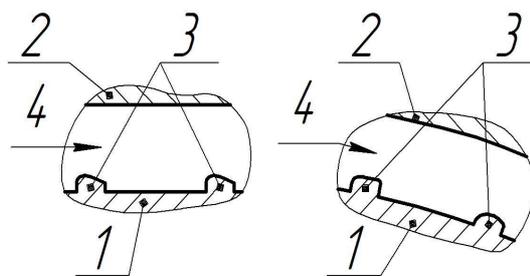


Рис. 4. Профиль каналов для нанесения дополнительных охладителей

Результаты, полученные в процессе обработки технологичности с учетом технологических возможностей комбинированных методов обработки на тот период исследований, послужили основанием для использования симметричных конструкций углублений, представленных на рис. 4. Пролитка каналов с такими дополнительными охладителями (рис. 5) показала, что в донной части углублений образуются вихри, которые способствуют интенсификации теплообмена, но приводят к образованию газовых пробок на выходе газожидкостной смеси из

зоны углубления ввиду формирования нежелательного второго вихря на выходе потока смеси из углубления (рис. 6), вызывающего торможение течения и срыв потока.

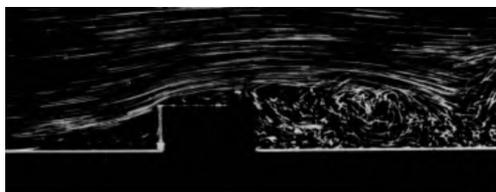


Рис. 5. Форма потока жидкости в районе углубления дополнительного охладителя

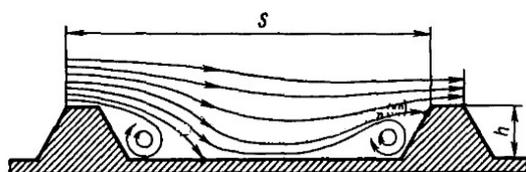


Рис. 6. Схема обтекания дополнительных охладителей потоком жидкости

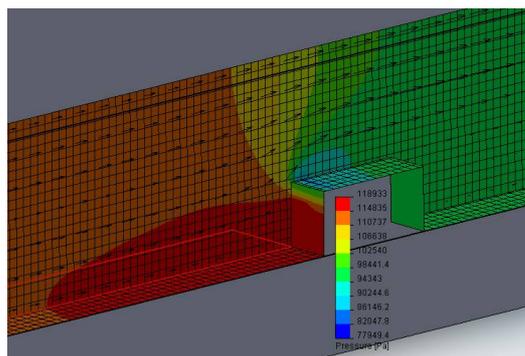


Рис. 7. Имитатор для исследования параметров в углублении дополнительного охладителя

На рис. 7 приведен имитатор [1] для измерения параметров в канале (давления, степени газонаполнения и др.). Процесс изучается через прозрачное стекло по шкале типа приведенной на рис. 7. Для этого от внешнего источника в зазор подают жидкость (чаще водный раствор соли) и воздух с регулируемым давлением, создающий слои жидкости, газа и их смеси. При съемках хорошо видна граница между фазами газожидкостной среды, что позволяет экспериментально оценить процент газонаполнения канала. Моделирование проводилось методом оценки конечных объемов газовой фазы. Это позволяет установить появление в передней части паза (со стороны подачи потока) участка низкого давления, формирующего так называемый насосный эффект, вызывающий приток среды из менее нагретых слоев жидкой фазы,

что препятствует запиранию потока в канале и прекращению охлаждения через этот паз.



а



б



в

Рис. 8. Динамика образования газовой перемычки в узком канале газожидкостной смесью

На рис. 8 приведены кадры скоростной съемки [7] динамики нарастания газовой составляющей в пространстве между стенками канала длиной более 30 мм, шириной 0,9 мм с прокачкой газожидкостной смеси при давлении 0,15 МПа. Размеры канала (таблица): ширина 1,0 мм, глубина 2,5 мм, средняя скорость прокачки среды 10 мм/с. Темная часть кадра показывает жидкую фазу, светлая - газовую, которая образуется на границе с горячей поверхностью камеры сгорания или сопла. В начале канала (рис. 8,а) газ имеет форму отдельных пузырей и не оказывает значительного торможения

ния потока. Далее (б) газ заполняет большую часть пространства в канале и уплотняется, что приводит к торможению потока. Затем (в) происходит перекрытие газом канала, прекращение течения потока через рассматриваемый канал и перегрев детали, что недопустимо. Условия течения охлаждающей среды на изделии могут отличаться от принятых при моделировании, но они достаточно убедительно подтверждают качественную картину запираания потока газовой составляющей охлаждающей среды, характеризуют начальные и граничные условия при моделировании течения смеси в охлаждающем канале и подтверждают рекомендации по выбору размеров углублений.

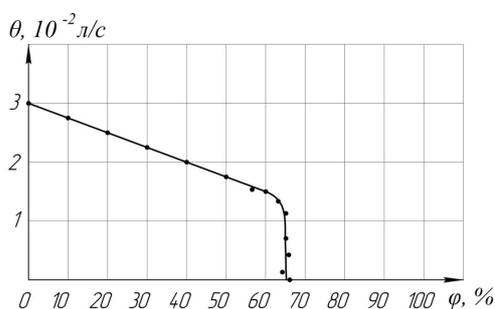


Рис. 9. Изменение расхода охлаждающей среды от степени газонаполнения канала

На рис. 9 приведены результаты экспериментальных исследований по изменению расхода ( $\Theta$ ) среды от степени газонаполнения ( $\phi$ ), которая оценивается по соотношению объемов газовой фазы и охлаждающей среды ( $v$  %), что позволяет дать объективную качественную и количественную оценку эффективности дополнительного охлаждения, а также установить длину канала до его перекрытия, после которого требуется подача свежей охлаждающей среды, например через пояс завесы (рис. 1). Эксперименты на рис. 9 показали, что при объемном газонаполнении 60-67 % происходит потеря устойчивости течения и резкое перекрытие (запираание) канала. Это позволяет обосновать предельную длину каждого охлаждаемого участка паза с учетом конструкции и условий работы конкретной системы охлаждения. Такой параметр необходимо обосновывать при отработке технологичности камеры сгорания и реактивного сопла.

Анализ рис. 6 показывает, что наличие сколов на боковых поверхностях выступов между углублениями не устраняет возможности образования вихрей, первый из которых по течению потока способствует отрыву газожид-

костной струи от горячей стенки детали и снижает возможность закупорки канала охлаждения. Но второй вихрь (рис. 6) тормозит течение, поэтому желательно сделать выход из углубления плавным с гладким сопряжением с элементами канала. Это стало возможным при использовании многослойных шаблонов, изготовленных по предложенному авторами способу [2].

В [7] приведены результаты скоростной съемки течения газожидкостных сред через узкие зазоры, размеры которых аналогичны каналам для охлаждения.

Ширина углубления ограничена боковыми стенками паза и установлено, что с учетом уширения этой величины относительно окна в шаблоне такой параметр составляет 0,5-0,8 его ширины. Учитывая возможность использования деталей с различной шириной каналов (рис. 3,б), целесообразно ограничить ширину углублений в донной части каналов указанным соотношением. На боковых поверхностях при высоте ребра до 2,5-3 мм этот параметр с учетом уширения составляет 0,3-0,5 от высоты. Если по высоте ребра выполняют 2 углубления, то их распределяют с шагом не более этой величины между соседними углублениями по длине с шириной не менее такого параметра в донной части канала и со смещением по потоку в таких же пределах.

В [1] показано, что оптимальным шагом между соседними углублениями (рис. 5) дополнительных охладителей в донной части канала является расстояние от 12 до 14 его глубины. При использовании многослойных шаблонов и нанесения углублений на донную и боковую поверхность канала такая глубина составляет 0,3-0,35 мм, хотя имеются сведения [2; 3] о предельной глубине 0,5 мм. Тогда расчетный шаг будет 4-5 мм. Однако этот показатель справедлив для симметричных по длине углублений со ступенчатым выходом струи (рис. 6). Для углублений дополнительного охладителя с плавным выходом потока шаг может быть увеличен до 18-20 глубин, в том числе для поверхностей ребер. Тогда шаг между соседними углублениями в донной части и на ребрах может приниматься до 6-7 мм. При этом количество углублений удастся сократить в несколько раз без ухудшения эффективности теплообмена.

Из рис. 5 можно установить длину углубления по потоку. Соотношение между их длиной и глубиной элемента дополнительного охлаждения составляет 10-12, т.е. наибольшая длина углубления должна быть около 4-5 мм, хотя при

плавном контуре на выходе струи активная зона анодного растворения углубления заметно (до 2 раз) меньше и для расчета плотности тока длину принимают в пределах 2-2,5 мм.

Рассматриваемые углубления выполняют те же функции, которые присущи поясам завесы, поэтому можно количество поясов дополнительного охлаждения размещать взамен завес, что значительно упрощает и удешевляет изготовление, особенно камер сгорания. По [1], если заменить такие завесы, которые охлаждаются трассу горения топлива до 50 мм, можно на горловине выполнять после огневого диска 1 пояс углублений на донной и боковой частях канала. Тогда при наличии завесы на цилиндрической части камеры сгорания понадобится не более 2 поясов дополнительного охлаждения по длине канала, начиная их через 40-60 мм от начала через шаг, применяемый в освоенных конструкциях изделий. Такой шаг может быть еще увеличен на сверхзвуковом участке реактивного сопла, где может быть достаточно 1-2 поясов дополнительного охлаждения, расположенных между собой на расстоянии не менее 40-60 мм по длине сопла. Возможна потребность в таком поясе в критическом сечении сопла, хотя в настоящее время подобных конструкций не известно.

Таким образом, при проектировании многослойных шаблонов по [2; 3] количество поясов дополнительного охлаждения в каналах потребуется не более 3 для камеры сгорания и в перспективе 2-3 – для реактивного сопла.

Представленные сведения позволяют моделировать влияние процесса охлаждения локальными углублениями в каналах, а также создавать методики расчета многослойных шаблонов и режимов их использования.

### Применение шаблонов для изготовления локальных углублений

Углубления с небольшой постоянной глубиной получают по однослойным диэлектрическим шаблонам при электрохимическом нанесении информации для получения глубоких знаков [8]. Однако в случае использования этих рекомендаций при обработке охлаждающих элементов в каналах требуется создание новых видов шаблонов [2-4 и др.] с использованием ранее не известных способов их изготовления и новой конструкцией устройств [9;10].

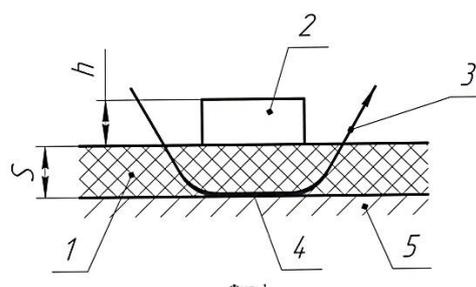


Рис. 10. Схема использования шаблона из пористого диэлектрического материала

В [9] рассматривается способ изготовления шаблона из пористого диэлектрического материала (рис. 10), имеющего толщину, равную величине межэлектродного зазора «S». Заготовка детали 5 является анодом. Ток проходит от металлического контура 2 углубления через токопроводящую жидкую рабочую среду 2, протекающую под контуром, поступает на заготовку, где происходит локальное анодное растворение материала детали и образуется углубление. Толщина «h» должна быть минимальной (0,1-0,2 мм), но достаточной для подвода технологического тока из расчета 8-10 А через площадь сечения в 1 мм<sup>2</sup>. Такие контуры целесообразно выполнять прототипированием по аддитивной технологии с использованием для покрытия меди и ее сплавов. Этот метод позволяет выполнять без диэлектрических выступов между контуром 2 и заготовкой как единичные, так и групповые углубления, применяемые в средствах локального охлаждения, но с увеличением количества углублений возрастает сопротивление протеканию жидкости через шаблон. Поэтому область эффективного использования пористого шаблона ограничена открытыми контурами на детали, например около зоны вокруг форсунки, и требует повышенного давления жидкости, что не всегда выполнимо из-за ограниченной жесткости деталей катодного устройства и шаблонов.

Развитием этого способа для обработки углублений в пазах с переменным профилем является использование метода подобия путем моделирования процесса на образцах из гибких эластичных материалов. Для этого в масштабе вырубкой или просечкой выполняют макет шаблона с нанесенным слоем контура 2, между элементами которого делают окна малой ширины (0,1-0,2 мм), достаточные для протекания рабочей среды со скоростью 1-2 м/с. Для этого давление на входе ограничивается величиной 0,12-0,15 МПа. После контроля размеров и положения окон вносят корректировку размеров

и выполняют шаблон, обеспечивающий требуемую точность одного или нескольких углублений. Однако обработка здесь ограничена плоскими поверхностями и донной частью пазов на цилиндрических участках деталей, что не всегда обеспечивает заданный тепловынос и охлаждение деталей.

В [10] разработан новый способ и инструмент с многослойным шаблоном для получения каналов с профилем углублений дополнительного охлаждения, разработанным для перспективных изделий, имеющих каналы кольцевого и винтового профиля.

Инструмент прошел проверку на имитаторах, макетах и показал возможность снизить количество перекрытий каналов, что способствует стабилизации теплоотдачи с деталей горячей зоны двигателей новых поколений и применения шаблонов в авиационной отрасли и других изделий машиностроения.

### Заключение

Проведен углубленный анализ и оценка возможностей использования многослойных шаблонов для получения групповым методом на камере сгорания и реактивном сопле элементов дополнительных охлаждений в форме локальных углублений на донной части и на боковых ребрах каналов в труднодоступных участках деталей, что ранее считалось неосуществимым. Обоснована новая геометрия углублений, которые могут быть получены с использованием вновь созданных многослойных многослойных шаблонов.

Доказана возможность применения новых способов и инструмента для повышения эффективности теплообмена в выпускаемых изделиях и раскрыты перспективы их применения в элементах дополнительного охлаждения горячей зоны создаваемых ракетных и авиационных реактивных двигателей с повышенным ресурсом, обеспечивающим многократные безотказные пуски космических систем с возвращением ступеней ракет.

Поступила 20.12.2020; принята к публикации 18.02.2021

### Информация об авторах

**Щеднов Антон Владимирович** - аспирант кафедры технологии машиностроения, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), e-mail: antonshednov@mail.ru

**Смоленцев Владислав Павлович** - д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры технологии машиностроения, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), e-mail: Vsmolen@inbox.ru

**Поташникова Наталия Сергеевна** - аспирант кафедры технологии машиностроения, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), e-mail: natser\_01@mail.ru

### Литература

1. Коровин А.А. Изготовление теплообменных профилей для изделий, работающих с газожидкостными рабочими средами: дис. ... канд. техн. наук. Воронеж, 2012. 123 с.
2. Патент 2699471 РФ. Способ изготовления и шаблон для электрохимического получения углублений в пазах охлаждающего канала детали / Смоленцев В.П., Щеднов А.В., Скрыгин О.В.; заявитель и патентообладатель: Акционерное общество "Государственный космический научно-производственный центр имени М.В. Хруничева" (АО "ГКНПЦ им. М.В. Хруничева"). № 2018123057; заявл. 25.06.2018; опубл. 05.09.2019. Бюл. изобр. № 25.
3. Патент 2573465 РФ. Способ электрохимического изготовления углублений, образующих турбулизаторы на ребрах и в донной части охлаждающих каналов теплонапряженных машин, и устройство для его осуществления / Смоленцев В.П., Мозгалин В.Л., Юхневич С.С., Коптев И.Т. заявитель и патентообладатель: ВГТУ. № 2014100320; заявл. 09.01.2014; опубл. 20.01.2016. Бюл. изобр. № 2.
4. Патент 2716387 РФ. Способ электрохимического удаления припуска с поверхности детали и устройство для его реализации / Смоленцев В.П., Скрыгин О.В., Щеднов А.В., Смоленцева Я.С.; заявитель и патентообладатель: Акционерное общество "Конструкторское бюро химавтоматики" (АО КБХА). № 2019104800; заявл. 20.02.2019; опубл. 11.03.2020. Бюл. изобр. № 8.
5. Портных А.И. Технология плазменного нанесения эрозионностойких термозащитных покрытий, обеспечивающих многократную эксплуатацию изделий: дис. ... канд. техн. наук. Воронеж, 2019. 155 с.
6. Паничев Е.В. Комбинированная чистовая обработка переходных участков металлокерамических покрытий с диэлектрическими гранулами дис. ... канд. техн. наук. Воронеж, 2020. 145 с.
7. Основы повышения точности электрохимического формообразования / Ю.Н. Петров, Г.Н. Корчагин, Г.Н. Зайдман, Б.П. Саушкин. Кишинев: Из-во «Штиинца», 1977. 152 с.
8. Смоленцев В.П., Смоленцев Г.П., Садыков З.Б. Электрохимическое маркирование деталей. М.: Машиностроение, 1983. 72 с.
9. Патент 2581538 РФ. Способ изготовления шаблона / Смоленцев В.П., Кириллов О.Н., Котуков В.И., Скрыгин О.В. заявитель и патентообладатель: ВГТУ. № 2014117428; заявл. 29.04.2014; опубл. 24.03.2016. Бюл. изобр. № 11.
10. Патент 2470749 РФ. Способ электрохимической обработки локальных участков и устройство для его использования / Коптев И.Т., Смоленцев В.П., Коровин А.А. и др. заявитель и патентообладатель: Акционерное общество "Конструкторское бюро химавтоматики" (АО КБХА). № 2011100383; заявл. 11.01.2011; опубл. 27.12.2012. Бюл. изобр. № 36.

**COMBINED CHANNEL PROCESSING TECHNOLOGY BASED ON MULTI-LAYER TEMPLATES**

**A.V. Shchednov, V.P. Smolentsev, N.S. Potashnikova**

**Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia**

**Abstract:** the article considers the technology of manufacturing additional elements of rocket engine cooling systems in the form of local recesses located on the existing milled channels on the outer surfaces of the combustion chambers and the jet nozzle. This problem requires solutions in promising products with high heat stress of the fuel combustion zone. We analyzed the design and processing capabilities of additional cooling elements in the bottom part and on the side surfaces of narrow channels with limited tool access to the allowance removal zone. We studied new tool designs for combined processing using templates of various designs and justified the possibility of their use for making recesses in channels. We propose new methods of combined local processing of recesses with an asymmetric cross-section geometry, the shape of which is justified in the process of testing the manufacturability of the design of the created engines, which was previously considered impossible or excessively labor-intensive. We investigated the possibility of multi-site processing of local recesses for additional cooling in channels in areas with a variable profile of the combustion chambers of modern and promising products using multilayer templates. Here, the developed combined technologies give the greatest effect and contribute to increasing the resource of new-generation engines to a level that provides a multiple increase in the number of trouble-free launches of space systems. This significantly reduces the cost of manufacturing new-generation rocket engines

**Key words:** engines, cooling, combined technology, multi-layer templates, multi-seat processing, resource

**References**

1. Korovin A.A. "Production of heat exchange profiles for products working with gas-liquid working media" ("Izgotovlenie teploobmennyykh profilyey dlya izdeliy, rabotayushchikh s gazozhidkostnyimi rabochimi sredami"), Cand. Tech. Sci. diss., Voronezh, VSTU, 2012, 123 p.
2. Smolentsev V.P., Shchednov A.V., Skrygin O.V. "Manufacturing method and template for electrochemical production of recesses in the grooves of the cooling channel of a part" ("Sposob izgotovleniya i shablon dlya elektrokhimicheskogo polucheniya ugluble-niy v pazakh okhlazhdayushchego kanala detali"), patent no. 2699471 of the Russian Federation, dec. 06/25/2018, publ. 09/05/2019, bul. no. 25.
3. Smolentsev V.P., Mozgalin V.L., Yukhnevich S.S., Koptev I.T. "A method for electrochemical manufacturing of recesses forming turbulators on the ribs and in the bottom part of cooling channels of heat-stressed machines, and a device for its implementation" ("Sposob elektrokhimicheskogo izgotovleniya uglublennykh obrazuyushchikh turbulizatory na rebrakh i v donnoy chasti okhlazhdayushchikh kanalov teplonapryazhennykh mashin, i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya"), patent no. 2573465 of the Russian Federation, dec.01/09/2014, publ. 20.01.2016, bul. no. 2.
4. Smolentsev V.P., Skrygin O.V., Shchednov A.V., Smolentseva Ya.S. "A method for electrochemical removal of the allowance from the surface of the part and a device for its implementation" ("Sposob elektrokhimicheskogo udaleniya pripuska s poverkhnosti detali i ustroystvo dlya ego realizatsii"), patent no. 2716387 of the Russian Federation, dec. 02/20/2019, publ. 11.03.2020, bul. no. 8
5. Portnykh A.I. "Technology of plasma application of erosion-resistant thermal protection coatings that ensure reusable operation of products" ("Tekhnologiya plazmennogo nanese-niya erozionnostoykikh termozashchitnykh pokrytiy, obespechivayushchikh mnogorazovuyu ekspluatatsiyu izdeliy"), Cand. Tech. Sci. diss., Voronezh, VSTU, 2019, 155 p.
6. Panichev E.V. "Combined finishing of transition sections of cermet coatings with dielectric granules" ("Kombinirovannaya chistovaya obrabotka perekhodnykh uchastkov metallokeramicheskikh pokrytiy s dielektricheskimi granulami"), Cand. Tech. Sci. diss., Voronezh, VSTU, 2020, 145 p.
7. Petrov Yu.N., Korchagin G.N., Zaidman G.N., Saushkin B.P. "Fundamentals of improving the accuracy of electrochemical forming" ("Osnovy povysheniya tochnosti elektrokhimicheskogo formoobrazovaniya"), Kishinev, Shtiintsa, 1977, 152 p.
8. Smolentsev V.P., Smolentsev G.P., Sadykov Z.B. "Electrochemical marking of parts" ("Elektrokhimicheskoe markirovanie detaley"), Moscow, Mashinostroenie, 1983, 72 p.
9. Smolentsev V.P., Kirillov O.N., Kotukov V.I., Skrygin O.V. "Method of template manufacturing" ("Sposob izgotovleniya shablona"), patent no. 2581538 of the Russian Federation, dec. 04/29/2014, publ. 24.03.2016, bul. no. 11.
10. Koptev I.T., V.P.Smolentsev, Korovin A.A. et al. "Method of electrochemical treatment of local areas and device for its use" ("Sposob elektrokhimicheskoy obrabotki lokal'nykh uchastkov i ustroystvo dlya ego ispol'zovaniya"), patent no. 2470749, of the Russian Federation, dec.11.01.2011, publ. 12/27/2012, bul. no. 36.

Submitted 20.12.2020; revised 18.02.2021

**Information about the authors**

**Anton V. Shchednov**, graduate student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: antonshchednov@mail.ru

**Vladislav P. Smolentsev**, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: Vsmolen@inbox.ru

**Nataliya S. Potashnikova**, graduate student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: natser\_01@mail.ru

## ОДИН ИЗ ВОЗМОЖНЫХ ПОДХОДОВ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ЧЕРВЯЧНОЙ ФРЕЗЫ ДЛЯ ОБРАБОТКИ МАЛОГО КОНУСА ЦИКЛОИДНОЙ ПЕРЕДАЧИ

В.В. Куц, А.А. Панин, Д.Н. Тютюнов, К.В. Жилина

Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Россия

**Аннотация:** предлагается краткий обзор промышленного производства червячных фрез. Показано, что повышение качества и производительности изготовления зубчатых колес является необходимым условием снижения себестоимости и расширения объемов производства зубчатых колес на отечественных предприятиях. Главным требованием, предъявляемым к зубьям данной фрезы, является то, чтобы в результате заточки по передней поверхности, которая лежит в осевой плоскости фрезы, профиль зубьев сохранялся до почти полного их износа. Поэтому особое внимание уделяется выбору кривой затылования с учётом целого ряда факторов, способствующих совершенствованию процесса обработки. Отмечено, что затылование имеет ряд преимуществ, в сравнении с острой заточкой фрез. Изложен новый подход к проектированию рабочей оснастки для обработки малых колес циклоидной передачи и исследованы теоретически допустимые интервалы изменения задних углов при затыловании. Установлено, что несмотря на преимущества циклоидальной фрезы перед другими типами затылованных фрез в скорости и точности обработки, она имеет один недостаток – довольно малый промежуток применимости на дуге циклоиды. На основе существующих подходов разработан вариант затылования зубьев червячной фрезы по циклоиде

**Ключевые слова:** применение червячных фрез, циклоидная передача, винтовое затылование

### Введение

Необходимость расширения производства зубчатых колес в различных отраслях машиностроения требует ускоренного и качественного их изготовления. Указанный процесс можно интенсифицировать путем применения операции фрезерования. Мировая статистика показывает, что в промышленности из общего состава парка оборудования фрезерные станки составляют порядка 18%, а в аэрокосмической отрасли до 50...60% станочного парка [1]. Фрезы имеют значительное преимущество перед другими видами инструментов, так как позволяют обрабатывать фасонные поверхности без сложной установки и оснастки, а также не требуют высокой квалификации станочника. С другой стороны, сам процесс фрезерования более производителен и экономичен, чем операции точения и строгания [1, 2, 5].

В последнее время их режущие части совершенствуются за счет включения материалов из металлокерамики и других сверхтвёрдых веществ. Такой подход позволяет обрабатывать стали, закаленные до твердости 60 HRC<sub>3</sub>, что помогает иногда исключить операции шлифования.

Конструктивные параметры таких фрез соответствуют показателям классов точности AA и AAA по ГОСТ 10331-81 и ГОСТ 9324-80.

Ведущие промышленные державы осуществляют масштабные инвестиции в их разработку и массовое производство довольно широкого ассортимента изделий. Подобный подход позволяет добиться значительной экономии финансовых и материальных ресурсов.

Широкое распространение получила инструментальная продукция предприятий и НИИ РФ из Кирова, Ростова–на–Дону, Урала, Сибири и т.д., а также Беларуси, Израиля, Италии, США, Германии [2],[3].

### Анализ

Выполним разработку, исследование и анализ проектируемой фрезы с затылованными зубьями. Главной особенностью этих зубьев является то, что в результате заточки по передней поверхности, которая лежит в осевой плоскости фрезы, профиль изделия сохраняется до почти полного износа фрезы. Для достижения такого эффекта зуб фрезы затылуется (обтачивается) по определенной заранее кривой. Следует отметить, что затылование имеет ряд преимуществ в сравнении с заточкой фрез: оно допускает большее число переточек, а также увеличивает пространство для размещения стружки. Следует отметить, что для затылования необходимо выбрать такую кривую, которая обеспечивает постоянство профиля изделия, у которой угол  $\mu$  между касательной и радиусом-вектором сохраняет постоянное значение или

имеет незначительные отклонения от этого значения. Соответственно, должен сохраняться постоянным и задний угол  $\alpha_B$  на вершине зуба, т.к. справедливо соотношение, рис. 1:

$$\mu + \alpha_B = \frac{\pi}{2}. \quad (1)$$

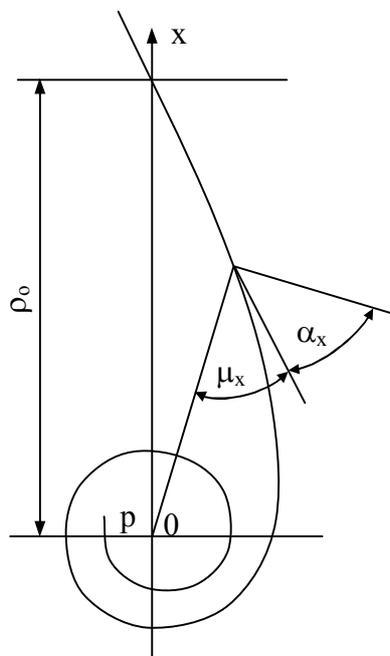


Рис. 1. Логарифмическая спираль

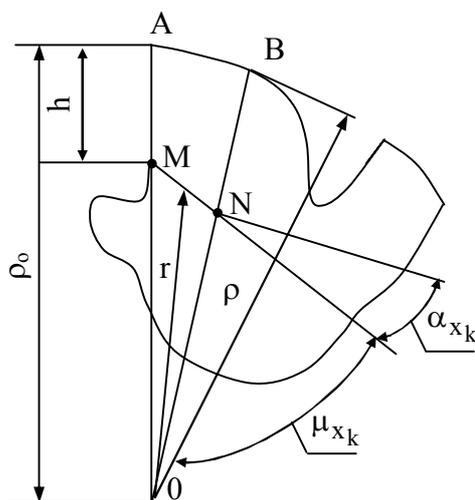


Рис. 2. Задний угол на конхоиде на логарифмической спирали

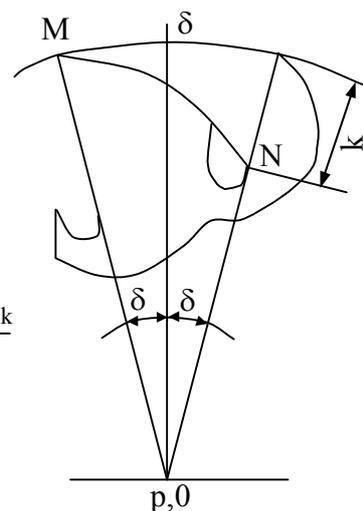


Рис. 3. Величина затылования

На примере логарифмической спирали для произвольной точки  $x$  известно:

$$\operatorname{tg} \mu_x = \frac{\rho}{\rho'_\phi}. \quad (2)$$

Используя ее полярное уравнение для точки  $x$

$$\rho_x = \rho_0 e^{n\phi_x}, \quad (3)$$

вычислим  $\rho'_\phi$  и  $\operatorname{tg} \mu_x$ , учитывая, что  $n = \text{const}$ :

$$\rho'_\phi = n\rho_0 e^{n\phi_x}, \quad \operatorname{tg} \mu_x = \frac{1}{n}. \quad (4)$$

Из соотношений (1) и (4) получим для соответствующего заднего угла условие, рис. 2:

$$\operatorname{tg} \alpha_x = \operatorname{ctg} \mu_x = n. \quad (5)$$

Из (4) и (5) следует, что логарифмическая спираль подходит для затылования фрезы.

В процессе резания высота профиля зуба фрезы  $h$  остается постоянной, т.к. сохраняется постоянство формы затыловочного резца, рис. 2.

1. Затылование по логарифмической спирали и спирали Архимеда

Наиболее часто для затылования фрез применяют логарифмическую спираль и спираль Архимеда, которые с достаточным приближением удовлетворяют перечисленным выше требованиям.

Сам факт затылования определяется величиной  $K$ , рис. 3:

$$K = \rho_M - \rho_N = \rho_0 (e^{n\delta} - e^{-n\delta}), \quad (6)$$

где  $2\delta$  – центральный угол, соответствующий угловому шагу, тогда имеем:

$$2\delta = \frac{2\pi}{Z} \quad (7)$$

или

$$\delta = \frac{\pi}{Z}, \quad (8)$$

где  $Z$  – число зубьев фрезы.

В конечном итоге после ряда преобразований выражения (6) получим:

$$K = \frac{\pi\rho_0}{Z} \operatorname{tg} \alpha_B. \quad (9)$$

Учитывая, что  $\rho_0 = D_\phi$  – диаметр фрезы, имеем:

$$K = \frac{\pi D_\phi}{Z} \operatorname{tg} \alpha_B. \quad (10)$$

Следует отметить, что соотношение (10) подходит для описания затылования и по спирали Архимеда.

Известно, что для большинства фрез справилковы следующие ограничения:

$$Z_{\min} = 6, \quad \alpha_{\min} = 15^\circ = \frac{\pi}{12}, \quad (11)$$

где  $Z_{\min}$ ,  $\alpha_{\min}$  – соответственно минимальное количество зубьев фрезы и минимальная величина ее заднего угла.

## 2. Затылование по циклоиде

Выбор кривой затылования учитывает целый ряд факторов, способствующих совершенствованию процесса обработки. К одному из них можно отнести время выполнения какой-либо операции.

Среди множества подходящих по этому критерию кривых особо выделяется брахистрохрона.

Из теории известно, что брахистрохрона – это кривая быстрого спуска среди набора всевозможных кривых, которые соединяют 2 точки А и В (рис. 4), вдоль которой катится без трения тяжелый шарик из точки А в точку В за кратчайшее время.

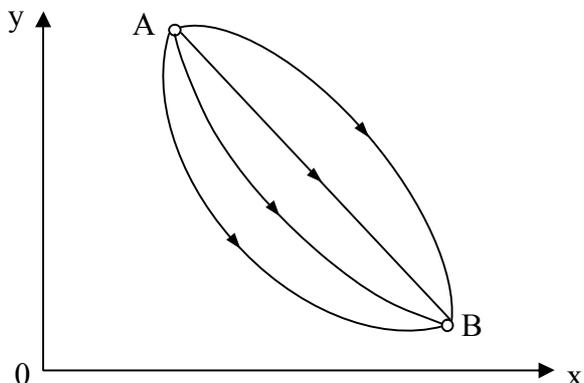


Рис. 4. Перемещение точки вдоль различных кривых

В случае, если сопротивление трению ничтожно или отсутствует, то данная кривая называется циклоидой. Циклоиду легко построить как траекторию точки, лежащей на окружности некоторого диаметра  $D_\phi$ , которая

катится вдоль прямой (ось  $Ox$ ) без скольжения,  $t$  – угол качения, пропорциональный времени движения (рис. 5). На практике уравнение циклоиды встречается в удобном для исследования параметрическом виде:

$$\begin{cases} x = D_\phi(t - \sin t), \\ y = D_\phi(1 - \cos t) \end{cases} \quad (12)$$

Выбор указанной кривой легко обосновать теоретически путем сравнения мгновенных скоростей движения точки вдоль соответствующей дуги в направлении АВ (рис. 4).

По аналогии с анализом свойств логарифмической спирали проведем исследование циклоиды в качестве кривой затылования фрезы.

Проведем построение ее графика (рис. 5) в декартовой прямоугольной системе координат, предварительно привязав полярную систему координат: полюс  $p$  – к началу координат, т.о. полярную ось  $pp$  – направим вдоль положительной полуоси  $Ox$ .

Предварительно свяжем полярный угол  $\phi$  и параметр  $t$ :

$$\operatorname{tg} \phi = \frac{y}{x} = \frac{1 - \cos t}{t - \sin t}. \quad (13)$$

Из (13) следует:

$$\phi = \operatorname{arctg} \left( \frac{1 - \cos t}{t - \sin t} \right). \quad (14)$$

Далее вычислим производную  $\phi'_t$

$$\phi'_t = \frac{d\phi}{dt} = \left( \operatorname{arctg} \frac{1 - \cos t}{t - \sin t} \right)'_t = \frac{t \sin t + 2 \cos t - 2}{t^2 + 2 - 2(t \sin t + \cos t)} \quad (15)$$

С другой стороны, для любого положения точки  $M$  на циклоиде существуют соответственно полярный угол  $\phi$  из (13) и полярный радиус  $\rho$ , определяемый соотношением:

$$\rho = \sqrt{x^2 + y^2} = D_\phi \sqrt{t^2 + 2 - 2(t \sin t + \cos t)}. \quad (16)$$

Продифференцируем  $\rho$  по  $t$ :

$$\rho'_t = \frac{d\rho}{dt} = D_\phi \left( \sqrt{t^2 + 2 - 2(t \sin t + \cos t)} \right)'_t = \frac{D_\phi (1 - \cos t)}{\sqrt{t^2 + 2 - 2(t \sin t + \cos t)}} \quad (17)$$

Вычислим  $\operatorname{tg} \mu_x$ , учитывая (16), (17):

$$\operatorname{tg}\mu_x = \frac{\rho}{\rho'_\varphi} = \frac{\rho}{\frac{d\rho}{d\varphi}} = \frac{\rho}{\frac{d\rho}{dt} \cdot \frac{dt}{d\varphi}} = \rho \frac{d\varphi}{d\rho} = \frac{1}{\operatorname{tg}\frac{t}{2}} - \frac{1}{\frac{t}{2}} \quad (18)$$

Для выполнения условия постоянства заднего угла  $\alpha_x$  при вершине зуба достаточно потребовать выполнение ограничения:

$$\operatorname{tg}\mu_x = \operatorname{const}. \quad (19)$$

Было проведено исследование значений  $\operatorname{tg}\mu_x$ ,  $\mu_x$ ,  $\alpha_x$ ,  $\varphi$  при изменении параметра  $t$  на отрезке  $[-360^\circ; 360^\circ]$ .

Из практики известно, что для большинства типов фрез  $\alpha_x$  принимает значение

$9^\circ \dots 12^\circ$ . Это позволило сузить поиск нужного интервала значений  $t$ , а соответственно – интервала для полярных углов  $\varphi$ , что дает возможность получить интервал профиля разрабатываемого инструмента.

Полученные данные занесены в таблицу. Найденный интеграл имеет вид:  $t \in [-338,58^\circ; -335^\circ] \Leftrightarrow t \in [-1,881\pi; -1,865\pi]$  (рис. 5, 6).

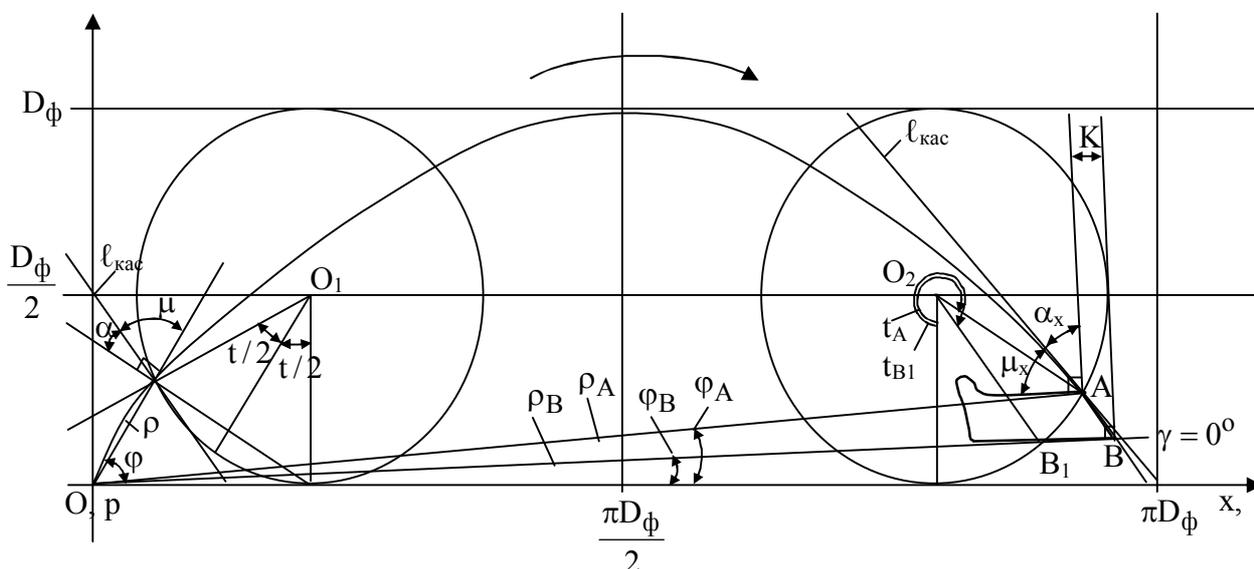


Рис. 5. Затылование по циклоиде

Зависимость  $\operatorname{tg}\mu_x$ ,  $\delta\operatorname{tg}\mu_x$ ,  $\mu_x$ ,  $\alpha_x$ ,  $\varphi$ ,  $\rho$  от параметра  $t$

№№ п/п	$t$ , $\frac{\text{рад}}{\text{град}}$	$\operatorname{tg}\mu_x$	$\delta\operatorname{tg}\mu_x$ , %	$\mu_x$ , град	$\alpha_x$ , град	$\varphi$ , град	$\rho/0,5D_\phi$
1	$\frac{1,865\pi}{-335}$	4,9862	0	78,66	11,34	-0,81	6,2712
2	$\frac{1,870\pi}{-336,8}$	5,1693	3,41	79,05	10,95	-0,75	6,2724
3	$\frac{1,875\pi}{-337,5}$	5,3669	7,84	79,44	10,55	-0,70	6,2736
4	$\frac{1,880\pi}{-338,4}$	5,5808	11,93	79,84	10,16	-0,64	6,2747
5	$\frac{1,881\pi}{-338,58}$	5,6257	12,82	79,92	10,08	-0,63	6,2751

Из таблицы следует, что значения  $\operatorname{tg}\mu_x$  соответствуют интервалам углов расположены на отрезке  $[4,9861; 5,6257]$ , что

$\mu_x \in [78,66^\circ; 79,92^\circ]$ ,  $d_x \in [10,08^\circ; 11,79^\circ]$ ;  
 $\varphi_x \in [-0,87^\circ; -0,63^\circ]$ . Важно отметить, что  $\text{tg}\mu_x$  имеет разброс на указанном отрезке около среднего значения  $\overline{\text{tg}\mu_x} = \frac{4,9861 + 5,6257}{2} \approx 5,3059$ , не превышающий  $\delta\text{tg}\mu_x = \pm 6,41\%$ . Такой подход

позволяет осуществить два главных условия: выполнение требования (19) с допустимой точностью; задние углы  $\alpha_x$  из вышеуказанного отрезка попадают в множество допустимых значений  $9^\circ \dots 12^\circ$ .

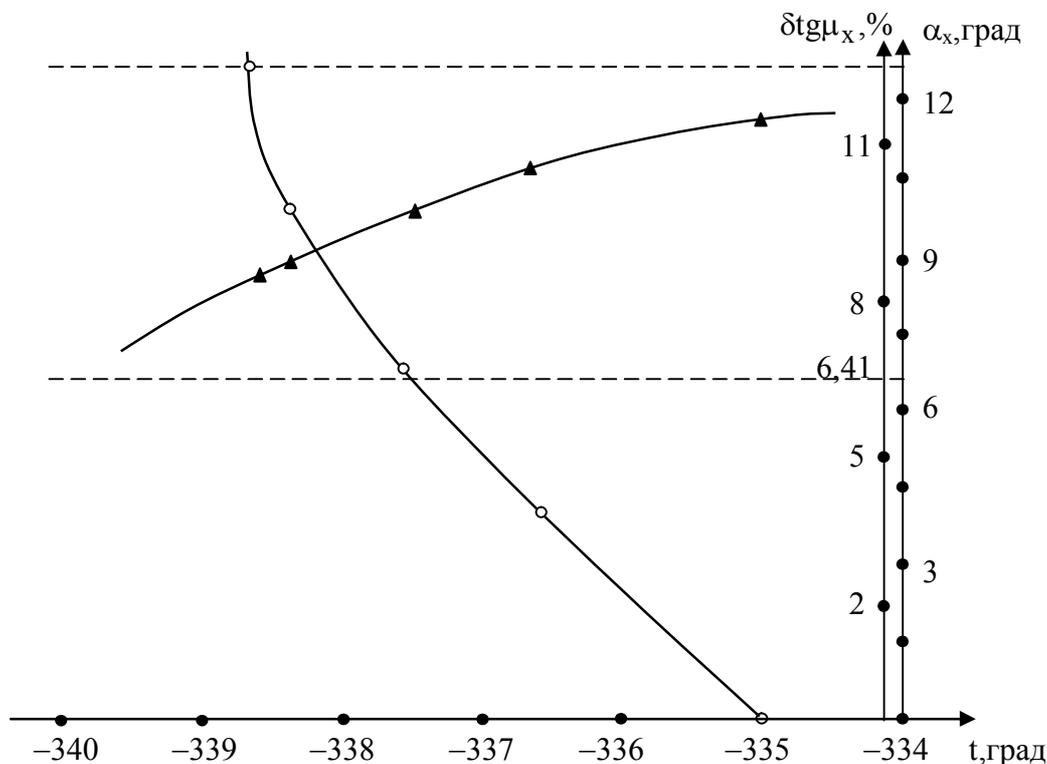


Рис. 6. Допустимые границы  $\delta\text{tg}\mu_x$  -  $\circ$ ,  $\alpha_x$  -  $\blacktriangle$

Определим затылование фрезы K по циклоиде:

$$K = \rho_B - \rho_A, \quad (20)$$

где  $\rho_B, \rho_A$  – полярные радиусы, соответствующие полярным углам  $\varphi_B, \varphi_A$  в точках A и B ( $\varphi_A = -0,81^\circ$ ,  $t_A = -335^\circ$ ;

$\varphi_B = -0,63^\circ$ ,  $t_{B1} = -338,58^\circ$ ). Здесь точка  $B_1 \in \rho_B$  и соответствует точке B на дуге циклоиды на пересечении с полярным радиусом  $\rho_B$ . Из (20) следует:

$$K = \frac{D_\phi}{2} \left( \sqrt{t_B^2 + 2 - 2(t_B \sin t_B + \cos t_B)} - \sqrt{t_A^2 + 2 - 2(t_A \sin t_A + \cos t_A)} \right). \quad (21)$$

В итоге имеем:

$$K \approx 0,001853597 D_\phi. \quad (22)$$

Определим количество зубьев Z, соответствующее данному интервалу  $[t_{B1}, t_A]$ , взяв целую часть дроби  $\pi / (t_A - t_{B1})$ :

$$Z = \left\lfloor \frac{\pi}{t_A - t_{B1}} \right\rfloor = \left\lfloor \frac{\pi}{-1,865\pi + 1,881\pi} \right\rfloor = \lfloor 62,5 \rfloor = 62 \quad (23)$$

Вычислим длину  $\ell_\phi$  режущей части одного зуба фрезы на сегменте значений параметра  $t \in [t_{B1}, t_A]$  согласно [5], [6] имеем:

$$\ell_\phi = \int_{t_A}^{t_{B1}} \sqrt{\left(\frac{dx}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy}{dt}\right)^2} dt. \quad (24)$$

В нашем случае получаем:

$$\begin{aligned} \ell_{\phi} &= \left| \begin{array}{l} 1) \frac{dx}{dt} = \left( \frac{D_{\phi}}{2}(t - \sin t) \right)'_t = \frac{D_{\phi}}{2}(1 - \cos t); \\ 2) \frac{dy}{dt} = \left( \frac{D_{\phi}}{2}(1 - \cos t) \right)'_t = \frac{D_{\phi}}{2} \sin t \end{array} \right| = \\ &= \frac{D_{\phi}}{2} \int_{t_A}^{t_{B1}} \sqrt{(1 - \cos t)^2 + \sin^2 t} dt = D_{\phi} \int_{t_A}^{t_{B1}} \sin \frac{t}{2} dt = -2D_{\phi} \cos \frac{t}{2} \Big|_{t_A}^{t_{B1}} = \\ &= -2D_{\phi} \left( \cos \frac{t_{B1}}{2} - \cos \frac{t_A}{2} \right) = 2D_{\phi} \left( \cos \frac{t_A}{2} - \cos \frac{t_{B1}}{2} \right). \end{aligned} \quad (25)$$

Подставляя  $t_A$  и  $t_B$  в (25) найдем  $\ell_{\phi}$ :

$$\ell_{\phi} = 0,009960878D_{\phi} \approx 0,01D_{\phi}. \quad (26)$$

Такой подход позволяет сохранить постоянство профиля изделия, обеспечиваемое зубом затылованной фрезы в пределах указанного разброса, рис. 5, где дуга АВ – режущая кромка зуба фрагмента циклоидной фрезы АВВ<sub>1</sub>.

$$\operatorname{tg} \mu_{x_k} = \frac{\rho - h}{(\rho - h)'_{\phi}} = \frac{\rho - h}{\rho'_{\phi}} = \frac{\rho}{\rho'_{\phi}} - \frac{h}{\rho'_{\phi}} = \operatorname{tg} \mu_x - \frac{h}{\rho'_{\phi}}. \quad (27)$$

Учитывая (1), имеем:

$$\operatorname{ctg} \alpha_{x_k} = \operatorname{ctg} \alpha_x - \frac{h}{\rho'_{\phi}}. \quad (28)$$

Из формул (27), (28) и таблицы следует, что чем разность  $\rho - h$  меньше, т.е. чем точка конхоиды лежит ближе к центру фрезы, тем задний угол  $\alpha_{x_k}$  фрезы больше.

Несмотря на преимущества циклоидальной фрезы перед другими типами затылованных фрез в скорости и точности обработки, она имеет один недостаток – довольно малый промежуток применимости на дуге циклоиды:

$$\phi \in [-0,87^{\circ}; -0,63^{\circ}] \cup [0,63^{\circ}; 0,87^{\circ}].$$

### Заключение

Приведен обзор существующих методов затылования червячных фрез, в частности, по логарифмической спирали.

На основе существующих подходов разработан вариант затылования зубьев червячной фрезы по циклоиде.

В процессе резания зуб такой фрезы переходит на новую кривую (конхоиду), которая углубляется на величину первоначальной высоты зуба  $h$ . В этом случае, если в произвольной точке циклоиды с координатой  $x$  мы имеем обозначение  $\operatorname{tg} \mu$  в виде  $\operatorname{tg} \mu_x$ , то на  $k$ -м шаге конхоиды соответственно получим значение  $\operatorname{tg} \mu_{x_k}$  [1],[5], [7]:

Отмечены достоинства и недостатки циклоидных фрез.

### Литература

1. Протасьев В.Б., Степанов Ю.С., Ушаков М.В. Прогрессивные конструкции затылованных инструментов; под ред. Ю.С.Степанова. М.: Машиностроение, 2003. 223 с.
2. Лашнев С.И., Борисов А.Н., Емельянов С.Г. Геометрическая теория формирования поверхностей режущими инструментами. Курск: КГТУ, 1997. 390 с.
3. Металлорежущие инструменты: учебник для вузов / Г.Н. Сахаров, О.Б., Арбузов, Ю.Л. Боровой и др. М.: Машиностроение, 1989. 328 с.
4. Определение профиля червячной фрезы для изготовления зубчатых колес эллиптического профиля / А.А. Рыжкин [и др.] // Вестн. Донск. гос. техн. ун-та. 2010. Т. 10. № 5. С. 731-734.
5. Тютюнов Д.Н., Студеникина Л.И. Скрипкина Е.В. Функции нескольких переменных: учеб. пособие [Электронный ресурс]. Курск: ЮЗГУ, 2016. 176 с.
6. Тютюнов Д.Н., Студеникина Л.И. Неопределенный интеграл. Техника интегрирования: учеб. пособие. Старый Оскол: ТНТ, 2016. 115 с.
7. Федоров С.С. Один из вариантов математической модели управления приводом модифицированной системы отопления зданий и сооружений / С.С. Федоров, Н.С. Кобелев, Д.Н. Тютюнов, Е.А. Панина и др. // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2012. № 3. С. 25-27.

### Информация об авторах

**Кус Вадим Васильевич** – д-р техн. наук, профессор, Юго-Западный государственный университет (305040, Россия, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94), e-mail: kuc-vadim@yandex.ru

**Панин Александр Андреевич** – аспирант кафедры машиностроительных технологий и оборудования, Юго-Западный государственный университет (305040, Россия, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94), e-mail: panin.schweine@mail.ru

**Тютюнов Дмитрий Николаевич** – канд. техн. наук, доцент кафедры высшей математики, Юго-Западный государственный университет (305040, Россия, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94), e-mail: tjutjunov@mail.ru

**Жилина Кира Викторовна** – канд. техн. наук, доцент кафедры высшей математики, Юго-Западный государственный университет (305040, Россия, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94), e-mail: kirazhilina@yandex.ru

## ONE OF THE POSSIBLE APPROACHES FOR DESIGNING A HOB CUTTER FOR MACHINING A SMALL CYCLOIDAL CONE

V.V. Kuts, A.A. Panin, D.N. Tyutyunov, K.V. Zhilina

South-West State University, Kursk, Russia

**Abstract:** the article provides an overview of the industrial production of hob cutters. We show that improving the quality and productivity of gear wheel manufacturing is a necessary condition for reducing the cost and expanding the production of gear wheels at domestic enterprises. The main requirement for the teeth of this cutter is that, as a result of sharpening on the front surface, which lies in the axial plane of the cutter, the profile of the teeth remains sharp until they are almost completely worn out. Therefore, we paid special attention to the choice of the relief curve, taking into account a number of factors that contribute to the improvement of the processing process. We note that relief has a number of advantages in comparison with sharpening of cutters. We give a new approach to the design of working equipment for processing small cycloidal wheels and investigate the theoretically permissible intervals of variation of the rear angles during relief. We established that despite the advantages of a cycloidal cutter over other types of undercut cutters in terms of speed and machining accuracy, it has one drawback - a rather small range of applicability on the cycloid arc. On the basis of existing approaches, we developed a variant of the relief of the teeth of the worm cutter along the cycloid

**Key words:** hob cutter, cycloidal transmission, screw relief

### References

1. Protas'ev V.B., Stepanov Yu.S., Ushakov M.V. "Progressive designs of backed-off instruments" ("Progressivnye konstruktsii zatylovannykh instrumentov"), Moscow, Mashinostroenie, 2003, 223 p.
2. Lashnev S.I., Borisov A.N., Emelyanov S.G. "Geometric theory of surface formation by cutting tools" ("Geometricheskaya teoriya formirovaniya poverkhnostey rezhushchimi instrumentami"), KSTU, 1997, 390 p.
3. Sakharov G.N., Arbutov O.B., Borovoy Yu.L. et al. "Metal-cutting tools" ("Metallorazhushchie instrumenty"), Moscow, Mashinostroenie, 1989, 328 p.
4. Ryzhkin A.A. et al. "Determination of the profile of a worm cutter for the manufacture of elliptical gears", *Bulletin of Don State University (Vestnik Donskogo gosudarstvennogo universiteta)*, 2010, vol. 10, no. 5, pp. 731-734.
5. Tyutyunov D.N., Studenikina L.I., Skripkina E.V. "Functions of several variables" ("Funktsii neskol'kikh peremennykh"), Electronic resource, South-West State University, Kursk, 2016, 176 p.
6. Tyutyunov D.N., Studenikina L.I. "Indefinite integral. Integration technique" ("Neopredelennyy integral. Tekhnika integrirovaniya"), *Stary Oskol, TNT*, 2016, 115 p.
7. Fedorov S.S., Kobelev N.S., Tyutyunov D.N., Panina E.A. et al. "One of the variants of the mathematical model for controlling the drive of the modified heating system of buildings and structures", *Bulletin of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G.Shukhova)*, 2012, no. 3, pp. 25-27.

Submitted 08.01.2021; revised 18.02.2021

### Information about the authors

**Vadim V. Kuts**, Dr. Sc. (Technical), Professor, South-West State University (94 50-letiya Oktyabrya str., Kursk 305040, Russia), e-mail: kuc-vadim@yandex.ru

**Aleksandr A. Panin**, graduate student, South-West State University (94 50-letiya Oktyabrya str., Kursk 305040, Russia), e-mail: panin.schweine@mail.ru

**Dmitriy N. Tyutyunov**, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, South-West State University (94 50-letiya Oktyabrya str., Kursk 305040, Russia), e-mail: tjutjunov@mail.ru

**Kira V. Zhilina**, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, South-West State University (94 50-letiya Oktyabrya str., Kursk 305040, Russia), e-mail: kirazhilina@yandex.ru