

**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

Моделирование и управление системами замкнутого цикла с внутренними резервами С.Л. Подвальный, Д.В. Логунов, Е.М. Васильев.....	7
Оценка динамики вкладов факторов в линейной регрессионной модели С.И. Носков.....	15

### Радиотехника и связь

Формирование сканирующей антенны на основе полуволнового диполя С.М. Фёдоров, Е.А. Ищенко, И.А. Баранников, К.А. Бердников, В.В. Кузнецова.....	20
Оценка применимости технологий LoRaWan для организации резервного канала связи для метеобеспечения аэродромов Д.К. Тунеголовец.....	25
Улучшенный MIN-SUM алгоритм декодирования для нерегулярных LDPC-кодов А.В. Башкиров, И.В. Свиридова, Т.Д. Ижокина, Е.А. Зубкова, О.В. Свиридова, Д.В. Васильченко.....	32
Реализация зонного принципа в системе управления аппаратурой регулирования и контроля бортовой сети космического аппарата И.И. Таболин, Р.Ю. Кузьменко, А.Д. Данилов.....	41
Двухрефлекторная антенна Bi-Quad для задач WLAN С.М. Фёдоров, Е.А. Ищенко, И.А. Баранников, К.А. Бердников, В.В. Кузнецова.....	47
Автоматизированный тестер устойчивости электронных средств к воздействию электростатических разрядов М.А. Ромашенко, Д.С. Сеимова, М.А. Иванов.....	51
Сравнение характеристик корреляционно-интерферометрического пеленгатора при использовании направленных и ненаправленных антенных элементов А.В. Ашихмин, И.Б. Крыжко, А.Б. Токарев, А.А. Фатеев.....	59
Использование шестнадцатиканального комплекса регистрации электроэнцефалограммы для выявления различных изменений электрической активности головного мозга с целью их дальнейшей интерпретации Д.В. Журавлёв, А.А. Проводников.....	70
Асимптотические методы анализа в электродинамике И.А. Баранников, К.А. Бердников, Е.А. Ищенко, С.М. Фёдоров.....	79
Сдвоенный сферический датчик напряженности электрического поля С.В. Бирюков, А.В. Тюкин, Л.В. Тюкина.....	85

### Машиностроение и машиноведение

Повышение эффективности чистового фрезерования вогнутых поверхностей на малогабаритных станках с ЧПУ А.М. Козлов, Г.Е. Малютин, Е.А. Малявин, А.А. Козлов.....	92
Способ векторного частного управления асинхронным электроприводом С.В. Аникин, В.Л. Бурковский, А.К. Муконин, Д.А. Тонн, В.А. Трубецкой.....	98

Течение рабочих сред через каналы в корпусе электрода-инструмента <b>В.П. Смоленцев, Н.С. Поташникова, И.Г. Стародубцев.....</b>	<b>104</b>
Аналитическое определение параметров микрорельефа, образующегося в результате бесцентрового шлифования полной сферы <b>О.П. Решетникова, Б.М. Изнаиров, А.Н. Васин, Н.В. Белоусова, Г.А. Семочкин.....</b>	<b>111</b>
Влияние материалов трубопроводов газодинамических стендов на их динамические характеристики <b>А.В. Саврико, С.Н. Лымич, К.В. Кружаев, В.С. Левин, А.В. Москвичев.....</b>	<b>118</b>
Исследование процесса восстановления поврежденных поверхностей трубопроводов методом поверхностного наклепа <b>О.В. Уразов, А.Д. Данилов.....</b>	<b>126</b>

## CONTENTS

### Informatics, computer engineering and control

Simulation and control of closed-loop systems with internal reserves <b>S.L. Podvalny, D.V. Logunov, E.M. Vasil'ev .....</b>	<b>7</b>
Estimation of the dynamics of factor contributions in a linear regression model <b>S.I. Noskov.....</b>	<b>15</b>

### Radio engineering and communication

Formation of a scanning antenna based on a half-wave dipole <b>S.M. Fyedorov, E.A. Ishchenko, I.A. Barannikov, K.A. Berdnikov, V.V. Kuznetsova.....</b>	<b>20</b>
Assessment of the applicability of LaRaWan technologies for the organization of a backup communication channel for meteorological support of airfields <b>D.K. Tunegolovets .....</b>	<b>25</b>
Improved MIN-SUM decoding algorithm for irregular LDPC codes <b>A.V. Bashkirov, I.V. Sviridova, T.D. Izhokina, E.A. Zubkova, O.V. Sviridova, D.V. Vasil'chenko.....</b>	<b>32</b>
Implementation of zone principle in the control system of regulation and monitoring equipment of spacecraft onboard network <b>I.I. Tabolin, R.Yu. Kuz'menko, A.D. Danilov.....</b>	<b>41</b>
Bi-Quad dual reflector antenna for WLAN tasks <b>S.M. Fyedorov, E.A. Ishchenko, I.A. Barannikov, K.A. Berdnikov, V.V. Kuznetsova.....</b>	<b>47</b>
Automated resistance tester of electronic means to electrostatic discharge <b>M.A. Romashchenko, D.S. Seimova, M.A. Ivanov.....</b>	<b>51</b>
Comparison of the characteristics of the correlation-interferometric bellows when using directional and non-directional antenna elements <b>A.V. Ashikhmin, I.B. Kryzhko, A.B. Tokarev, A.A. Fateev.....</b>	<b>59</b>
Using a sixteen-channel eeg recording complex to detect various changes in the electrical activity of the brain for further interpretation <b>D.V. Zhuravlev, A.A. Provodnikov.....</b>	<b>70</b>
Asymptotic methods of analysis in electrodynamics <b>I.A. Barannikov, K.A. Berdnikov, E.A. Ishchenko, S.M. Fyedorov.....</b>	<b>79</b>
Dual spherical electric field voltage sensor <b>S.V. Biryukov, A.V. Tyukin, L.V. Tyukina.....</b>	<b>85</b>

### Mechanical engineering and science of machines

Improving the efficiency of finishing milling of concave surfaces on small-sized CNC machines <b>A.M. Kozlov, G.E. Malyutin, E.A. Malyavin, A.A. Kozlov.....</b>	<b>92</b>
Method of vector private control of asynchronous electric drive <b>S.V. Anikin, V.L. Burkovskiy, A.K. Mukonin, D.A. Tonn, V.A. Trubetskoy.....</b>	<b>98</b>
Flow of working media through the channels in the body of the electrode-tool <b>V.P. Smolentsev, N.S. Potashnikova, I.G. Starodubtsev.....</b>	<b>104</b>

Analytical determination of the microrelief parameters formed as a result of centerless grinding of the full sphere <b>O.P. Reshetnikova, B.M. Iznairov, A.N. Vasin, N.V. Belousova, G.A. Semochkin.....</b>	<b>111</b>
Influence of gas-dynamic testing rig pipelines material on their dynamic characteristics <b>A.V. Savriko, S.N. Lymich, K.V. Kruzhaev, V.S. Levin, A.V. Moskvichev.....</b>	<b>118</b>
Investigation of the process of restoration of damaged pipeline surfaces by the method of surface riveting <b>O.V. Urazov, A.D. Danilov.....</b>	<b>126</b>

## *Информатика, вычислительная техника и управление*

DOI 10.36622/VSTU.2021.15.5.001

УДК 681-51

### **МОДЕЛИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ СИСТЕМАМИ ЗАМКНУТОГО ЦИКЛА С ВНУТРЕННИМИ РЕЗЕРВАМИ**

**С.Л. Подвальный, Д.В. Логунов, Е.М. Васильев**

**Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия**

**Аннотация:** рассматривается задача воспроизведения в искусственных объектах способности естественных систем к самовосстановлению вследствие существования в них замкнутого круговорота вещества и энергии. Показано, что создание замкнутого жизненного цикла в системе предполагает реализацию в ней процессов восстановления ресурсов и их накопления в виде внутренних резервов, расходуемых системой в неблагоприятных условиях существования. Получена функциональная схема системы с замкнутым циклом и предложена математическая модель её функционирования в виде дискретного однородного марковского процесса без последействия. Обнаружено, что введение в систему внутреннего резервирования требует рассмотрения двух альтернативных вариантов модели системы: варианта для случая, в котором объём резервов ограничен возможностями каналов восстановления в системе, и варианта, в котором указанное ограничение отсутствует. Составлены графы состояний системы для указанных режимов функционирования и получены выражения для финальных вероятностей этих состояний. На основе полученных финальных вероятностей составлены аналитические расчётные соотношения для характеристик эффективности системы с замкнутым циклом. В качестве основной характеристики эффективности такого рода систем предлагается использовать вероятность полного функционирования системы, т.е. вероятность её работы с использованием всего объёма активных ресурсов. Представлен числовой пример, подтверждающий работоспособность предложенной модели, и проведён сопоставительный анализ вариантов управления эффективностью замкнутой системы путём изменения объёма резервов, количества процессов восстановления и интенсивности этих процессов. Выявлено доминирующее значение внутренних резервов при обеспечении заданных показателей эффективности системы с замкнутым циклом

**Ключевые слова:** системы замкнутого цикла, внутренние резервы, самовосстанавливающиеся системы, марковские процессы

#### **Введение**

К системам замкнутого цикла относятся системы любой природы, в которых обеспечивается непрерывный круговорот вещества и энергии. Каноническим примером такой системы является любая экологическая система, обеспечивающая своё устойчивое существование за счёт внутренних замкнутых циклов преобразования материальных ресурсов [1-4].

В информационном плане функционирование таких систем подчиняется ряду кибернетических положений, которые сформулированы в виде эволюционных принципов многоальтернативности: многоуровневости структуры, многообразия и разделения функций, модульности строения [5-7].

Растущий интерес к свойствам систем замкнутого цикла обусловлен тем парадоксальным обстоятельством, что с ростом сложности искусственных (антропогенных) технических систем надёжность их функционирования начинает снижаться, в то время как в есте-

ственных экологических системах подобное явление никогда не наблюдается: чем сложнее и многообразнее живая система, тем большую устойчивость к неблагоприятным изменениям внешней среды она демонстрирует [8-12].

Стремление воспроизвести указанную особенность живых систем в сложных технических объектах предполагает создание соответствующих формальных моделей, отражающих эти свойства. При этом такие модели должны носить не только демонстрационный, но и конструктивный характер, т.е. должны быть пригодными для расчёта эффективного управления сложными объектами.

В предлагаемой работе ставится задача разработки математической модели, раскрывающей системообразующее свойство замкнутого цикла обращения вещества и роль этого свойства в обеспечении устойчивого функционирования сложной системы. Будет рассмотрен случай существования в системе внутренних резервов (запасов), накапливаемых ею в периоды благоприятного развития, и расходуемых в экстремальных ситуациях. Формирование та-

ких резервов в системе существенно повышает её способность к самовосстановлению [13].

Завершая введение, следует отметить, что на общенаучном уровне идеи построения систем замкнутого цикла приобрели наибольшую популярность в виде перспективной концепции замкнутой экономики [14, 15].

В настоящее время можно найти примеры эффективной реализации этой идеи как в крупных технологических процессах атомной энергетики, химии и металлургии, так и в малых масштабах, например, в системе сервисной

службы предприятия, поддерживающей непрерывное протекание технологического процесса путём восстановления работоспособности узлов и агрегатов, обеспечивающих указанный процесс [16, 17].

### Постановка задачи

Будем рассматривать систему замкнутого цикла в виде достаточно общей функциональной схемы, представленной на рис. 1.

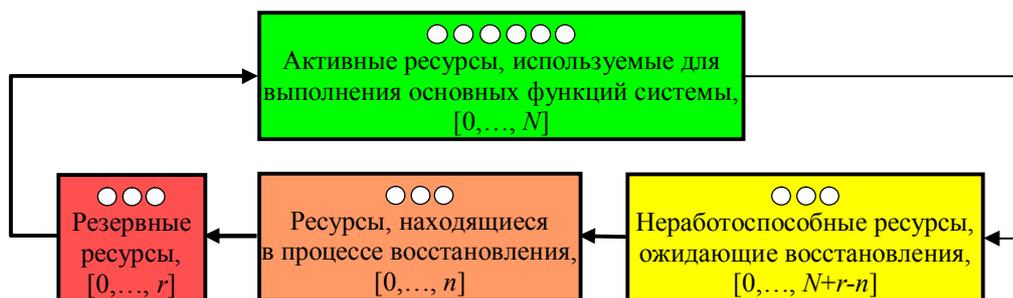


Рис. 1. Схема распределения материальных ресурсов в системе замкнутого цикла

Введём величины (параметры), характеризующие процесс использования и восстановления ресурсов в замкнутом цикле функционирования системы:

$N$  – максимально возможное количество активных ресурсов, которое может использоваться (потребляться) системой для выполнения своих основных функций. То есть принимается, что текущее количество активных ресурсов может принимать любое значение от 0 до  $N$ ;

$\lambda$  – интенсивность расходования ресурсов, т.е. среднее количество активных ресурсов в единицу времени, переходящих в неработоспособное состояние;

$n$  – количество устройств или процессов, занимающихся восстановлением неработоспособных ресурсов (далее такие устройства будем называть каналами восстановления);

$\mu$  – интенсивность восстановления ресурсов одним каналом, т.е. среднее количество ресурсов в единицу времени, переходящих в одном канале восстановления из неработоспособного состояния в работоспособное;

$r$  – максимальное количество ресурсов, составляющих внутренний резерв системы. В результате общее и неизменяемое количество внутренних ресурсов в системе определяется суммой  $N+r$ .

Ставится задача разработки математической модели, устанавливающей взаимосвязь между перечисленными выше исходными параметрами системы и показателями её эффективности, к важнейшим из которых отнесём вероятность нахождения системы в состоянии с максимальным количеством используемых активных ресурсов.

### Разработка модели функционирования системы с замкнутым циклом

Случайный характер процессов расходования активных ресурсов во времени и их восстановления [18, 19] указывает на необходимость описания рассматриваемой системы в классе стохастических моделей с непрерывным временем. Указанный класс моделей представляет процесс функционирования системы в виде дискретного однородного марковского процесса без последствия, т.е. с пуассоновскими потоками событий в системе. Такой процесс обладает множеством дискретных состояний  $S_0, S_1, \dots, S_r, \dots, S_n, \dots, S_{N+r}$  имеющих, например, следующий содержательный смысл:

$S_0$  – состояние системы, в котором все ресурсы находятся в рабочем состоянии ( $N$  единиц ресурсов активны),  $r$  единиц ресурсов находятся в резерве;

$S_1$  – состояние системы, в котором одна единица ресурсов неработоспособна и находится в процессе восстановления (см. рис. 1);

$S_r$  – в системе неработоспособны  $r$  единиц ресурсов, т.е. все внутренние резервы системы исчерпаны, и такое же количество  $r$  единиц находится в процессе восстановления ( $r \leq n - 1$ ). Активных ресурсов по-прежнему  $N$ ;

$S_{r+1}$  – в системе неработоспособно  $r + 1$  единиц ресурсов, т.е. после исчерпания внутренних резервов количество активных ресурсов в системе сократилось на единицу и стало равным  $N-1$ . Иными словами, система уже не в со-

стоянии выполнять свои функции в полной мере;

$S_n$  – в системе неработоспособно  $n$  единиц ресурсов, и количество активных ресурсов составляет  $N-(n-r)$ ;

$S_{N+r}$  – в систем не осталось активных ресурсов, при этом  $n$  единиц ресурсов находятся в процессе восстановления, а  $N-(n-r)$  единиц ожидают восстановления.

Описанный марковский процесс для случая  $0 < r \leq n - 1$  ( $r < n$ ) представлен в виде графа на рис. 2.

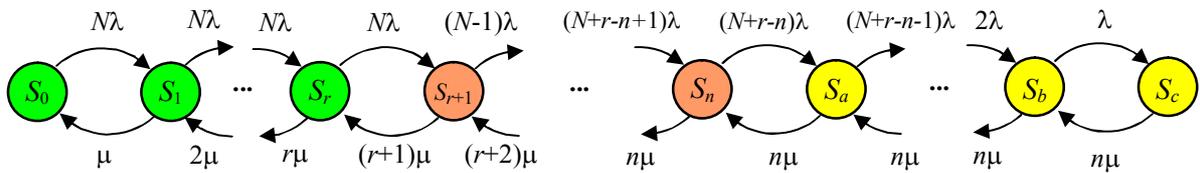


Рис. 2. Граф состояний замкнутой системы для случая  $r < n$ , ( $a = n + 1$ ;  $b = N + r - 1$ ;  $c = N + r$ )

На рис. 2 рёбрам графа, направленным слева направо, соответствуют суммарные интенсивности использования текущего количества активных ресурсов, справа налево – суммарные интенсивности восстановления ресурсов.

На основе системы уравнений стохастического равновесия для состояний полученного графа найдены аналитические выражения для финальных вероятностей  $p_0, p_1, \dots, p_r, \dots, p_n, \dots, p_{N+r}$  нахождения системы в каждом из этих состояний:

$$p_k = p_0 \left( N \frac{\lambda}{\mu} \right)^k \cdot \frac{1}{k!} \quad \text{для } 0 \leq k \leq r+1; \quad (1)$$

$$p_k = p_0 \left( \frac{\lambda}{\mu} \right)^k \cdot \frac{N^{r+1}}{k!} \cdot \prod_{m=1}^{k-1-r} (N-m); \quad (2)$$

для  $r+2 \leq k \leq n$ .

$$p_k = p_0 \left( \frac{\lambda}{\mu} \right)^k \cdot \frac{N^{r+1}}{n! n^{k-n}} \cdot \prod_{m=1}^{k-1-r} (N-m) \quad (3)$$

для  $n+1 \leq k \leq N+r$ .

Если  $r = n - 1$ , то вероятности, определяемые выражением (2), равны нулю.

Перепишав полученные выражения (1)-(3) с обозначениями:

$$p_k = p_0 F_{1,k} \quad \text{для } 0 \leq k \leq r+1; \quad (4)$$

$$p_k = p_0 R_{1,k} \quad \text{для } r+2 \leq k \leq n; \quad (5)$$

$$p_k = p_0 D_{1,k} \quad \text{для } n+1 \leq k \leq N+r, \quad (6)$$

получим финальную вероятность  $p_0$  в замкнутой форме:

$$p_0 = \frac{1}{\sum_{k=0}^{r+1} F_{1,k} + \sum_{k=r+2}^n R_{1,k} + \sum_{k=n+1}^{N+r} D_{1,k}}. \quad (7)$$

Вероятность  $P_C$  полного выполнения системой своих функций будет складываться из вероятностей состояний, в которых система использует максимальный объём  $N$  активных ресурсов. Из графа на рис. 2 следует:

$$P_C(r) = \sum_{k=0}^r p_k. \quad (8)$$

Соответственно, величина  $P_L(r)$ :

$$P_L(r) = 1 - \sum_{k=0}^r p_k = 1 - P_C(r) \quad (9)$$

представляет собою вероятность ограниченного функционирования системы.

Для системы без резервирования  $r = 0$ , и состояние  $S_0$  полного функционирования единственное. В этом случае в графе на рис. 2 состояние  $S_r$  совпадёт с  $S_0$ , и мы придём к частному случаю выражений (1)-(7) с  $r = 0$ . Этот

случай соответствует типовой модели системы массового обслуживания [20]. Вероятность  $P_C(0)$  состояния  $S_0$  получит вид:

$$P_C(0) = \left( \sum_{k=0}^1 \left( N \frac{\lambda}{\mu} \right)^k \cdot \frac{1}{k!} + \sum_{k=2}^n \left( \frac{\lambda}{\mu} \right)^k \cdot \frac{N}{k!} \cdot \prod_{m=1}^{k-1} (N-m) + \sum_{k=n+1}^N \left( \frac{\lambda}{\mu} \right)^k \cdot \frac{N}{n! n^{k-n}} \cdot \prod_{m=1}^{k-1} (N-m) \right)^{-1} \cdot (10)$$

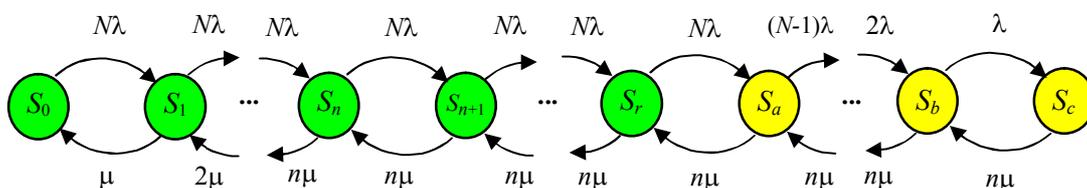


Рис. 3. Граф состояний замкнутой системы для случая  $r \geq n$ , ( $a = r + 1$ ;  $b = N + r - 1$ ;  $c = N + r$ )

Для рассматриваемого случая финальные вероятности состояний имеют вид:

$$p_k = p_0 \left( N \frac{\lambda}{\mu} \right)^k \cdot \frac{1}{k!} \quad \text{для } 0 \leq k \leq n; \quad (11)$$

$$p_k = p_0 \left( N \frac{\lambda}{\mu} \right)^k \cdot \frac{1}{n! n^{k-n}}; \quad (12)$$

для  $n + 1 \leq k \leq r + 1$ ;

$$p_k = p_0 \left( \frac{\lambda}{\mu} \right)^k \cdot \frac{N^{r+1}}{n! n^{k-n}} \cdot \prod_{m=1}^{k-1-r} (N-m) \quad (13)$$

для  $r + 2 \leq k \leq N + r$ .

Введя в выражения (11)-(13) обозначения:

$$p_k = p_0 F_{2,k} \quad \text{для } 0 \leq k \leq n; \quad (14)$$

$$p_k = p_0 R_{2,k} \quad \text{для } n + 1 \leq k \leq r + 1; \quad (15)$$

$$p_k = p_0 D_{2,k} \quad \text{для } r + 2 \leq k \leq N + r, \quad (16)$$

получим финальную вероятность  $p_0$  для случая  $r \geq n$ :

$$p_0 = \frac{1}{\sum_{k=0}^n F_{2,k} + \sum_{k=n+1}^{r+1} R_{2,k} + \sum_{k=r+2}^{N+r} D_{2,k}} \cdot (17)$$

Выражения (8), (10) далее будут использованы при исследовании характеристик эффективности системы.

Перейдём к рассмотрению более важного для практики случая, когда  $r > n - 1$  ( $r \geq n$ ).

В этом случае в системе имеется возможность накопления значительного количества резервов, не ограниченного какими-либо другими её внутренними параметрами.

Граф состояний системы для этого случая показан на рис. 3 и качественно отличается от графа на рис. 2 теоретически неограниченным количеством состояний с полным функционированием.

Выражения (1)-(7), (10), (11)-17) представляют собою математическую модель замкнутой системы и охватывают все случаи взаимного соотношения её параметров, а также частный случай работы системы без резервов.

### Управление эффективностью системы

В качестве показателя эффективности системы с замкнутым циклом будем использовать вероятность  $P_C$  полного выполнения системой своих функций (8). В содержательном плане этот показатель соответствует вероятности восстановления полной работоспособности системы при случайном выводе из использования (выходе из строя) части активных ресурсов.

Управление этим показателем в антропогенной системе возможно изменением трёх её параметров:

- количеством  $n$  каналов восстановления;
- интенсивностью  $\mu$  восстановления ресурсов каждым каналом;
- объёмом внутренних резервов  $r$  накопленных в системе.

Для количественного анализа использовался пример системы замкнутого цикла с параметрами:  $N = 10$ ;  $\lambda = 2$ ;  $n = \text{varia}$ ;  $\mu = \text{varia}$ ;  $r = \text{varia}$ .

Искомые зависимости  $P_C(n)$ ,  $P_C(\mu)$ ,  $P_C(r)$  вычислялись по аналитическим моделям (1)-(7), (10) и (11)-(17), рис. 4, 5, 6.

На рис. 4 показана зависимость вероятности  $P_C$  полного функционирования системы от числа  $n$  каналов восстановления при разном объёме  $r$  резервов.

Анализ рис. 4 очевидно показывает, что при отсутствии или недостаточном количестве  $r$  резервов (в данном случае при  $r \leq 5$ ) в системе не может быть обеспечен высокий уровень  $P_C$ , например,  $P_C \geq 0,95$ , ни при каком, в т.ч. максимальном количестве  $n_{\max} = N + r$  каналов восстановления.

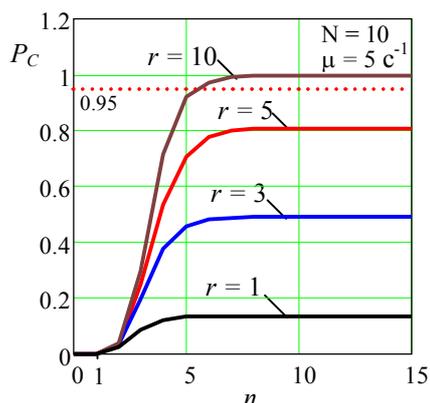


Рис. 4. Зависимость вероятности  $P_C$  полного функционирования системы от числа  $n$  каналов восстановления по параметру объёма  $r$  резервов

В то же время введение в систему резерва позволяет обеспечить требуемое значение вероятности  $P_C = 0,95$  полного функционирования системы уже при небольшом количестве  $n$  каналов восстановления: по рис. 4 – при  $n \geq 6$ . При этом дальнейшее увеличение числа каналов не требуется. Эти обстоятельства указывают на высокую эффективность создания резерва для повышения качеством функционирования системы с замкнутым циклом.

Зависимость вероятности  $P_C$  полного функционирования системы от интенсивности  $\mu$  восстановления при разном количестве  $r$  резервов представлена на рис. 5.

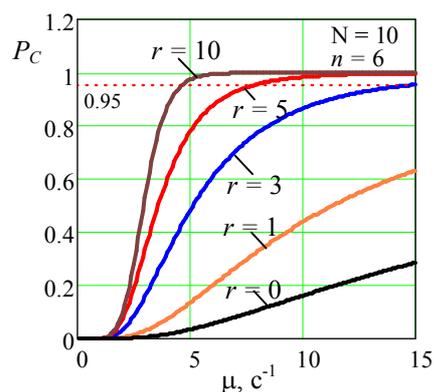


Рис. 5. Зависимость вероятности  $P_C$  полного функционирования системы от интенсивности  $\mu$  восстановления по параметру объёма  $r$  резервов

Графики на рис. 5 подтверждают высокую результативность введения резерва для обеспечения заданного значения  $P_C$ . Кроме того, наличие резерва одновременно позволяет существенно снизить требования к уровню интенсивности  $\mu$  восстановления при неизменном количестве  $n$  каналов.

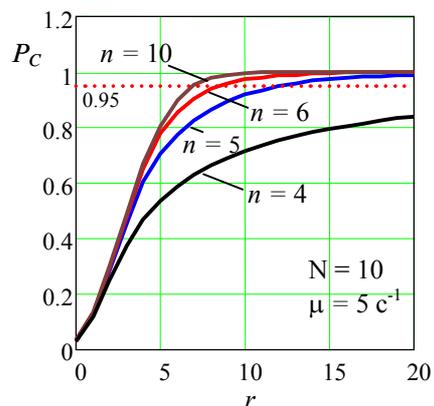


Рис. 6. Зависимость вероятности  $P_C$  полного функционирования системы от объёма  $r$  резервов по параметру числа  $n$  каналов восстановления

На рис. 6 приведена зависимость вероятности  $P_C$  полного функционирования системы от объёма  $r$  резервов при разном количестве  $n$  каналов восстановления.

Рис. 6 показывает, что в результате создания резерва в системе может быть достигнут приемлемый уровень вероятности  $P_C$  полного функционирования системы даже при сравнительно небольшом числе каналов восстановления:  $n = 4$  и  $n = 5$  (см. также рис. 4).

### Заключение

В настоящее время основной методологической концепцией повышения качества искусственных сложных объектов является воспроизведение в них механизмов, обеспечивающих аналогичные свойства в живых системах.

Одним из таких свойств является способность экологических систем к устойчивому функционированию и самовосстановлению в неблагоприятных условиях существования.

Выдвигается тезис о том, что указанное свойство возникает в сложных системах в результате существования в них замкнутого цикла преобразования и переноса вещества и энергии. Такой цикл реализуется двумя взаимосвязанными механизмами:

процессом восстановления ресурсов, завершивших период своего активного использования системой;

процессом создания внутреннего резерва ресурсов, готовых при необходимости к включению в процесс функционирования системы, т.е. к возобновлению её полной работоспособности.

Математическое описание этих механизмов целесообразно осуществить в классе стохастических моделей с непрерывным временем. В качестве такой модели был использован однородный марковский процесс без последствия с дискретными состояниями.

Найденные аналитические выражения для финальных вероятностей состояний замкнутой системы позволили получить количественные оценки основного показателя её эффективности: вероятности полного функционирования с максимальным количеством используемых активных ресурсов.

Проведённый сопоставительный анализ зависимости этого показателя от управляющих параметров системы показал, что по сравнению с числом каналов и интенсивностью восстановления результативность введения в систему внутренних ресурсов является преобладающей и обеспечивает заданные показатели качества системы при одновременном снижении требований к другим управляющим параметрам.

### Литература

1. Cope E.D. The primary factors of organic evolution. Sydney: Wentworth Press, 2016. 588 p.
2. Convention on biological diversity. Treaty Series. United Nations. 2001. V.1760. I. Nos. 30690. P. 79-307.
3. Structural asymmetry and the stability of diverse food webs / N. Rooney, K. McCann, G. Gellner, J. C. Moore // *Nature*. 2006. V. 442. P. 265-269.
4. Редько В.Г. Эволюция, нейронные сети, интеллект: модели и концепции эволюционной кибернетики. М.: Либроком, 2013. 224 с.
5. Подвальный С.Л. Многоальтернативные системы: обзор и классификация // *Системы управления и информационные технологии*. 2012. № 2. С. 4-13.
6. Подвальный С.Л., Васильев Е.М. Концепция многоальтернативного управления открытыми системами: истоки, состояние и перспективы // *Вестник Воронежского государственного технического университета*. 2013. Т. 8. № 2. С. 4-20.
7. Подвальный С.Л., Васильев Е.М. Концепция многоальтернативности в живых и неживых структурах // *Онтология проектирования*. 2016. Т. 6. № 3(21). С. 355-367.
8. Колесников А.А. Синергетическая теория управления: концепция, методы, тенденции развития // *Известия Южного федерального университета. Технические науки*. 2001. Т. 23. № 5. С. 7-27.
9. Подвальный С.Л., Васильев Е.М. Концепция многоальтернативности в синергетической теории управления // *Математические методы в технике и технологиях: сб. тр. междунар. науч. конф. «ММТТ-30»*. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2017. Т. 7. С. 13-16.
10. Павлов Д.С., Букварева Е.Н. Биоразнообразие, экосистемные функции и жизнеобеспечение человечества // *Вестник РАН*. 2007. Т. 77. № 11. С. 974-986.
11. Алещенко Г.М., Букварева Е.Н. Двухуровневая иерархическая модель оптимизации биологического разнообразия // *Известия РАН. Серия биологическая*. 2010. № 1. С. 5-15.
12. Подвальный С.Л., Васильев Е.М. Многоальтернативность: эволюционная стратегия биологических систем // *Управление большими системами*. 2019. Вып. 77. С. 125-170.
13. Нейман Дж. Фон. Теория самовоспроизводящихся автоматов. М.: URSS, 2010. 384 с.
14. The Circular Economy – a new sustainability paradigm? / M. Geissdoerfer, P. Savaget, N. Bocken, E. Hultink // *Journal of Cleaner Productio*. 2017. № 143 (1). P. 757-768.
15. Garcia-Barragan J.F., Eyckmans J., Rousseau S. Defining and measuring the circular economy: a mathematical approach // *Ecological Economics*. 2019. № 157. P. 369-372.
16. Переработка отработавшего ядерного топлива и рециклирование ядерных материалов в двухкомпонентной ядерной энергетике / Е.О. Адамов, Ю.С. Мочалов, В.И. Рачков, Ю.С. Хомяков, В.А. Кашеев, А.В. Хаперская, А.Ю. Шадрин // *Атомная энергия*. 2021. Т. 130. № 1. С. 28-34.
17. Короткова Е.А., Бабакова Е.В. Основные направления и разработки безотходной и малоотходной технологии в металлургии // *Экология и безопасность в техносфере: современные проблемы и пути решения: сб. тр. Всерос. науч.-практ. конф. Томск: Изд-во ТПУ, 2017. С. 26-29.*
18. Олейникова С.А. Математические модели и методы оптимизации функционирования сложных обслуживающих систем со стохастическими параметрами: дис. ... д-ра техн. наук. Воронеж, 2016. 354 с.
19. Олейникова С.А., Селищев И.А. Имитационная модель для анализа вероятностно-временных характеристик длительности выполнения комплекса работ // *Вестник Воронежского государственного технического университета*. 2021. Т. 17. № 2. С. 42-47.

20. Вентцель Е.С. Исследование операций: задачи, принципы, методология. М.: КНОРУС, 2013. 192 с.

Поступила 05.08.2021; принята 19.10.2021

#### Информация об авторах

**Подвальный Семён 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. (473) 243-77-18

**Логунов Данила Васильевич** – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: danilalogunov13@gmail.com, тел. (473) 243-77-20

**Васильев Евгений Михайлович** – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: vgtu-aits@yandex.ru, тел. (473) 243-77-20

## SIMULATION AND CONTROL OF CLOSED-LOOP SYSTEMS WITH INTERNAL RESERVES

S.L. Podvalny, D.V. Logunov, E.M. Vasil'ev

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

**Abstract:** here we consider the problem of reproduction of the ability of natural systems to self-repair in artificial objects due to the existence of a closed loop of matter and energy in them. We show that the creation of a closed life cycle in the system presupposes the implementation of the process of restoring resources and their accumulation in the form of internal reserves consumed by the system in unfavorable conditions of existence. We obtained a functional diagram of a closed-loop system and proposed a mathematical model of its functioning in the form of a discrete homogeneous Markov process without aftereffect. We found that the introduction of internal redundancy into the system requires consideration of two alternative options for the system model: the option for the case in which the volume of reserves is limited by the capabilities of the recovery channels in the system, and the option in which the specified limitation is absent. We compiled the graphs of the states of the system for the specified modes of operation and obtained expressions for the final probabilities of these states. On the basis of the obtained final probabilities, we got analytical design ratios for the characteristics of the efficiency of a system with a closed loop. As the main characteristic of the efficiency of such systems, we propose to use the probability of the complete functioning of the system, i.e. the probability of its work using the entire volume of active resources. We present a numerical example that confirms the performance of the proposed model, and carried out a comparative analysis of options for managing the efficiency of a closed-loop system by changing the volume of reserves, the number of recovery processes and the intensity of these processes. We revealed the dominant value of internal reserves while ensuring the specified performance indicators of a closed-loop system

**Key words:** closed-loop systems, internal reserves, self-healing systems, Markov processes

#### References

1. Cope E.D. "The primary factors of organic evolution", Sydney, Wentworth Press, 2016, 588 p.
2. "Convention on biological diversity", Treaty Series, United Nations, 2001, vol. 1760, no. 30690, pp. 79-307.
3. Rooney N., McCann K., Gellner G., Moore J.C. "Structural asymmetry and the stability of diverse food webs", *Nature*, 2006, vol. 442, pp. 265-269.
4. Red'ko V.G. "Evolution, neural networks, intelligence: models and concepts of evolutionary cybernetics" ("Evolutsiya, neyronnye seti, intellekt: modeli i kontseptsii evolyutsionnoy kibernetiki"), Moscow, Librokom, 2013, 224 p.
5. Podvalny S.L. "Multi-alternative systems: overview and classification", *Control Systems and Information Technology (Sistemy upravleniya i informatsionnye tekhnologii)*, 2012, no. 2, pp. 4-13.
6. Podvalny S.L., Vasil'ev E.M. "The concept of multi-alternative control of open systems: origins, state and prospects", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2013, vol. 8, no. 2, pp.4-20.
7. Podvalny S.L., Vasil'ev E.M. "The concept of multi-alternative in living and non-living structures", *Design Ontology (Ontologiya proektirovaniya)*, 2016, vol. 6, no. 3(21), pp. 355-367.
8. Kolesnikov A.A. "Synergetic control theory: concept, methods, development trends", *Bulletin of Southern Federal University. Technical Science (Izvestiya Yuzhnogo federal'nogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki)*, 2001, vol. 23, no 5, pp. 7-27.
9. Podvalny S.L., Vasil'ev E.M. "The concept of multi-alternativeness in synergetic control theory", *Proc.s of the Intern. Scientific. Conf.: Mathematical Methods in Engineering and Technology. "MMTT-30" (Matematicheskie metody v tekhnike i tekhnologiyakh: sb. tr. mezhdunar. nauch. konf. «MMTT-30»)*, St. Petersburg, Publishing house of the Polytechnic University, 2017, vol. 7, pp. 13-16.
10. Pavlov D.S., Bukhareva E.N. "Biodiversity, ecosystem functions and human livelihoods", *Bulletin of RAS (Vestnik RAN)*, 2007, vol. 77, no. 11, pp. 974-986.
11. Aleshchenko G.M., Bukhareva E.N. "Two-level hierarchical model for optimizing biological diversity", *Bulletin of RAS. Biological Series. (Izvestiya RAN. Seriya biologicheskaya)*, 2010, no. 1, pp. 5-15.
12. Podvalny S.L., Vasil'ev E.M. "Multiple alternatives: evolutionary strategy of biological systems", *Large-Scale Systems Control (Upravlenie bol'shimi sistemami)*, 2019, no. 77, pp. 125-170.

13. Neyman D.F. “The theory of self-replicating automata” (“Teoriya samovosproizvodyashchikhsya avtomatov”), Moscow, URSS, 2010, 384 p.
14. Geissdoerfer M., Savaget P., Bocken N., Hultink E. “The Circular Economy – A new sustainability paradigm?”, *Journal of Cleaner Productio*, 2017, no. 143 (1), pp. 757-768.
15. Garcia-Barragan J.F., Eyckmans J., Rousseau S. “Defining and measuring the circular economy: a mathematical approach”, *Ecological Economics*, 2019, no.157, pp. 369-372.
16. Adamov E.O., Mochalov Yu.S., Rachkov V.I., Khomyakov Yu.S., Kashcheev V.A., Khaperskaya A.V., Shadrin A.Yu. “Spent nuclear fuel reprocessing and recycling of nuclear materials in two-component nuclear power”, *Atomic Power (Atomnaya energiya)*, 2021, vol. 130, no. 1, pp. 28-34.
17. Korotkova E.A., Babakova E.V. “The main directions and development of waste-free and low-waste technologies in metallurgy”, *Proc. of the Scientific and Practical Conf.: Ecology and Safety in the Technosphere: Modern Problems and Solutions (Ekologiya i bezopasnost' v tekhnosfere: sovremennye problemy i puti resheniya, sb. tr. nauch.-prakt. konf.)*, Tomsk Polytechnic University, 2017, pp. 26-29.
18. Oleynikova S.A. “Mathematical models and methods for optimizing the functioning of complex service systems with stochastic parameters” (“Matematicheskie modeli i metody optimizatsii funktsionirovaniya slozhnykh obsluzhivaushchikh system so stokhasticheskimi parametrami”), Dr. Tech. Sci. diss., Voronezh, 2016, 354 p.
19. Oleynikova S.A., Selishchev I.A. “Simulation model for analyzing probability-time characteristics of the duration of a set of tasks”, *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2021, vol. 17, no. 2, pp. 42-47.
20. Ventzel' E.S. “Operations research: objectives, principles, methodology” (“Issledovanie operatsiy: zadachi, printsipy, metodologiya”), Moscow, Knorus, 2013, 192 p.

Submitted 05.08.2021; revised 19.10.2021

#### Information about the authors

**Semyen L. Podvalny**, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya, Voronezh 394006, Russia), e-mail: spodvalny@yandex.ru, tel. (473) 243-77-20

**Danila V. Logunov**, student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya, Voronezh 394006, Russia), e-mail: danilalogunov13@gmail.com, tel. (473) 243-77-20

**Evgeniy M. Vasil'ev**, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya, Voronezh 394006, Russia), e-mail: vgtu-aits@yandex.ru, tel. (473) 243-77-20

## ОЦЕНКА ДИНАМИКИ ВКЛАДОВ ФАКТОРОВ В ЛИНЕЙНОЙ РЕГРЕССИОННОЙ МОДЕЛИ

С.И. Носков

Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Россия

**Аннотация:** разработаны две алгоритмические схемы оценивания параметров линейной регрессии с требованием равенства нулю ошибки аппроксимации для заданного наблюдения и на их основе способы расчета динамических оценок вкладов факторов, входящих в состав правой части линейной регрессионной модели, в значения зависимой переменной. Одна из этих схем основана на решении задачи квадратичного программирования, а вторая предусматривает использование взвешенного метода наименьших квадратов. Организованный при этом итерационный процесс предполагает пересчет матрицы весовых коэффициентов для каждого наблюдения обрабатываемой выборки данных. Рассчитаны вклады следующих факторов для регрессионной модели погрузки на железнодорожном транспорте: объема добычи угля, объема вывезенной древесины, рабочего парка груженых железнодорожных вагонов (в среднем в сутки). Установлено, что наибольшее влияние на выходную переменную оказывает объем добычи угля, хотя это влияние и имеет некоторую общую тенденцию к снижению: почти на 4 пункта за 14 лет. Также несколько ослабевает, на 3 пункта, влияние и второго по значимости фактора - рабочего парка груженых железнодорожных вагонов. А наименее значимый показатель (объем вывезенной древесины) имеет явную тенденцию к усилению своего влияния, которое выросло почти на 7 пунктов

**Ключевые слова:** регрессионная модель, метод наименьших квадратов, значимость предикторов, вклады факторов, погрузка, железнодорожный транспорт

### Введение

Одним из важных направлений практического применения регрессионных моделей является выявление с их помощью относительной значимости независимых переменных (предикторов) по отношению к их совместному совокупному влиянию на выходной фактор (зависимую переменную). Этот аспект активно изучается в научной литературе. Так, в работе [1] изучается количественная оценка статистической значимости коэффициентов регрессии при использовании полиномиальной аппроксимации экспериментальных данных о слабых поляризационных откликах магнитных наножидкостей. С помощью проверки некоторых статистических гипотез исследована значимость коэффициентов корреляции между объясняющей переменной (в данном случае - значениями магнитного поля) и выходной переменной (поляризационными магнитооптическими откликами). Рассчитана статистическая значимость коэффициентов аппроксимирующих полиномов различных степеней. Приведены результаты оценок ошибок регрессии для наножидкостей разных концентраций. В работе [2] изучалось сравнительное влияние дорожных концентраций вредных веществ, температуры, относительной влажности, времени

суток и настроек вентиляции на концентрацию т.н. твердых частиц в кабине транспортного средства. В [3] рассмотрены модели показателей надежности работы одноковшовых экскаваторов, представлен анализ методов исследования влияния одной или нескольких независимых переменных на выходной фактор. Обработанная статистическая информация позволила построить регрессионные уравнения и определить значимость предикторов моделей. В [4] исследуются математические методы и модели поддержки принятия решений в области обеспечения энергетической эффективности работы котельных установок. Описаны основные этапы отбора значимых независимых переменных множественной линейной регрессионной модели расхода натурального топлива для выработки теплоты в котельных установках. Разработаны адекватные математические модели котельных установок. Оценена применимость моделей.

Некоторые важные аспекты в исследовании уровня значимости предикторов в их влиянии на эндогенные переменные в регрессионных моделях с применением строгого математического аппарата отражены в работах [5-7], в которых исследуются полностью связанные, степенно-показательные и линейно-неэлементарные формы связи между предикторами.

В настоящей работе значимость независимых переменных формализуется посред-

ством введения так называемых вкладов факторов в правые части линейных по параметрам регрессионных моделей и последующей динамизации этих вкладов.

### Динамизация оценок вкладов предикторов в линейной регрессии

Пусть поведение изучаемого динамического фактора (зависимой переменной) у определяется изменяющимися во времени значениями независимых переменных (предикторов)  $x_i$ ,  $i = \overline{1, m}$  и характер этого влияния таков, что оно может быть адекватно описано линейным регрессионным уравнением вида:

$$y_k = \alpha_0 + \sum_{i=1}^m \alpha_i x_{ki} + \varepsilon_k, k = \overline{1, n}, \quad (1)$$

где  $\alpha_i$  –  $i$ -й подлежащий оцениванию параметр,  $i = \overline{0, m}$ ;  $\varepsilon_k$  – ошибки аппроксимации,  $k$  – номер наблюдения,  $n$  – число наблюдений (длина динамических рядов выборки).

Для удобства последующего изложения представим уравнение (1) в векторной форме:

$$y = X\alpha + \varepsilon, \quad (2)$$

где  $y = (y_1, \dots, y_n)^T$ ,  $\alpha = (\alpha_0, \dots, \alpha_m)^T$ ,  $\varepsilon = (\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_n)^T$ ,  $X = (n \times (m + 1))$  – матрица с компонентами  $x_{ki}$ , первый столбец которой состоит из единиц в виду присутствия в уравнении (1) свободного члена. Выборка – пара  $(X, y)$  – считается заданной.

Заметим, что в настоящей работе мы будем оставаться в рамках логико-алгебраического (аппроксимационного) (см., например, [8-11]) подхода к анализу данных, то есть считать вектора  $y, \alpha, \varepsilon$  детерминированными.

Как уже отмечалось выше, важным элементом анализа регрессионной модели (1) является выявление уровней значимости независимых переменных для переменной  $y$ . В работе [11] в качестве возможных измерителей этих уровней предложено использовать оценки вклада в значения зависимой переменной каждого фактора, входящего в правую часть описывающей ее модели (1), указывающие на степень влияния каждого из них.

Этот вклад для некоторой  $i$ -й переменной в (1) можно оценить по формуле:

$$p(x_i) = 100\% |\alpha_i x_i^*| / \sum_{j=1}^m |\alpha_j x_j^*|, \quad (3)$$

где  $x_j^* = \max_k x_{kj}$ .

Разумеется, вклады факторов можно оценивать по отношению не ко всем  $m$  переменным, а лишь к их выбранной некоторой подсовкупности.

Формула (3) позволяет вычислять вклад каждого фактора в целом по выборке. Однако очевидно, что, если она имеет динамический характер, вклад каждого фактора в общем случае меняется с течением времени. Для того, чтобы это изменение можно было бы учесть, применим следующий подход.

Пусть для оценивания вектора параметров  $\alpha$  в модели (2) используется метод наименьших квадратов (МНК). Тогда для того, чтобы рассчитать вклад  $i$ -го фактора для  $k$ -го наблюдения  $p_k(x_i)$ , необходимо вначале решить задачу квадратичного программирования (КП)

$$\tilde{\alpha}^k = \arg \min_{\alpha} \sum_{k=1}^n \varepsilon_k^2 \quad (4)$$

при ограничении

$$y_k = \alpha_0 + \sum_{i=1}^m \alpha_i x_{ki}, \quad (5)$$

а затем вместо (3) воспользоваться формулой

$$p_k(x_i) = 100\% |\tilde{\alpha}_i^k x_{ki}| / \sum_{j=1}^m |\tilde{\alpha}_j^k x_{kj}|. \quad (6)$$

Задача (4)–(5) по существу предполагает поиск МНК-оценки параметров модели (2) с требованием равенства нулю  $k$ -ой ошибки аппроксимации. Значение  $p_k(x_i)$  представляет собой оценку вклада  $i$ -го фактора для  $k$ -го наблюдения.

Вместо решения задачи КП (4)–(5) можно воспользоваться взвешенным методом наименьших квадратов (ВМНК), рассчитав вектор  $\tilde{\alpha}^k$  по формуле:

$$\tilde{\alpha}^k = (X^T \Omega^k X)^{-1} X^T \Omega^k y, \quad (7)$$

где  $\Omega^k$  – диагональная матрица размерности  $n \times n$ , в которой  $k$ -й диагональный элемент равен большому положительному числу, а остальные – единице.

Анализ значений  $p_k(x_i)$ ,  $k = \overline{1, n}$  позволяет выявить динамику в изменении вклада каждого  $i$ -го фактора на всем периоде наблюдений, что бывает весьма важным при решении различных практических задач, связанных с моделированием.

### Динамическая оценка вкладов факторов в регрессионной модели погрузки на железнодорожном транспорте

В работе [12] приведена регрессионная модель погрузки на железнодорожном транспорте в Российской Федерации, параметры которой оценены с помощью МНК и метода смешанного оценивания, а в качестве информационной базы использована статистическая информация за 2005-2018 годы (т.е.  $n=14$ ).

В модели задействованы следующие переменные:

$y$  – объем погрузки основных видов грузов на железнодорожном транспорте, тыс. тонн;

$x_1$  – объем добычи угля, млн. т.;

$x_2$  – объем вывезенной древесины, млн. плотн. м<sup>3</sup>;

$x_3$  – рабочий парк груженых железнодорожных вагонов (в среднем в сутки), тыс. шт.

Модель с МНК-оценками параметров имеет вид [12]:

$$y = 391776 - 32287.2t + 1996.59x_1 + 420.7x_2 + 2082.47x_3, \quad E = 2.9. \quad (8)$$

Здесь  $t$  – время ( $t=5$  для 2005 года),  $E$  – средняя относительная ошибка аппроксимации (в %).

Оценим вклады факторов  $x_i$   $i = \overline{1,3}$  по формуле (3), исключив при этом фактор времени, поскольку он, как и свободный член, не несет существенной смысловой нагрузки и выполняет в данном случае только сглаживающую функцию:

$$p(x_1) = 61.4;$$

$$p(x_2) = 15.2;$$

$$p(x_3) = 23.4.$$

Напомним, эти оценки вкладов соответствуют средним тенденциям влияния соответствующих факторов на выходной показатель, которые имеют место на всей выборке данных в целом.

Теперь пересчитаем оценки векторов параметров модели (8), воспользовавшись формулой (7) для первого и последнего наблюдений выборки, и вычислим соответствующие получившимся моделям вклады.

а) Первое наблюдение,  $t = 5, k = 1$ .

$\tilde{\alpha}^1 = (487839, -24099.8, 1508.4, 341.8, 2349.7), E = 1.4\%$ .

$$p_1(x_1) = 56.9;$$

$$p_1(x_2) = 11.1;$$

$$p_1(x_3) = 32.$$

б) Последнее наблюдение,  $t = 18, k = 14$ .

$\tilde{\alpha}^{14} = (579208, -28628.2, 1382.5, 444.9, 2217.8), E = 1.5\%$ .

$$p_{14}(x_1) = 53.1;$$

$$p_{14}(x_2) = 17.9;$$

$$p_{14}(x_3) = 29.$$

Анализ трех вариантов модели погрузки на железнодорожном транспорте и значений вкладов факторов для них показывает, что наибольшее влияние на выходную переменную оказывает объем добычи угля, хотя это влияние и имеет некоторую общую тенденцию к снижению – почти на 4 пункта за 14 лет. Также несколько ослабевает, на 3 пункта, влияние и второго по значимости фактора – рабочего парка груженых железнодорожных вагонов. А вот наименее значимый показатель – объем вывезенной древесины, – имеет явную тенденцию к усилению своего влияния, которое выросло почти на 7 пунктов.

Отметим также, что все три варианта характеризуются высокой адекватностью, на что указывают значения средней относительной ошибки аппроксимации.

### Заключение

В работе рассмотрен способ динамической оценки вкладов факторов, входящих в состав правой части линейной регрессионной модели.

Получены следующие результаты.

1. Разработаны две алгоритмические схемы оценивания параметров линейной регрессии с требованием равенства нулю ошибки аппроксимации для заданного наблюдения.

2. Предложен способ уточнения формулы для расчета динамических оценок вкладов факторов.

3. Рассчитаны вклады факторов для регрессионной модели погрузки на железнодорожном транспорте.

### Литература

1. О подобию поляризации оптических откликов магнитных наножидкостей. Ч. I. Аппроксимация для слабых полей / Я.А. Фофанов, В.В. Манойлов, И.В. Заруцкий, Б.В. Бардин // Научное приборостроение. 2018. Т. 28. № 1. С. 45-52.
2. Variations in exposure to in-vehicle particle mass and number concentrations in different road environments / Z. Qiu, W. Liu, H.O. Gao, J. Li // Journal of the Air and Waste Management Association. 2019. Т. 69. № 8. P. 988-1002.
3. Модели технической надежности одноковшовых экскаваторов / С.М. Кузнецов, Н.А. Шипилова, Е.А. Иванова, Ю.О. Заика // Электронный сетевой политематический журнал "Научные труды КубГТУ". 2019. № 5. С. 37-43.

4. Максимюк Е.В., Микшина В.С. Математическое моделирование для поддержки принятия решений в области обеспечения энергетической эффективности // *Качество. Инновации. Образование*. 2014. № 8 (111). С. 54-63.

5. Базилевский М.П. Многокритериальный подход к построению двухфакторных полносвязных регрессий на примере моделирования ВВП России // *Вестник Воронежского государственного университета*. Серия: Системный анализ и информационные технологии. 2020. № 1. С. 99-109.

6. Базилевский М.П. Построение степенно-показательных регрессионных моделей и их интерпретация // *Вестник Воронежского государственного университета*. Серия: Системный анализ и информационные технологии. 2020. № 4. С. 19-28.

7. Базилевский М.П. Оценивание линейно-нелинейных регрессионных моделей с помощью метода наименьших квадратов // *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2020. Т. 8. № 4 (31). С. 26-27.

8. Айвазян С.А., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д. *Прикладная статистика. Основы моделирования и первичная обработка данных*. М.: Финансы и статистика, 1983. 472 с.

9. Айвазян С.А., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д. *Прикладная статистика. Исследование зависимостей*. М.: Финансы и статистика, 1985. 488 с.

10. Айвазян С.А., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д. *Прикладная статистика. Классификация и снижение размерности*. М.: Финансы и статистика, 1989. 607 с.

11. Носков С.И. Технология моделирования объектов с нестабильным функционированием и неопределенностью в данных. Иркутск: Облформпечать. 1996. 320 с.

12. Носков С.И., Перфильева К.С. Моделирование объема погрузки на железнодорожном транспорте методом смешанного оценивания // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2021. № 2. С. 148-153.

Поступила 09.08.2021; принята 19.10.2021

#### Информация об авторах

**Носков Сергей Иванович** – д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры «Информационные системы и защита информации», Иркутский государственный университет путей сообщения (664074, Россия, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15), e-mail: sergey.noskov.57@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4097-2720>

## ESTIMATION OF THE DYNAMICS OF FACTOR CONTRIBUTIONS IN A LINEAR REGRESSION MODEL

S.I. Noskov

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia

**Abstract:** I developed two algorithmic schemes for estimating the parameters of linear regression with the requirement that the approximation error for a given observation is zero and, on their basis, methods for calculating the dynamic estimates of the contributions of the factors included in the right side of the linear regression model to the values of the dependent variable. One of these schemes is based on solving a quadratic programming problem, and the second involves the use of a weighted least squares method. The iterative process organized in this case involves recalculating the matrix of weighting coefficients for each observation of the processed data sample. I calculated the contributions of the following factors for the regression model of loading on railway transport: the volume of coal production, the volume of exported timber, the working fleet of loaded railway cars (on average per day). I found that the largest influence on the output variable is exerted by the volume of coal production, although this influence has some general tendency to decrease - by almost 4 points over 14 years. Also, the influence of the second most important factor - the working fleet of loaded railway cars, is also weakening by 3 points. But the least significant indicator - the volume of exported timber - has a clear tendency to increase its influence, which has grown by almost 7 points

**Key words:** regression model, least squares method, significance of predictors, contributions of factors, loading, rail transport

#### References

1. Fofanov Ya.A., Manoylov V.V., Zarutskiy I.V., Bardin B.V. "On the similarity of polarization-optical responses of magnetic nanofluids. Part I. Approximation for weak fields", *Scientific Instrument Engineering (Nauchnoe priborostroenie)*, 2018, vol. 28, no. 1, pp. 45-52.
2. Qiu Z., Liu W., Gao H.O., Li J. "Variations in exposure to in-vehicle particle mass and number concentrations in different road environments", *Journal of the Air and Waste Management Association*, 2019, vol. 69, no. 8, pp. 988-1002.
3. Kuznetsov S.M., Shipilova N.A., Ivanova E.A., Zaika Yu.O. "Models of technical reliability of single-bucket excavators", *Electronic network polythematic journal "Scientific works of KubGTU" (Elektronnyy setevoy politematicheskiy zhurnal "Nauchnye trudy KubGTU")*, 2019, no. 5, pp. 37-43.
4. Maksimyuk E.V., Mikshina V.S. "Mathematical modeling to support decision making in the field of energy efficiency", *Quality. Innovation. Education (Kachestvo. Innovatsii. Obrazovanie)*, 2014, no. 8 (111), pp. 54-63.

5. Bazilevskiy M.P. "Multicriteria approach to constructing two-factor fully connected regressions on the example of Russian GDP modeling", *Bulletin of Voronezh State University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta)*, 2020, no. 1, pp. 99-109.
6. Bazilevskiy M.P. "Construction of exponential regression models and their interpretation", *Bulletin of Voronezh State University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta)*, 2020, no. 4, pp. 19-28.
7. Bazilevskiy M.P. "Estimation of linear non-elementary regression models using the least squares method", *Modeling, Optimization and Information Technologies (Modelirovanie, optimizatsiya i informatsionnye tekhnologii)*, 2020, vol. 8, no. 4 (31), pp. 26-27.
8. Ayvazyan S.A., Enyukov I.S., Meshalkiy L.D. "Applied statistics. Basics of modeling and primary data processing" ("Prikladnaya statistika. Osnovy modelirovaniya i pervichnaya obrabotka dannykh"), Moscow: Finansy I statistika, 1983, 472 p.
9. Ayvazyan S.A., Enyukov I.S., Meshalkiy L.D. "Applied statistics. Dependency research" ("Prikladnaya statistika. Issledovanie zavisimostey"), Moscow: Finansy I statistika, 1985, 488 p.
10. Ayvazyan S.A., Enyukov I.S., Meshalkin L.D. "Applied statistics. Classification and dimensionality reduction" ("Prikladnaya statistika. Klassifikatsiya i snizhenie razmernosti"), Moscow: Finansy I statistika, 1989, 607 p.
11. Noskov S.I. "A technology for modeling objects with unstable functioning and uncertainty in the data" ("Tekhnologiya modelirovaniya ob"ektov s nestabil'nym funktsionirovaniem i neopredelennost'yu v dannykh"), Irkutsk: Oblinformpechat, 1996, 320 p.
12. Noskov S.I., Perfil'eva K.S. "Modeling the volume of loading on railway transport by the method of mixed estimation", *News of Tula State University (Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta)*, 2021, no. 2, pp. 148-153.

Submitted 09.08.2021; revised 19.10.2021

#### Information about the author

**Sergey I. Noskov**, Dr. Sc. (Technical), Professor, Irkutsk State Transport University (15 Chernyshevskogo str., Irkutsk 664074, Russia), e-mail: sergey.noskov.57@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4097-2720>

**ФОРМИРОВАНИЕ СКАНИРУЮЩЕЙ АНТЕННЫ НА ОСНОВЕ ПОЛУВОЛНОВОГО ДИПОЛЯ**С.М. Фёдоров<sup>1,2</sup>, Е.А. Ищенко<sup>1</sup>, И.А. Баранников<sup>1</sup>, К.А. Бердников<sup>1</sup>, В.В. Кузнецова<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 полуволновый диполь с установленным рефлектором, который позволяет производить сканирование пространства с использованием вращения рефлектора вокруг диполя. Для полученной конструкции производилось моделирование основных параметров, которые показали высокую стабильность при различных положениях рефлектора, постоянное значение коэффициента направленного действия, ширины главного лепестка. Изменение направления излучения совпадает с текущим положением рефлектора. По сравнению с ситуацией, когда у антенны отсутствовал рефлектор, КНД антенны увеличился, так как произошла фокусировка электромагнитных волн. Коэффициент полезного действия и передне-заднее отношение сохраняют высокие значения во всем диапазоне рабочих частот. Применение предложенной конструкции позволяет упростить конструкцию сканирующих антенн, так как для ее реализации требуются лишь полуволновый диполь и плоский рефлектор, установленный на малом расстоянии от источника излучения. В процессе управления характеристиками требуется вращать рефлектор вокруг диполя, при этом диполь остается неподвижным, что позволяет повысить эффективность предложенной конструкции, так как не требуется формировать сложных антенных систем или устанавливать комбинацию из нескольких антенн для фокусировки излучения в одном направлении от источника

**Ключевые слова:** рефлектор, полуволновой диполь, сканирующая антенна

**Введение**

Дипольная антенна является самой простой по конструкции, однако ее диаграмма направленности является всенаправленной (представляет собой тороид) [1].

Особый интерес представляет возможность формирования сканирующей антенны на основе дипольной антенны, что позволяет снизить стоимость и сложность конструкции. Для формирования диаграммы направленности с определенным направлением применяются рефлекторы для антенн, пример такой конструкции рассмотрен в работе [2], однако данная антенна не имеет возможности выполнить сканирование пространства, так как помимо простого рефлектора имеет слой из ячеек метаматериала.

Другим примером использования полуволнового диполя в качестве сканирующего устройства выступает комбинация из рамочной антенны и диполя [3], которые совместно формируют диаграмму в форме кардиоиды.

Целью данной работы является разработка антенны на основе полуволнового диполя с

возможностью выполнения активного сканирования в горизонтальной плоскости.

**Конструкция антенны**

Полуволновая цилиндрическая антенна является простейшей конструкцией, которая формируется из двух отрезков медного провода (рис. 1).

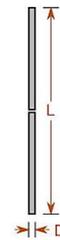


Рис. 1. Модель полуволнового излучателя

Полученная антенна имеет диаметр провода ( $D$ ) равный 500 мкм, а полная длина ( $L$ ) составляет 13,9 мм. Данные размеры соответствуют антенне, сформированной для частоты в 9 ГГц. Стандартная антенна без установленного рефлектора имеет диаграмму направленности в виде тороида с КНД 2,17 дБи, которая обеспечивает равномерное излучение в горизонталь-

ной плоскости, в вертикальной же диаграмма направленности представляет цифру «8».

При выполнении сканирования требуется сформировать направленный луч, что позволяет определить направление прихода электромагнитных волн или произвести излучение энергии в определённом направлении.

Для формирования направленной диаграммы направленности был установлен рефлектор около дипольной антенны, который формирует фокусировку электромагнитных волн благодаря возникающим отражениям от металлической пластины (рис. 2).

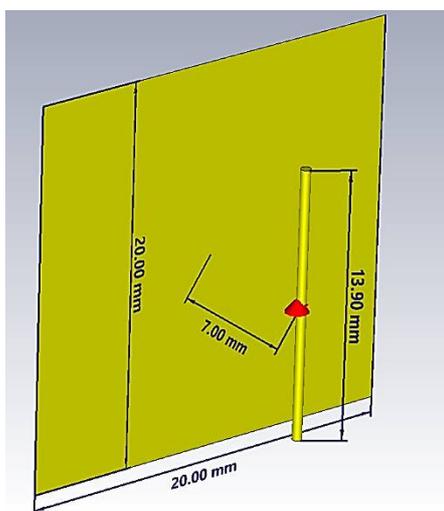


Рис. 2. Модель антенны с установленным рефлектором

Размеры рефлектора составляют 20 на 20 см, рефлектор удален от дипольной антенны на 7 мм. В процессе распространения радиоволн происходит фокусировка диаграммы направленности (рис. 3).

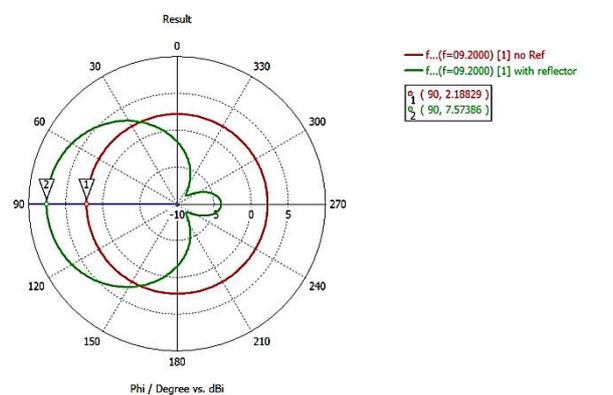


Рис. 3. Сравнение диаграмм направленности антенны (f=9,2 ГГц): no Ref – нет рефлектора; with reflector – с рефлектором

По полученным результатам КНД антенны увеличился с 2,19 дБи до 7,57 дБи, а также произошла фокусировка излучения.

### Применение дипольной антенны с рефлектором для сканирования пространства

Полученная антенна способна изменять направление излучения путем выполнения вращения рефлектора вокруг излучателя (рис. 4).

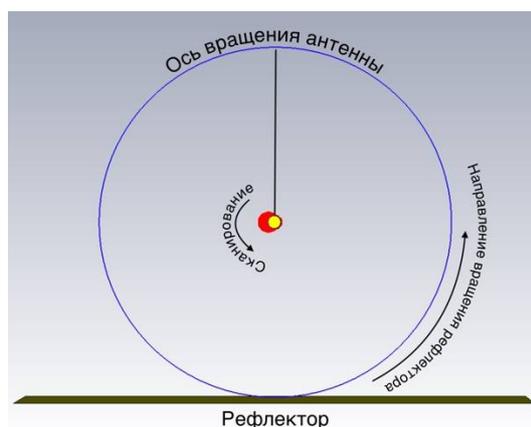


Рис. 4. Конструкция антенны с указанием направления вращения рефлектора и угла сканирования

Для полученной антенны производилось моделирование с изменением угла положения рефлектора в промежутке от 0 до 360 градусов с шагом 30 градусов. Для полученных ситуаций возвратные потери приводятся на рис. 5. Диапазон рабочих частот определяется по уровню  $S_{11}$  параметра -10 дБ (что соответствует уровню КСВН=2).

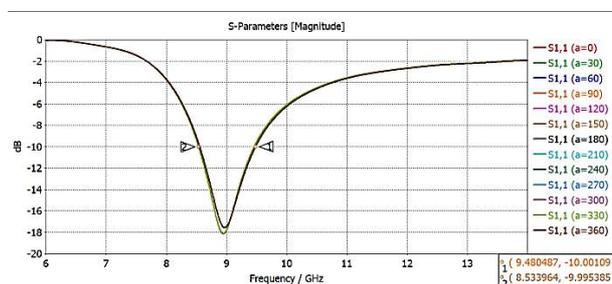


Рис. 5. Конструкция антенны с указанием направления вращения рефлектора и угла сканирования

Полученный рабочий диапазон составляет 0,94 ГГц; при этом параметры коэффициента отражений сохраняются стабильными при изменении угла расположения рефлектора.

Другим важным параметром является уровень КПД антенны при различных углах расположения рефлектора антенны (рис. 6).

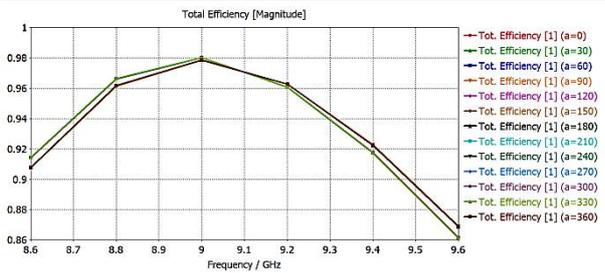


Рис. 6. КПД антенны при различных углах расположения рефлектора

На рис. 7 приводится картина Е-поля на частоте 9,2 ГГц, по которой отчетливо видно, что направление излучения формируется за счет отражения поля от рефлектора и излучения в свободное пространство.

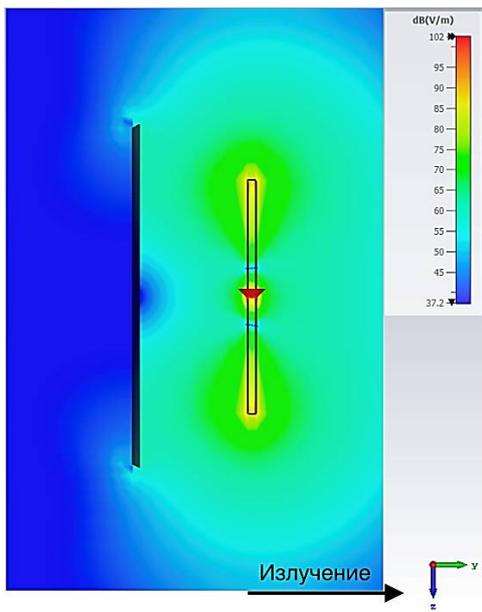


Рис. 7. Картина Е-поля для исследуемой антенны на частоте 9,2 ГГц

На основе полученных результатов были построены диаграммы направленности при различных углах сканирования антенны (рис. 8).

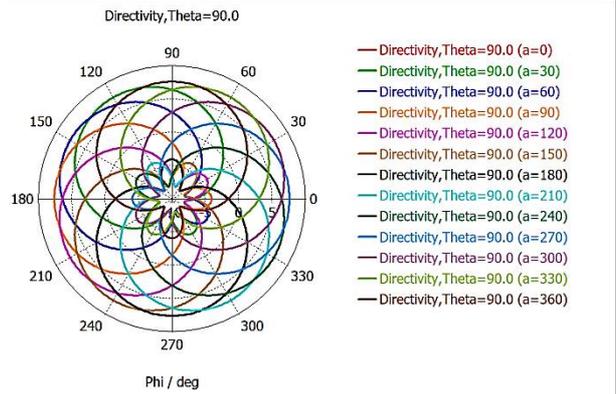


Рис. 8. Диаграммы направленности исследуемой антенны при различных положениях рефлектора

Как видно, антенна способна обеспечить полное сканирование в горизонтальной плоскости за счет вращения рефлектора вокруг диполя. Другим важным параметром выступает передне-заднее отношение в диаграмме направленности, который показывает, на сколько значение КНД в направлении главного излучения больше обратного (рис. 9).

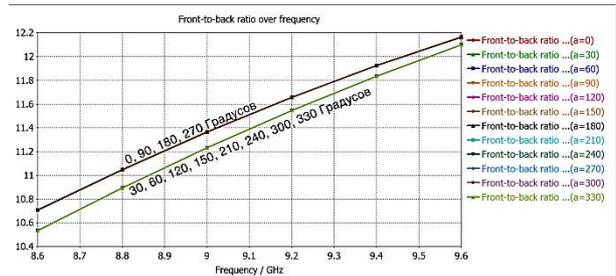


Рис. 9. ПЗО антенны

Как видно по полученным результатам, наблюдаются две отчетливые кривые, которые соответствуют ситуациям, когда рефлектор перпендикулярен диполю (углы: 0°, 90°, 180°, 270°) и имеет иные углы положения рефлектора.

Для удобства анализа полученных результатов воспользуемся табл. 1, в которой указаны характеристики диаграмм направленности в горизонтальной плоскости при различных положениях рефлектора.

Таблица 1

Характеристики диаграмм направленности  $f=9,2$  ГГц

Положение рефлектора, °	КНД, дБи	Направление излучения, °	Ширина главного лепестка, °
0	7,57	90	96
30	7,58	120	96
60	7,58	150	95,9
90	7,57	180	96

Продолжение табл. 1

120	7,58	210	95,9
150	7,58	240	95,9
180	7,57	270	96
210	7,58	300	95,9
240	7,58	330	95,9
270	7,57	0	96
300	7,58	30	95,9
330	7,58	60	96

Как видно по полученным результатам, характеристики диаграмм направленности являются максимально стабильными, что позволяет сделать вывод, что сканирование данной антенной возможно с сохранением основных характеристик диаграммы направленности.

### Заключение

Разработанная конструкция антенны позволяет осуществить сканирование главным лучом антенны в горизонтальной плоскости путем перемещения рефлектора вокруг диполя. Для данной антенны можно разработать несколько модификаций рефлектора, так, воз-

можно использование структуры, которая сформирована из периодических ячеек, другой конструкцией может выступать система, которая сформирована на основе метаматериала, который был предложен в [4], что позволит осуществить управление характеристиками диаграммы направленности за счет выполнения коммутаций слоев метаматериала.

### Литература

1. Constantine A. Balanis, Antenna Theory Analysis and Design, Fourth Edition, Wiley: Canada, 2016. 1073 p.
2. Murakami Y., Hori T., Fujimoto M. Optimum area of arranged unit cell of artificial magnetic conductor reflector for dipole antenna // 2013 Asia-Pacific Microwave Conference Proceedings (APMC). 2013. Pp. 594-596.
3. Володько А.В. Основы теории радиолокационных систем и комплексов: практикум и сборник задач. Воронеж: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», 2018. 160 с.
4. Исследование влияния интегрированного в конструкцию пирамидального рупора метаматериала на диаграмму направленности / Е.А. Ищенко, Ю.Г. Пастернак, М.А. Сиваш, С.М. Фёдоров // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2020. Т. 16. № 6. С. 107-113.

Поступила 02.07.2021; принята к публикации 21.10.2021

### 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>

**Баранников Илья Андреевич** – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), тел. +7(473)243-77-29, e-mail: 8thbar@gmail.com

**Бердников Кирилл Алексеевич** – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), тел. +7(473)243-77-29, e-mail: kir\_ber@mail.ru

**Кузнецова Валерия Васильевна** – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), тел. +7(473)243-77-29, e-mail: lera.kuznetsova.20@bk.ru

## FORMATION OF A SCANNING ANTENNA BASED ON A HALF-WAVE DIPOLE

S.M. Fyedorov<sup>1,2</sup>, E.A. Ishchenko<sup>1</sup>, I.A. Barannikov<sup>1</sup>, K.A. Berdnikov<sup>1</sup>, V.V. Kuznetsova<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 discusses a half-wave dipole with an installed reflector, which allows scanning space using the rotation of the reflector around the dipole. For the resulting structure, we simulated the main parameters, which showed high stability at various positions of the reflector, a constant value of the directivity factor, and the width of the main lobe. The change in the direction of radiation coincides with the current position of the reflector. Compared to the situation when the antenna did not have a reflector, the directivity of the antenna increased since the focusing of electromagnetic waves took place. The efficiency and the front-to-back ratio remain high throughout the entire operating frequency range. The use of the proposed design makes it possible to simplify the design of scanning antennas since the implementation of the proposed design requires only a half-wave dipole and a flat reflector installed at a short distance from the radiation source. In the process of controlling the characteristics, it is required to rotate the reflector around the dipole, while the dipole remains stationary, which makes it pos-

sible to increase the efficiency of the proposed design, since it is not required to form complex antenna systems or install a combination of several antennas to focus radiation in one direction from the source

**Key words:** Reflector, half-wave dipole, scanning antenna

#### References

1. Balanis C.A. “Antenna theory analysis and design”, Canada: Wiley, 2016, 1073 p.
2. Murakami Y., Hori T., Fujimoto M. “Optimum area of arranged unit cell of artificial magnetic conductor reflector for dipole antenna”, *2013 Asia-Pacific Microwave Conference Proceedings (APMC)*, 2013, pp. 594-596.
3. Volodko A.V. “Fundamentals of the theory of radar systems and complexes” (“Osnovy teorii radiolokatsionnykh sistem i kompleksov”), Voronezh State Technical University, 2018, 160 p.
4. Ishchenko E.A., Pasternak Yu.G., Sivash M.A., Fedorov S.M. “Investigation of the influence of the metamaterial pyramidal horn integrated into the construction on the directional diagram”, *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo technicheskogo universiteta)*, 2020, vol. 16, no. 5. pp 107-113.

Submitted 02.07.2021; revised 21.10.2021

#### 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 Solnechanya str., Voronezh 39026, Russia), tel.: +7 (473)243-77-29, 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>

**Il'ya A. Barannikov**, student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel.: +7 (473)243-77-29, e-mail: 8thbar@gmail.com

**Kirill A. Berdnikov**, student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel.: +7 (473)243-77-29, e-mail: kir\_ber@mail.ru

**Valeriya V. Kuznetsova**, student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel.: +7 (473)243-77-29, e-mail: lera.kuznetsova.20@bk.ru

## ОЦЕНКА ПРИМЕНИМОСТИ ТЕХНОЛОГИЙ LORAWAN ДЛЯ ОРГАНИЗАЦИИ РЕЗЕРВНОГО КАНАЛА СВЯЗИ ДЛЯ МЕТЕООБЕСПЕЧЕНИЯ АЭРОДРОМОВ

Д.К. Тунеголовец

Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток, Россия

**Аннотация:** в настоящее время информация о состоянии атмосферы широко используется как при составлении прогнозов погоды, так и при решении многих экономических задач. Существенная особенность метеорологических явлений - их пространственно-временная изменчивость. Это вызывает необходимость такой организации наблюдений, которая позволит своевременно отметить возникновение явления и проследить за ходом его развития. Статистика показывает, что в период с 1997 по 2000 годы произошло порядка 193 авиационных инцидентов, которые обусловлены недостатками метеорологического обеспечения полетов. Поэтому задача повышения качества метеорологического обеспечения является актуальной. На основе модельных и практических экспериментов показано, что беспроводной канал связи LoRaWAN способен объединить весь поток данных, поступающих с удаленных метеорологических датчиков, которые используют разные протоколы для взаимодействия друг с другом. В ходе выполнения эксперимента получены положительные результаты, доказывающие возможность организации таких каналов связи для задач метеообеспечения аэродромов. Также приводится структурная схема для организации канала связи. При этом не требуется прокладка кабельных коммуникаций связи, когда стоимость такого вида работ, включая согласование, зачастую значительно превышает стоимость самого метеорологического оборудования

**Ключевые слова:** LPWAN, метеообеспечение аэродромов, канал связи

### Введение

Ежегодно увеличиваются объемы региональных авиаперевозок, интенсивность полетов повышает требования в организации работы аэропортов согласно требованиям Федеральных Авиационных Правил № 128 (ФАП-128) [1]. Одним из факторов, влияющих на безопасность авиаперелета, является точность и достоверность сведений о состоянии погоды. Наиболее достоверными являются сведения, получаемые от метеорологических датчиков. Высокая стоимость коммутации современных метеодатчиков - прокладка оптического\медного\коаксиального кабелей и сложность в организации каналов связи являются препятствиями к установке таких датчиков. Целью настоящей работы является исследование практической применимости технологии LoRaWAN для задач метеообеспечения региональных аэродромов.

### Объект исследования

Внедрение новых технологий требует анализа возможностей канала связи: объема, скорости передачи данных, достоверности и дальности передачи информации. Кроме этого,

технологии должны удовлетворять общим требованиям по надежности, стабильности работы при высоких уровнях внешних помех и так далее. На рис. 1 представлена структурная схема организации типичного канала связи для обслуживания регионального аэродрома согласно требованиям ФАП-128. Взлетно-посадочная полоса (ВПП) любого аэродрома оснащается системой метеодатчиков, фиксирующей основные параметры состояния атмосферы: видимость, высота нижней границы облачности, направление и скорость ветра, температура, влажность, давление [6]. Датчики размещаются группами, пунктиром обозначены существующие кабельные линии до здания командно-диспетчерского пункта (КДП). Передача измеряемых данных по состоянию атмосферы организуется по каналам связи на основе различных протоколов связи, основным из которых является 7E1.

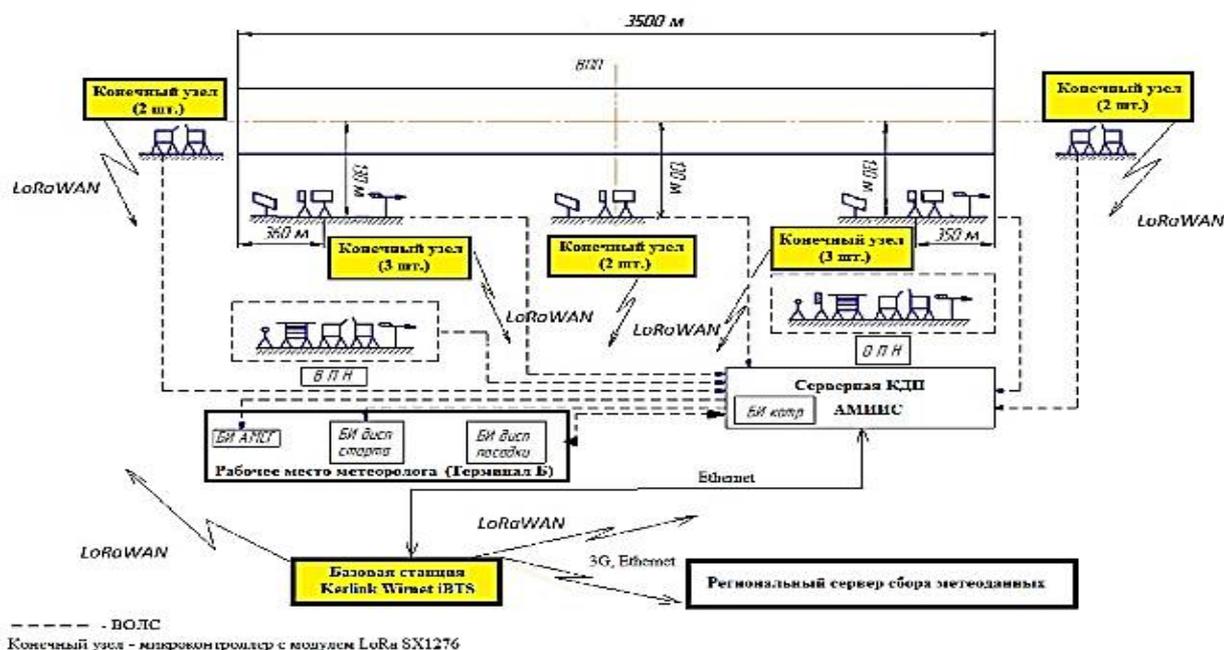


Рис. 1. Структурная схема организации канала связи на ВПП аэродрома

На рис. 1 обозначено:

АМИИС – эродромная метеорологическая информационно-измерительная система,  
 БИ АМСГ – блок индикации аэрологической гражданской метеорологической станции,  
 БИ дисп. старта\БИ дисп. посадки – блок индикации (монитор),  
 БИ контр – блок индикации контроля АМИИС,  
 ВПП\ОПН – вспомогательный\основной пункт наблюдения.

-  – совмещенный датчик для измерения температуры и влажности;
-  – датчик для измерения атмосферного давления;
-  – датчик параметров ветра;
-  – датчик для измерения высоты нижней границы облаков;
-  – прибор для измерения метеорологической дальности видимости;
-  – прибор измерения яркости фона.

Согласно нормативной документации ФАП 128: на аэродромах РФ применяется система АМИИС, предназначенная для проведения автоматических измерений основных ме-

теорологических величин, обработки измеренных результатов, генерации сообщений (сводок погоды) и распространения их по линии связи и на средства отображения, а также регистрации измеренной и переданной метеоинформации [2].

Для организации и разработки резервного канала связи на объектах метеобеспечения аэропорта необходимо оценить три условия:

- Канал связи должен иметь соответствующую пропускную способность для передачи всего объема данных от метеодатчиков, расположенных на ВПП, на сервер обработки. Также необходимо учитывать резерв по пропускной способности, который может потребоваться в будущем при возможной модернизации оборудования. Как правило, в подобных случаях используют двойное резервирование.
- Необходима высокая помехоустойчивость канала связи, поскольку он предназначен для работы в сложной электромагнитной обстановке.
- Требуется обеспечение дальности связи на расстояниях не менее 4 километров.

Проведя анализ метеооборудования, получено, что в аэропортах любой категории используется оборудование, максимальная скорость передачи которого составляет не более 1200 бод (1 бод = 9600 бит/с). Таким образом, с учетом двойного запаса на резерв получено, что требуется канал связи, обеспечивающий пропускную способность не более 20 кбит/с.

Большая часть современных технологий LPWaN обеспечивает такую пропускную способность: LoRa, СТРИЖ, SigFox, Telensa и другие.

На основе анализа спецификаций технологий LPWaN, заявленных заводами-производителями, максимальные пропускные способности таких каналов связи следующие [3]:

- Стриж – 50 бит/с;
- SigFox – 1 кбит/с;
- Dash7 – 167 кбит/с (до 2 км);
- LoRaWaN – 50 кбит/с (до 10 км);
- Nwave – 0,1 кбит/с.

Оценка этого необходимого параметра показывает, что наиболее приемлемой технологией для поставленных целей является LoRaWaN [7]. Что касается помехоустойчивости рассматриваемых технологий, то в условиях сильных помех естественного и антропогенного типа, какими являются помехи в районе современного аэропорта, применение современных видов модуляции типа QAM в сочетании с OFDM не целесообразно, т.к. последние требуют больших энергоресурсов. Таким образом, оптимальным способом достижения требуемой достоверности и скорости передачи данных является один из видов сложной модуляции, которые могут предложить технологии LPWaN, наиболее предпочтительней по данному параметру также является LoRaWaN.

### Оценка дальности связи

Расчет дальности связи выполнялся с учетом рельефа местности на основе модели Лонгли-Райса, использовался верифицированный открытый программный комплекс SPLAT! [5]. Модельный эксперимент по расчету дальности связи основан на следующих предположениях: базовая станция (БС) LoRaWaN размещалась на мачтовом сооружении с координатами 43°08'17" с. ш., 131°54'05" в. д., при этом высота подвеса антенны равнялась 40 м от уровня земли, а с учетом рельефа местности эффективная высота подвеса антенны равна 140 м.

Параметры излучения базовой станции [4, 8]:

- Мощность передатчика – 25 мВт;

- Тип передающей антенны – круговая;
- Коэффициент усиления антенны – 6 dbi;
- Частотный диапазон – 868 МГц;
- Модуляция – LoRa;
- Протокол – LoRaWAN v.1.

На рис. 2 представлены результаты расчета зоны покрытия базовой станции LoRa.

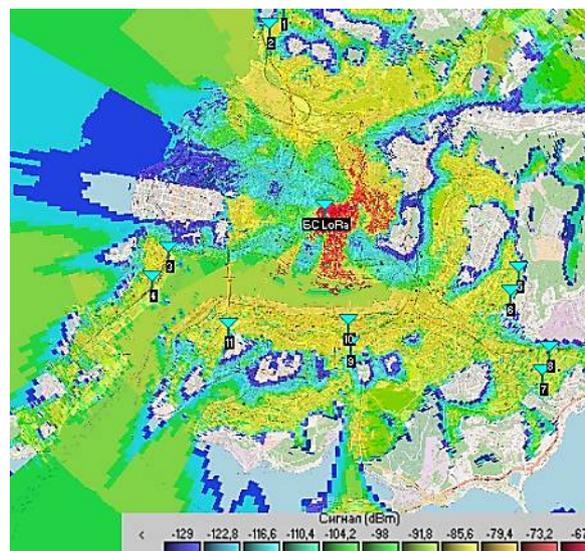


Рис. 2. Расчетная зона покрытия БС LoRaWaN

Поскольку заявленная чувствительность модема LoRa составляет -137 дБ, уверенный прием сигнала в условиях плотной городской застройки и сильно пересеченной местности возможен на расстояниях более 10 км. На этих расстояниях уровень принимаемого сигнала в канале Гаусса может достигать -80 дБм, запас на реализацию с учетом заявленной чувствительности модемов лора составляет 57 дБм [9,10], что достаточно для организации надежного канала связи.

### Подтверждение достоверности модельных расчетов

Для оценки достоверности модельных расчетов был организован полевой эксперимент по измерению уровня сигнала базовой станции LoRa в различных малых зонах.

Приемным устройством являлся модуль LoRaWaN с антенной производителя “BEST”– АКЛ-900, имеющей круговую диаграмму направленности.

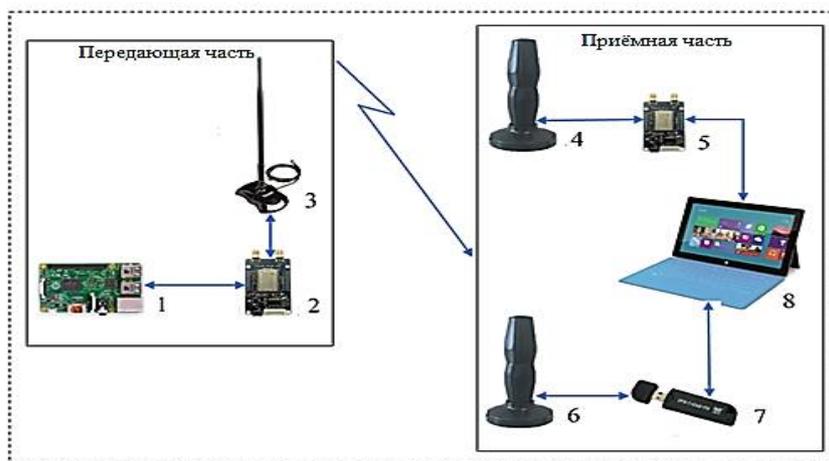


Рис. 3. Схема комплекса для измерений

На рис. 3 отображен состав измерительного комплекса:

1. Raspberry Pin2 – программируемый одноплатный компьютер, содержащий соответствующее ПО для проведения эксперимента.
2. LoRa – передающее устройство.
3. Передающая антенна MCX.
4. Приёмная антенна производителя “BEST”–АКЛ-900 – 2 шт.
5. LoRa – приёмное устройство с функцией измерения Packet Error Rate (PER)
6. RTL-SRD – регистратор сигнала с функцией измерения SNR.
7. Ноутбук с необходимым ПО.

В каждой точке приема (1-11) происходила фиксация сигнала и измерение уровня отношения сигнал/шум (SNR) на входе приемника и вероятность пакетной ошибки (PER).

На рис. 4 показано расположение малых зон, в которых происходило измерение сигнала от БС на территории г. Владивостока.



Рис. 4. Схема перемещения приемного модуля относительно БС

Для измерения уровня сигнала были назначены малые зоны в открытых местах, в отсутствии плотной городской застройки. На передающей стороне с помощью программного обеспечения были сформированы тестовые пакеты, передаваемые короткими блоками, размер пакетов составлял не более 255 байт, после завершения передачи от передающего модуля приходило подтверждение, что данные были посланы.

На приемной стороне установлены те же параметры, что и при передаче. Приемная антенна при измерениях помещалась на открытом месте при отсутствии городской застройки на высоте 1,5 метра, использовался фидер длиной около 3м, что позволяло уменьшить влияние автомобиля на результаты измерений.

С помощью регистратора сигнала RTL-SDR фиксировалось отношение сигнал/шум (SNR) на входе приемного модуля и процент ошибочно-переданных пакетов. Регистрация сигнала транслировалась на планшетный ПК и архивировалась для последующей статистической обработки.

Ансамбль данных измерений в каждой зоне (их порядка 40) состоял из 150 отчетов, по которым рассчитывалось среднеквадратическое отклонение и уровень PER.

### Обсуждение результатов

В таблице ниже приведена часть результатов измерений в 11 характерных малых зонах.

Номер зоны измерения	Расстояние, км	Высота места измерения, м	SNR, дБ	PER, %	Средне-квадратичное отклонение сигнала	Тип канала
1	6,34	90	-6,1	0	0,79	Гаусса
2	6,11	10	-11,2	8	2,26	Райса
3	2,96	8	-1,5	27	1,98	Райса
4	3,79	12	-6,2	12,4	4,92	Релея
5	3,58	135	-3,9	2,1	1,65	Райса
6	5,09	90	-10	0	0,84	Гаусса
7	2,32	50	-7,1	2	0,53	Гаусса
8	2,52	50	3,6	1,7	2,15	Райса
9	2,9	50	0,3	2,8	4,07	Релея
10	1,61	186	-11,3	24,5	1,46	Райса
11	3,28	141	-9,69	32,3	2,59	Райса

В условиях плотной застройки преобладающим является канал Райса со средним квадратическим отклонением, достигающим 2 дБ.

Проведенные эксперименты показывают, что в городе Владивосток с учетом пересечённого рельефа, плотной городской застройки, высоким уровнем внешних шумов организация канала связи с помощью технологии LoRa возможна только в пределах прямой видимости, не превышающих 6 км. Эти условия подобны условиям на взлетно-посадочной полосе аэродрома, где максимальный разнос между метеодатчиками не превышает 4 км. Заявленные производителем данные по дальности передачи выше 6 км могут выполняться только на малых скоростях (ниже 20 кбит/с).

Организовать передачу данных на ВПП с метеодатчиков на пост метеонаблюдателя можно следующим образом: передающий модуль LoRa подключается к метеодатчику через контроллер (например, ардуино) и далее отправляет информацию на базовую станцию по открытому протоколу LoRaWAN. Затем вся информация отправляется на сервер для обработки принятых данных.

### Оценка доступности канала LoRa

Для оценки качества работы системы связи необходимо оценить среднее время обмена данными между устройствами. Это важно сделать по следующим причинам:

- это позволит оценить общую эффективность сети, насколько быстро до конечного потребителя дойдет информация с датчиков;
- позволяет оценить, насколько система будет зашумлять своими сообщениями эфир диапазона и препятствовать передаче сообще-

ний других сетей и своим собственным устройствам;

- появляется возможность оценить срок службы батареи устройств в среднем для всей системы;
- можно спрогнозировать максимально возможный объем данных, возможный для передачи за удовлетворительный интервал времени.

Скорость обмена данными в сети можно рассчитать только приблизительно по формуле, представленной ниже:

$$V_{\text{опроса}} = \frac{V}{n},$$

где  $V$  – это минимальная скорость передачи данных,

$n$  – длина кадра при опросе.

Таким образом, при  $V = 1170$  бит/с  $\approx 1.2$  кбит/с (при нахождении устройства в наихудших условиях приема),  $n = 29$  байт.

Кадр LoRaWAN состоит из преамбулы, данных и кода CRC (также можно включить заголовок, передающий информацию о количестве байт данных, кода CRC и преамбулы, что увеличивает шансы на безошибочную демодуляцию, но с точки зрения энергопотребления его использование не оправдано и оказывает ощутимую нагрузку на сеть, сильно понижая жизненный цикл батареи).

Чтобы посчитать длину кадра  $n$ , нужно сложить длины его составляющих, то есть длины преамбулы, данных и длину контрольной суммы CRC-кода. Стандартная длина преамбулы составляет 12 символов, однако может быть изменена до 8. Чтобы посчитать длину символа в байтах, необходимо знать модуляцию. Так как используется модуляция LoRa, то длина одного символа рассчитывается по формуле ниже:

$$T_{\text{симв}} = \frac{2SF}{W},$$

где  $SF$  – фактор расширения;  
 $W$  – ширина полосы.

Подставив числовые значения, получаем, что  $T_{\text{симв}}=0,03$  байта. Это значит, что длина преамбулы составляет 0,39 байт (или 3 бита) при длине в 12 символов. Длина последовательности полезных данных составляет 13 байт, длина CRC кода равна 16 байтам. Итого, суммарная длина пакета приблизительно равна 29 байтам.

Используя эти данные, можно оценить скорость обмена данными в сети по формуле (3), т.е. количество опрошенных датчиков в секунду:

$$V = \frac{1170}{29} = 40 \text{ шт.}$$

### Выводы

В результате выполненных исследований установлено, что создание канала связи для сбора и передачи метеоинформации может быть реализовано в рамках технологии LPWaN. Для этого потребуется канал связи, обеспечивающий скорости не ниже 20 кб/с и обеспечивающий работу на расстояниях до 4 км. При заданной достоверности передачи данных потребуется организация канала не ниже уровня 25-27 дБ помехозащищенности.

Поскольку передача данных в каналы обработки определяется внутренними правилами (стандартами) передачи метеоинформации по срокам и дискретности, возникает вопрос по доступности каналов. Канал LoRa предполагает использование 4 полос по 125 кГц, в которых формируется ЛЧМ сигнал в зависимости от SF. В районе аэропортов не наблюдается организаций, которые используют такие же частотные диапазоны, как и LoRa. В предположении, что каналы доступны, были произведены расчеты по оценке количества датчиков, которые могут быть опрошены за 1 секунду. Получено, что скорость обмена данными в сети составит 40 штук в секунду при скорости передачи данных 1170 байт/с и при размере посылки 29 байт.

Применение системы требует разработки специального ПО в силу использования датчиками различных протоколов. Информация с датчика скорости ветра поступает непрерывно, поэтому данные должны быть усреднены на

контроллере и с некоторой дискретностью переданы по каналу связи LoRa.

Подтверждено, что технология LoRa по своим технологическим параметрам применима для организации эфирного канала связи в системе метеообеспечения аэропорта. Она удовлетворяет выдвинутым требованиям по пропускной способности, по помехозащищенности (позволяет демодулировать сигналы по уровню до -19,5 дБ), а также работает на нелицензируемых частотах. Важная особенность применения приемопередатчиков LoRa для обсуждаемой задачи – легкость в развертывании сети на объектах аэропорта, поскольку в технологии допускается использование «звездной» топологии, которая не требует транзитной передачи данных через ретрансляторы. Данная технология использует нелицензируемый спектр частот, что значительно упрощает и удешевляет процесс организации резервного канала связи.

### Литература

1. Федеральные авиационные правила "Подготовка и выполнение полетов в гражданской авиации Российской Федерации" № 128 от 31 июля 2009 года с изменениями от 22 апреля 2020 года.
2. Восканян К.Л., Кузнецов А.Д., Сероухова О.С. Автоматические метеорологические станции: учеб. пособие. СПб.: ФГБОУ «Российский государственный гидрометеорологический институт», 2016. 170с.
3. Кумаритова Д.Л., Киричек Р.В. Обзор и сравнительный анализ технологий LPWaN сетей. СПб.: СПбГУТ, 2016. 16с.
4. LoRa-модем SX1272/3/6/7/8: руководство проектировщика. Выборг. 8с.
5. Программный комплекс SPLAT!  
[www.qsl.net/kd2bd/](http://www.qsl.net/kd2bd/)
6. Анискин Л.В., Персин С.М. Опыт внедрения и развития аэродромной метеорологической информационно-измерительной системы АМИС-РФ // Современные тенденции развития аэродромных метеорологических информационно-измерительных систем. 2014.
7. Верхулевский К. Технология LoRa компании Semtech: новый импульс развития «Интернета вещей» // Беспроводные технологии. 2015. № 3. С. 42-48.
8. Semtech AN1200.23 Recommended SX1272 Settings for EU868 LoRaWAN Network Operation.
9. SX1272/73 — 860 MHz to 1020 MHz Low power long range transceiver. Datasheet. Rev. 3. March 2015. [www.semtech.com](http://www.semtech.com)
10. Low-Power Long Range LoRa™ Technology Transceiver Module [В Интернете]/ авт. Microchip Technology Inc. // [microchip.com](http://microchip.com). - Microchip Technology Inc., 2015 г. <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/50002346A.pdf>.
11. СТРИЖ Телематика. URL: <https://strij.tech/tag/lpwan>

**Информация об авторах**

**Тунеголовец Даниил Кириллович** – магистрант, Дальневосточный федеральный университет (690922, Россия, Приморский край, г. Владивосток, остров Русский, п. Аякс, 10), e-mail: V-vanik@mail.ru

**ASSESSMENT OF THE APPLICABILITY OF LARAWAN TECHNOLOGIES  
FOR THE ORGANIZATION OF A BACKUP COMMUNICATION CHANNEL  
FOR METEOROLOGICAL SUPPORT OF AIRFIELDS**

**D.K. Tunegolovets**

**Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia**

**Abstract:** at present, information on the state of the atmosphere is widely used both in the preparation of weather forecasts and in solving many economic problems. An essential feature of meteorological phenomena is their spatial and temporal variability. This makes it necessary to organize observations in such a way that will allow timely noting the occurrence of the phenomenon and monitoring the progress of its development. Statistics show that in the period from 1997 to 2000 there were about 193 aviation incidents, which were caused by shortcomings in the meteorological support of flights. Therefore, the task of improving the quality of meteorological support is urgent. This article shows, based on model and practical experiments, that the LaRaWAN wireless communication channel is able to combine the entire data stream coming from remote meteorological sensors using various communication protocols among themselves. During the experiment, I obtained positive results, proving the possibility of organizing such communication channels for the tasks of meteorological support of airfields. A block diagram for the organization of a communication channel is also provided. At the same time, the laying of cable communications is not required, when the cost of this type of work, including coordination, often significantly exceeds the cost of the meteorological equipment itself

**Key words:** LPWaN, weather support of airfields, communication channel

**References**

1. Federal Aviation Regulations "Preparation and Execution of Flights in Civil Aviation of the Russian Federation" ("Подготовка и выполнение полетов в гражданской авиации Российской Федерации") no. 128 dated July 31, 2009, 2020.
2. Voskanyan K.L., Kuznetsov A.D., Seroukhova O.S. "Automatic weather stations" ("Автоматические метеорологические станции"), Russian State Hydrometeorological Institute, 2016, 170p.
3. Kumaritova D.L., Kirichek R.V. "Review and comparative analysis of LPWaN network technologies" ("Обзор и сравнительный анализ технологий LPWaN сетей"), St. Petersburg, 2016, 16p.
4. "LoRa-SX1272 modem/3/6/7/8", the designer's guide, Vyborg, 8p.
5. The SPLAT! software package, available at: [www.qsl.net/kd2bd/](http://www.qsl.net/kd2bd/)
6. Aniskin L.V., Persin S.M. "Experience in the implementation and development of the aerodrome meteorological information and measurement system AMIS-RF", *Modern trends in the development of aerodrome meteorological information and measurement systems (Sovremennye tendentsii razvitiya aerodromnykh meteorologicheskikh informatsionno-izmeritel'nykh sistem)*, 2014.
7. Verkhulevskiy K. "LoRa technology of Semtech: a new impetus for the development of the "Internet of Things"", *Wireless Technologies (Besprovodnye tekhnologii)*, 2015, no. 3, pp. 42-48.
8. Semtech AN1200. 23 Recommended SX1272 Settings for EU868 Larawan Network Operation.
9. SX1272/73 - 860 MHz to 1020 MHz Low power long range transceiver. Datasheet, rev. 3, March 2015, available at: [www.semtech.com](http://www.semtech.com)
10. Low-Power Long Range Lure™ Technology Transceiver Module, auth. Microchip Technology Inc., [microchip.com](http://www1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/50002346A.pdf), Microchip Technology Inc., 2015, available at: <http://www1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/50002346A.pdf>.
11. STRIZH Telematics, available at: <https://strij.tech/tag/lpwan>

Submitted 30.06.2021; revised 19.10.2021

**Information about the authors**

**Daniil K. Tunegolovets**, MA, Far Eastern Federal University (10 Ajax village, Russian Island, Vladivostok 690922, Primorsky Krai, Russia), e-mail: V-vanik@mail.ru

## УЛУЧШЕННЫЙ MIN-SUM АЛГОРИТМ ДЕКОДИРОВАНИЯ ДЛЯ НЕРЕГУЛЯРНЫХ LDPC-КОДОВ

А.В. Башкиров, И.В. Свиридова, Т.Д. Ижокина, Е.А. Зубкова, О.В. Свиридова,  
Д.В. Васильченко

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** аналитический подход к определению оптимальной функции постобработки для минимальной операции в алгоритме MIN-SUM, ранее полученный для обычных кодов проверки на четность с низкой плотностью (LDPC-коды), распространяется на нерегулярные коды LDPC. Оптимальное выражение постобработки для нестандартного случая варьируется от одного контрольного узла к другому, а также от одной итерации к следующей. Для практического использования необходимо аппроксимировать эту оптимальную функцию. В отличие от обычного случая, когда можно было бы использовать уникальную функцию постобработки на протяжении всего процесса декодирования без потери производительности битовых ошибок, для нерегулярных кодов критически важно варьировать постобработку от одной итерации к следующей, чтобы добиться хорошей производительности. С использованием этого подхода было выявлено, что качество битовых ошибок от алгоритма распространения доверия соответствует улучшению на 1 дБ по сравнению с MIN-SUM алгоритмом без постобработки. Сначала будет представлен обзор подхода и представлена аналитическая основа для оптимальной постобработки. Далее будет представлена оптимальная функция постобработки для нерегулярных кодов и обсуждены возможные упрощения. И наконец, показаны результаты моделирования и преимущества аппроксимации

**Ключевые слова:** стохастическое декодирование, MIN-SUM алгоритм, алгоритм распространения доверия

### Введение

Алгоритм распространения доверия для декодирования LDPC-кодов проблематично воспроизвести на практике, так как его реализация требует использования нелинейных функций и умножений. Используя научный метод приближения в вычислениях проверочных узлов при помощи простой минимальной операции, мы можем упростить алгоритм до алгоритма MIN-SUM.

Несмотря на то, что алгоритм MIN-SUM более прост в реализации, для достижения такой же частоты ошибок по битам ему требуется приблизительно 0,5 дБ отношения сигнал/шум, что и алгоритму распространения доверия, с применением стандартного LDPC-кода для передачи по каналу аддитивного белого Гауссовского шума (AWGN) с двоичным входом. Для нестандартных кодов потеря производительности может достигать 1 дБ.

Отметим, что можно улучшить производительность MIN-SUM алгоритма при помощи минимальной постобработки. К примеру, минимум может быть смещен на постоянный коэффициент, либо умножен на коэффициент масштабирования. Данные методы носят следующие названия: смещение алгоритма рас-

пространения доверия, нормализованный алгоритм распространения доверия и применение внешнего масштабного коэффициента.

Оптимальный параметр, будь то коэффициент масштабирования или смещение, вычисляется моделированием или эволюцией плотности.

В статье представлена аналитическая основа для определения оптимальной функции постобработки, в результате которой было выявлено, что это не линейная (т.е. масштабный коэффициент) или аффинная (т.е. смещение) функция, а общая S-образная нелинейная функция. Эта оптимальная функция постобработки может быть аппроксимирована линейной или аффинной функцией, что во всех случаях приводит к идентичным значениям, полученным эвристическим путем.

В данной статье углублен аналитический подход и выведена оптимальная функция постобработки для нерегулярных LDPC-кодов. В сравнении с обычными кодами, в которых можно было эффективно реализовать оптимальную функцию постобработки с помощью таблицы поиска, для нерегулярных кодов оптимальная функция постобработки различается для каждого узла и для каждой итерации. Следовательно, найти легко реализуемые приближения оптимальной функции постобработки является крайне важной задачей.

### Функция постобработки

В алгоритме распространения доверия сообщение, вычисленное для каждого исходящего ребра проверочного узла, имеет вид апостериорного распределения вероятностей (т.е. логарифмическое отношение правдоподобия) кодовой цифры с учетом входящих сообщений в проверочный узел, которые интерпретируются как независимые наблюдения за иными числами кода, участвующими в соответствующем уравнении проверки на четность. Эта интерпретация асимптотически точна по длине кодового слова при использовании случайных перемежителей, факт, который часто называют предположением независимости.

В момент, когда операция проверочного узла заменяется минимизацией, результирующее сообщение, отправленное по исходящему ребру, не является истинным отношением логарифмической вероятности, даже в том случае, если его значение может быть тесно коррелировано с истинным отношением логарифмического правдоподобия. Максимальная часть потери производительности алгоритма MIN-SUM происходит в результате неверной расшифровки выходных данных проверочного узла переменными узлами. Кривая EXIT проверочного узла в алгоритме MIN-SUM мало отличима от соответствующей кривой EXIT для алгоритма распространения доверия, в то время как фактическое направление производительности смоделированного декодера MIN-SUM с большим отрывом не соответствует кривым EXIT. Это говорит о том, что минимум содержит большую часть информации, которая изначально содержалась во входных данных для проверочных узлов, но эта информация представлена в формате, не пригодном для использования переменными узлами.

Функции EXIT отражают взаимосвязанную информацию между исходящим сообщением и цифрой кода, которая должна подвергаться проверке. Сами по себе они инвариантны относительно биективных отображений исходящих сообщений. Иными словами, график EXIT не обманывается искажением информации в минимуме и прогнозирует, что имеется взаимно однозначное преобразование минимума, позволяющее алгоритму MIN-SUM работать почти так же эффективно, как алгоритм распространения доверия. Это преобразование минимума один-к-одному – именно то, что называется постобработкой.

Целью постобработки - преобразование информации минимального объема в форму, которая будет верно восприниматься узлами переменных. Узлы переменных ожидают, что информация от узлов проверки будет содержать логарифмические отношения правдоподобия. То есть, необходимо преобразовать минимум в логарифмическое отношение правдоподобия. Это можно сделать, переинтерпретируя минимум как наблюдение кодовой цифры, которую необходимо оценить, и вычисляя апостериорное распределение вероятностей (то есть логарифмическое отношение правдоподобия) с учетом минимума. Если  $X_n$  - это цифра кода, которую необходимо оценить, а  $L_{mn}^{\text{SMA}}$  - это минимум, вычисленный алгоритмом MIN-SUM без постобработки, то мы хотим вычислить:

$$L_{mn} = \log \frac{p \cdot (X_n = 0 | L_{mn}^{\text{SMA}})}{p \cdot (X_n = 1 | L_{mn}^{\text{SMA}})}. \quad (1)$$

Данное выражение при аналитической оценке дает однозначное отображение минимума в логарифмическое отношение правдоподобия. Мы считаем это сопоставление оптимальной операцией постобработки, а это означает, что результирующая производительность декодирования с постобработкой в точности равна, как предсказано, кривым EXIT. Иными словами, декодер в полном объеме использует содержащуюся в минимуме информацию. Результирующее выражение для регулярных кодов LDPC имеет следующий вид:

$$L_{mn} = f(\zeta; d_c, p(\cdot)) = \log \frac{\Psi + (\zeta; d_c, p(\cdot))}{\Psi - (\zeta; d_c, p(\cdot))}, \quad (2)$$

где

$$\begin{aligned} \Psi + (\zeta; d_c, p(\cdot)) &= [p(\zeta) + p(-\zeta)] \\ &[\phi + (\zeta) + \phi - (\zeta)]^{d_c-2} + \\ &+ [p(\zeta) - p(-\zeta)] [\phi + (\zeta) - \phi - (\zeta)]^{d_c-2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Psi - (\zeta; d_c, p(\cdot)) &= [p(\zeta) + p(-\zeta)] \\ &[\phi + (\zeta) + \phi - (\zeta)]^{d_c-2} + \\ &+ [p(\zeta) - p(-\zeta)] [\phi + (\zeta) - \phi - (\zeta)]^{d_c-2} \end{aligned}$$

и  $\phi + (\zeta), \phi - (\zeta)$  определяются как

$$\begin{aligned} \phi + (\zeta) &= \int_{+|\zeta|}^{+\infty} p(y) dy \\ \phi - (\zeta) &= \int_{-\infty}^{-|\zeta|} p(y) dy. \end{aligned}$$

Значения данной функции напрямую зависят не только от показателей степени контрольного узла, но и от данных функции плотности вероятности  $p(\cdot)$  данных входящих сообщений. Если Гауссово распределение применить на входные сигналы, то данное равенство будет зависеть от дисперсии Гауссова распределения или от априорной взаимной информации на каждой итерации. Переход функции между итерациями влечет за собой спад в количестве итераций, но не для улучшения характеристик битовых ошибок. На рис. 1 представлен пример функции постобработки для обычного (3,6) кода в комплексе с его аппроксимацией при помощи коэффициента смещения или масштабирования. Отметим, что обычно и линейная аппроксимация, и приближение смещения в результате дают почти оптимальную производительность, и от реализации оптимальной функции нелинейной постобработки мало что можно получить. С другой стороны, так как достаточно применять уникальную функцию постобработки в процессе итераций без потери производительности битовых ошибок, то оптимальная функция может быть представлена как справочная таблица без усложнения в сравнении с ее приближениями.

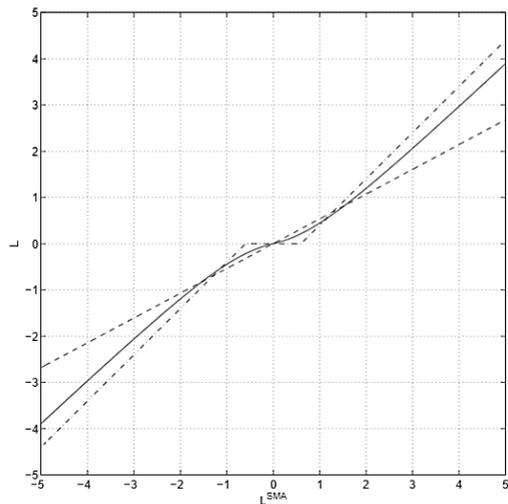


Рис. 1. Функция постобработки  $L = f(L_{SMA}; d_c = 6; I_{Ac} = 0,5)$  (сплошная линия), линейная аппроксимация (верхняя пунктирная линия) и аппроксимация смещения (нижняя пунктирная линия)

### Расширение на нерегулярные коды

Для достижения целевой вероятности битовой ошибки на скоростях и производится разработка нерегулярных кодов LDPC. Условием для этих кодов является проведение де-

кодирования при помощи алгоритма распространения доверия. Но при этом нерегулярные коды так чувствительны в сравнении с эффектами замены операции контрольного узла до минимума, что при использовании приближения MIN-SUM утрата производительности превышает достоинства использования нерегулярных кодов.

Также, касательно обычных кодов, диаграмма EXIT нерегулярного кода не предупреждает значительные потери производительности для приближения MIN-SUM. Так как нерегулярные коды часто проектируются как регулярные (т.е. степень всех проверочных узлов одинакова), функции EXIT для проверочных узлов для обоих алгоритмов идентичны кривым для обычных кодов, и нерегулярные коды отличаются только другой функцией EXIT переменного узла.

Вышеприведенные высказывания являются доказательной базой для существования взаимно-однозначного отображения. В качестве доказательства того, что мы прогнозировали его при помощи диаграммы EXIT, можем применять его так, что потери производительности приближения MIN-SUM сводятся к минимуму.

Вышеупомянутая информация свидетельствует о том, что как для нерегулярных кодов, так и для кодов LDPC постобработка позволяет алгоритму MIN-SUM достичь уровня эффективности битовых ошибок не хуже по сравнению с алгоритмом распространения доверия. В конечном счете, приходим к выводу, что теория не имеет значительной разницы наряду с регулярным и нерегулярным случаями. Ключевым различием является лишь то, что в конечном счете больший результат получается от использования постобработки для нерегулярных кодов LDPC.

Из отрицательных сторон обоих кодов можно выделить то, что среди оптимальных функций постобработки в регулярном и нерегулярном случаях содержатся два базовых различия. Так мы приходим к выводу, что применение оптимальной постобработки при практическом применении для нерегулярных кодов невозможно, и в сложившейся ситуации единственным выходом будет использование приближения оптимальных функций постобработки.

Для большего понимания стоит пояснить, в чем заключаются два фундаментальных различия:

- модель, которую мы применяем для того, чтобы получить конечный результат функции постобработки обычных кодов LDPC, результатом которой являются равные плоскости для всех входящих сообщений, является дисфункциональной. Отдельным случаем представляются сообщения, поступающие на контрольный узел, имеется показатель переменных узлов различной степени. А именно, каждое из сообщений будет располагать отличающиеся функции плотности вероятности. Если предполагается использование Гауссовского приближения плотности, то необходимо обладать на каждом входящем сообщении различающуюся дисперсию в соответствии с местом ее расположения в типе узла;

- аргумент, с использованием которого можно применять одну из функций постобработки по ходу итераций без большой потери производительности битовых ошибок, при отборе функции постобработки, которая является соответствующей более узкому месту на диаграмме EXIT, не используется по отношению к вышеуказанным нерегулярным кодам LDPC. Прохождение функций EXIT в максимальной близости друг от друга является одним из условий создания нерегулярных кодов LDPC, а результат - длинный узкий туннель между кривыми EXIT вместо одного наиболее суженного места. Максимально важным является применение постобработки наиболее эффективным способом в процессе итерации, так как алгоритм декодирования может быть приостановлен на любом этапе процесса итеративного декодирования.

В дальнейшем будет изложено рассмотрение различий между регулярным и нерегулярным регистром более детальным пояснением.

#### Оптимизированная постобработка для сообщений, имеющих разную плотность

В формуле 2 представлено описание наиболее подходящей функция для постобработки простых LDPC-кодов. Эта формула применима для любой функции плотности сообщений при условии, что все входящие в проверочный узел сообщения имеют равную плотность. Для кодов нерегулярного характера данная формула не может быть актуальной. Все сообщения, входящие в проверочный узел, могут формироваться из переменных узлов различной степени и обладать различной

плотностью. Если мы хотим определить апостериорное логарифмическое отношение правдоподобия  $L_{mn}$  с учетом  $\min$ , перетрактованного как наблюдение (формула 1) для проверочного узла с неравной плотностью входящих сообщений, то необходимо получить модернизированное выражение, похожее на формулу 2. Изменению подвергаются функции  $\psi_+$  и  $\psi_-$ . Пусть  $p(\cdot)$  – вектор функций плотности всех входящих в проверочный узел сообщений, а  $p_i(\cdot)$  – функция плотности  $i$ -го входящего сообщения, тогда мы получим:

$$\Psi \pm (\zeta; d_c, p(\cdot)) = \sum_{i=1}^{d_c-1} ([p_i(\zeta) + p_i(-\zeta)] \prod_{j=1: j \neq i}^{d_c-1} [\phi_i(\zeta) + \phi_i(-\zeta)] \pm [p_i(\zeta) - p_i(-\zeta)] \prod_{j=1: j \neq i}^{d_c-1} [\phi_i + (\zeta) - \phi_i - (\zeta)]) \quad (3)$$

Функции  $\phi_{i+}$  и  $\phi_{i-}$  являются соответствующими интегралами, определенными для регулярных кодов.

Нахождение точной оптимальной функции постобработки, даже с предположением Гауссовой плотности, является очень сложным процессом. Сама идея включает в себя умножение каждой комбинации перекрестных произведений различных плотностей. В первую очередь необходимо учитывать степень переменного узла, далее нужно вычислить плотность для каждого входящего сообщения. Для всех проверочных узлов производим индивидуальный расчет данной операции, так как они могут иметь разную степень. Таким образом, при создании практической стратегии по повышению производительности алгоритма MIN-SUM, мы можем использовать оптимальную функцию постобработки, но осуществление такой оптимальной реализации нецелесообразно. Данное выражение можно применить для обычных кодов, имеющих идентичную плотность всех входящих сообщений. В этом случае мы упрощаем формулу 3 и находим оптимальную функцию постобработки. Все это можно реализовать в автономном режиме и в дальнейшем использовать на практике.

Пример 1: Допустим, у нас есть нерегулярный LDPC-код переменного узла с распре-

делением степени  $\lambda(x) = 0.25x + 0.75x^9$  и степень проверочного узла  $d_c = 10$ . Если мы находим функцию постобработки для одного вывода проверочного узла, то  $g$  входы подключены к переменному узлу 2-ой степени, а входы подключены к переменному узлу 10-ой степени. На рис. 2 показаны функции постобработки, которые меняются в зависимости от показателей  $g$  и  $I_{Ac} = 0.5$ . Данные функции предполагают распределение сообщений по закону Гаусса.

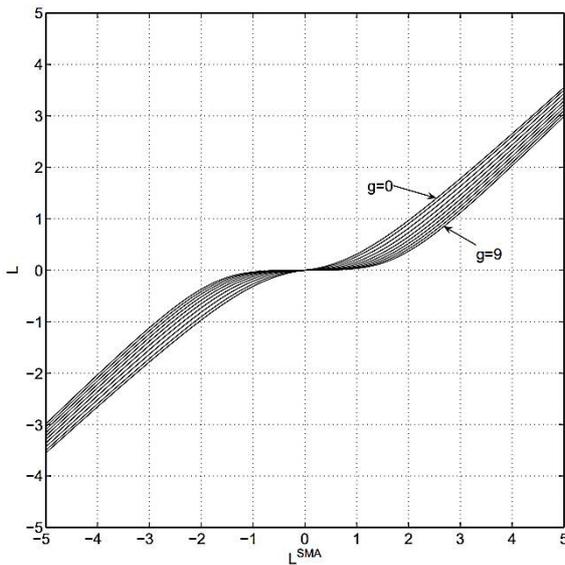


Рис. 2. Получившаяся функция постобработки по 1-му примеру

Используя формулу для обычных кодов, необходимо найти наиболее подходящую функцию для постобработки и рассчитать среднюю плотность входящих сообщений. Воспроизвести подходящую по всем параметрам постобработку в суверенном моделировании будет очень сложно, поэтому мы не сможем измерить потерю производительности при упрощении. Необходимо понимать, что любое отклонение в достижении высокой производительности, полученной анализом на выходе декодирования MIN-SUM нерегулярных LDPC-кодов, может зависеть от упрощения данного выражения.

### Изменение функции постобработки

Результатом оптимизации, при условиях одинаковой плотности сообщений и ограничениях проверочными кодами LDPC, является равная для всех узлов функция постобработки.

Она зависит от дисперсии входящих сообщений и идентична для каждого проверочного узла. Поэтому для каждой итерации необходимо находить индивидуальную функцию. Используемый для обычных LDPC-кодов аргумент характеризует траекторию декодирования, которая достигает кривых, формирующихся на выходе в самой узкой точке. Мы можем не учитывать нерегулярные LDPC-коды при нахождении производительности битовых ошибок. Для кодов, разработанных путем модернизации порога, кривые выхода будут разделяться узким промежутком - туннелем. Любое малейшее отклонение от кривых выхода, в точках этого промежутка, приводит к зависанию декодера. В итоге можно сделать вывод о том, что всегда необходимо варьировать постобработку между итерациями. Все это приводит к масштабированию коэффициентов последовательности и членов смещения при линейном приближении.

Такую последовательность можно вычислить, спрогнозировав траекторию на диаграмме выхода и выявив поправочный член для каждой итерации. Поправочный член может быть выявлен либо путем моделирования, либо путем прямого приближения нелинейной функции постобработки, используя наш метод.

$$\alpha(d_c, I_{Ac}) = \operatorname{argmin}_{\alpha'} \int_{-\infty}^{\infty} [f(L^{SMA}; d_c, I_{Ac}) - \alpha' L^{SMA}] \cdot q(L^{SMA}; I_{Ac}) dL^{SMA}$$

Для оптимального линейного коэффициента

$$\beta(d_c, I_{Ac}) = \operatorname{argmin}_{\alpha'} \int_{-\infty}^{\infty} [f(L^{SMA}; d_c, I_{Ac}) - \operatorname{sgn}(L_{mn}^{SMA}) \cdot \max(L_{mn}^{SMA} - \beta, 0)] \cdot q(L^{SMA}; I_{Ac}) dL^{SMA}$$

Для оптимального смещения, где  $f(\cdot)$  - нелинейная функция постобработки, а  $q(\cdot)$  - функция плотности минимума до постобработки.

Все эти аппроксимации нелинейных функций являются приближенными значениями взвешенной минимальной среднеквадратичной ошибки. Далее необходимо произвести постобработку, используя формулу для линейной (формула 4) и аффинной (формула 5) постобработок:

$$L_{mn} \approx \alpha(d_c, I_{Ac}) L_{mn}^{SMA} \quad (4)$$

$$L_{mn} \approx \text{sgn}(L_{mn}^{SMA}) \cdot \max(|L_{mn}^{SMA}| - \beta, 0) \quad (5)$$

Минимум, вычисленный в алгоритме MIN-SUM, стал ближе к выходным данным самого проверочного узла. Алгоритм распространения доверия можно использовать при больших объемах сообщений, то есть при высоких показателях  $I_{Ac}$ . Можно увидеть, что при увеличении количества итераций переменные  $\alpha$  и  $\beta$  увеличиваются до 1.0 и 0.0.

### Результаты моделирования

Для того чтобы проверить наши предположения, необходимо произвести моделирование частоты ошибок по битам для регулярных и нерегулярных кодов LDPC. При этом необходимо использовать алгоритм распространения доверия, MIN-SUM алгоритм и MIN-SUM алгоритм с линейной постобработкой.

Оба кода имеют значение коэффициента равное  $R = 0.5$ . Обычный код имеет  $d_v = 3$  и  $d_c = 6$ , а нерегулярный LDPC-код имеет степень проверочного узла  $d_c = 9$  и распределение степеней переменного узла (рис. 3).

степень	$\lambda$
2	0.212364
3	0.198528
5	0.008380
6	0.074687
7	0.014241
8	0.166518
9	0.009124
10	0.020019
20	0.000251
30	0.295888

Рис. 3. Краевая перспектива

На рис. 4 представлен график выхода нерегулярного кода.

Для того чтобы избежать эффектов, вызываемых циклами в графе декодирования, необходимо выбрать длину равную  $N = 10^5$ . При расчетах кода применяем алгоритм прогрессивного роста ребер.

Процесс моделирования было осуществлен с применением двоичной фазовой манипуляции по AWGN каналу. Число произведенных декодером итераций составляет  $n = 100$ . На рис. 6 представлен результат симуляции простого LDPC-кода. Пользуясь алгоритмом MIN-SUM, имеющим линейную постобработку, необходимо зафиксировать коэффициент

масштабирования  $\alpha = 0.80$  для всех последующих итераций.

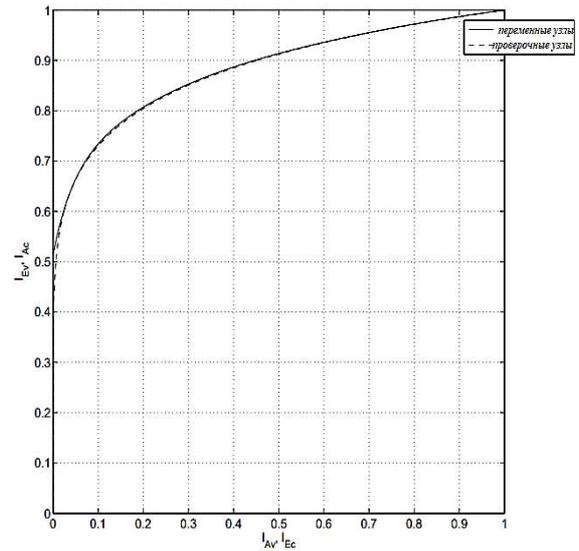


Рис. 4. Диаграмма EXIT для нерегулярного LDPC-кода

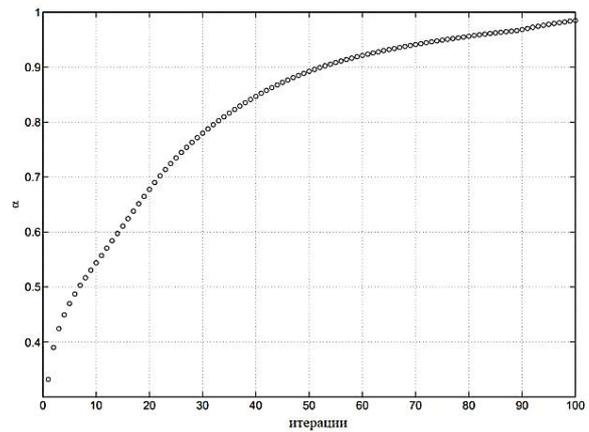


Рис. 5. Ряд коэффициентов масштабирования для нерегулярного кода.

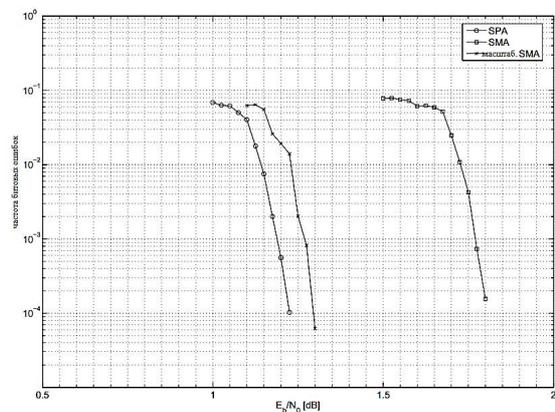


Рис. 6. Частота битовых ошибок для LDPC-кода

Опираясь на график, можно заметить, что есть возможность восстановить всю потерю в производительности. Сам разрыв в алгоритме распространения доверия приблизительно составит 0,5 дБ. Необходимо обратить внимание на пороговые значения для алгоритмов распространения доверия и MIN-SUM, вычисленных с помощью диаграмм выхода и равных 1,13 дБ и 1,19 дБ. Они выявлены для дальнейшего улучшения алгоритма MIN-SUM за счет использования оптимальной нелинейной функции постобработки.

На рис. 7 представлены результаты LDPC-анализа нерегулярных кодов. Модернизированный алгоритм MIN-SUM использует цепочку коэффициентов масштабирования, продемонстрированную на рис. 5. Мы можем заметить, что большая часть потерь в производительности алгоритма MIN-SUM восстанавливается с помощью переменной линейной постобработки. В этот момент результирующий разрыв с алгоритмом распространения доверия будет составлять около 0.15 дБ. Этот резкий перепад можно наблюдать, сравнив рис. 6 и 7. Тогда мы сможем заметить снижение производительности при использовании нерегулярного кода.

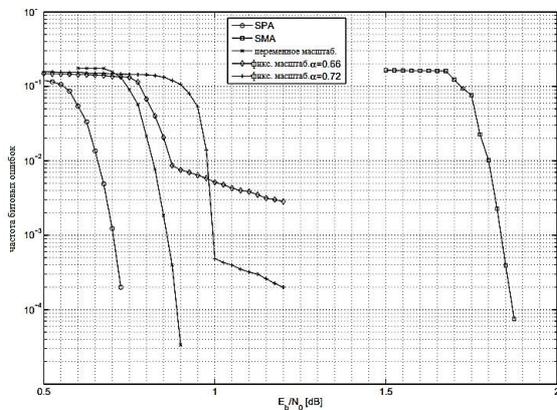


Рис. 7. Частота битовых ошибок для непостоянного кода LDPC

Данный анализ демонстрирует, что постобработка играет важную роль при практическом применении нерегулярных LDPC-кодов. Для наглядного примера мы сравнили производительность с декодером, который использует постоянный коэффициент масштабирования. Результаты представлены на рис. 7, где  $\alpha = 0.66$  и  $\alpha = 0.72$ .

По графику на рис. 6 можно увидеть, что при малом значении  $\alpha$  область спада близка к области переменного масштабирования. Такое масштабирование очень мало для больших зна-

чений  $I_{Ac}$ , и декодер не может реализовать сходимость на низкой частоте битовых ошибок. Из-за этого возникает множество неполадок. Для самого высокого значения  $\alpha$  этот порог ошибки будет значительно ниже. Для этого необходимо использовать максимальное значение порога. Применение разных множеств значений  $\alpha$  сочетается в себе как хороший порог, так и отсутствие наблюдаемого уровня ошибки.

### Заключение

Выше мы рассмотрели методы улучшения алгоритма MIN-SUM для декодирования кодов LDPC при помощи постобработки, путем повторной интерпретации минимума как наблюдения и вычисления апостериорного логарифмического отношения правдоподобия цифр кода с учетом этого наблюдения.

В ходе рассмотрения оптимального выражения постобработки для нерегулярных кодов LDPC мы пришли к выводу, что для нерегулярных кодов оптимальная постобработка почти невозможна. При упрощении задачи было принято решение установить одинаковую плотность всех входящих сообщений на проверочный узел. В итоге было выяснено, что данное решение будет излишне упрощенным, в сравнении с обычным случаем.

На следующем этапе проводилось выполнение линейной постобработки с переменным коэффициентом масштабирования. В ходе работы была получена производительность декодирования для алгоритма MIN-SUM в диапазоне 0,15 дБ от производительности для алгоритма распространения доверия.

В данной статье показано, что оптимальная постобработка является нецелесообразной. Именно поэтому любой инженерный метод, который приближен к оптимальной постобработке при помощи практических инструментов, будет оптимальным вариантом для улучшения алгоритма MIN-SUM на практике. Таким образом, метод, который совмещает в себе минимальную предварительную обработку и минимальную линейную, будет выгодным подходом, так же как и ранее выбранный подход с применением переменных факторов линейной постобработки.

И, несмотря на то, что в теории для получения максимальной производительности достаточно использовать постобработку, и предварительная обработка не потребовалась бы, если бы можно было реализовать оптимальную постобработку.

### Литература

1. Галлагер Р.Дж. Коды с малой плотностью проверок на четность. М.: Мир, 1996. 90с.
2. Золотарёв В.В., Овечкин Г.В. Помехоустойчивое кодирование. Методы и алгоритмы: учеб. пособие / под ред. Ю.Б. Зубарева. М.: Справочное издание, 2004. 126 с.
3. Башкиров А.В., Свиридова И.В. Реализация стохастического LDPC-декодера на ПЛИС // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2018. Т. 14. № 6. С. 103-107.
4. Башкиров А.В., Свиридова И.В., Андреева Д.С. Эффективная архитектура на основе ПЛИС для полно-

стью параллельного стохастического LDPC-декодера // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2018. Т. 14. № 3. С. 101-107.

5. Чирков О.Н. Математическая модель взвешенной оценки канала радиосвязи для многоантенных OFDM-систем // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2019. Т. 15. № 4. С. 49-54.

6. Чирков О.Н. Эффективный алгоритм динамического распространения пилот-сигналов для оценки канала радиосвязи в многоантенных системах MIMO с ортогональным частотным уплотнением OFDM // Радиотехника. 2019. Т. 83. № 6 (8). С. 163-168.

Поступила 08.07.2021; принята к публикации 20.10.2021

### Информация об авторах

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

**Свиридова Ирина Владимировна** – старший преподаватель, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: ri-ss-ka@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5279-0807>

**Ижокина Татьяна Дмитриевна** – магистр, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: tatyanaizhokina@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9167-9538>

**Зубкова Екатерина Александровна** – магистр, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: tatyanaizhokina@yandex.ru,

**Свиридова Ольга Владимировна** – магистр, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: s.lelya.15@mail.ru

**Васильченко Дмитрий Владимирович** – ассистент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: shadow951@bk.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1045-0841>

## IMPROVED MIN-SUM DECODING ALGORITHM FOR IRREGULAR LDPC CODES

A.V. Bashkirov, I.V. Sviridova, T.D. Izhokina, E.A. Zubkova, O.V. Sviridova, D.V. Vasil'chenko

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

**Abstract:** we extended an analytical approach to determining the optimal post-processing function for the minimum operation in the MIN-SUM algorithm, previously obtained for conventional low density parity check codes (LDPC codes), to irregular LDPC codes. The optimal post-processing expression for the non-standard case varies from one control node to another, as well as from one iteration to the next. For practical use, it is necessary to approximate this optimal function. Unlike the usual case where one could use a unique post-processing function throughout the entire decoding process without sacrificing bit code performance, it is critical for irregular codes to distinguish post-processing from one iteration to the next in order to achieve good performance. Using this approach, we found that the quality of bit errors from the trust algorithm corresponds to an improvement of 1 level compared to the MIN-SUM algorithm without post-processing. First, we provide an overview and analytical framework for optimal post-processing. Then, we present the optimal post-processing function for irregular codes and discuss possible simplifications. Finally, we show the simulation results and the benefits of the approximation

**Key words:** stochastic decoding, MIN-SUM algorithm, trust distribution algorithm

### References

1. Gallager R.J. "Codes with a low density of parity checks" ("Kody s maloy plotnost'yu proverok na chetnost'"), Moscow: Mir, 1996, 90 p.
2. Zolotarev V.V., Ovechkin G.V., ed. Zubarev Yu.B. "Noise-resistant coding. Methods and algorithms" ("Pomekhoustoychivo kodirovanie. Metody i algoritmy"), Moscow: Reference publication, 2004, 126 p. ISBN 5-93517-169-4.
3. Bashkirov A.V., Sviridova I.V. "Implementation of a stochastic LDPC decoder on FPGA", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2018, vol. 14, no. 6, pp. 103-107.
4. Bashkirov A.V., Sviridova I.V., Andreeva D.S. "Efficient PLIS-based architecture for a fully parallel stochastic LDPC decoder", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2018, vol. 14, no. 3, pp. 101-107.

5. Chirkov O.N. "Mathematical model of the weighted estimate of the radio communication channel for multi-antenna OFDM systems", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2019, vol. 15, no. 4, pp. 49-54.

6. Chirkov O.N. "Effective algorithm for dynamic propagation of pilot signals for estimating a radio communication channel in multi-antenna MIMO systems with OFDM orthogonal frequency division multiplexing", *Radio Engineering (Radiotekhnika)*, 2019, vol. 83, no. 6 (8), pp. 163-168.

Submitted 08.07.2021; revised 20.10.2021

#### Information about the authors

**Aleksey V. Bashkirov**, Dr. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: [fab7@mail.ru](mailto:fab7@mail.ru), ORCIDID - <http://orcid.org/0000-0003-0939-722X>

**Irina V. Sviridova**, Assistant Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: [ri-ss-ka@mail.ru](mailto:ri-ss-ka@mail.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5279-0807>

**Tat'yana D. Izhokina**, MA, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: [tatyanaizhokina@yandex.ru](mailto:tatyanaizhokina@yandex.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9167-9538>

**Ekaterina A. Zubkova**, MA, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: [tatyanaizhokina@yandex.ru](mailto:tatyanaizhokina@yandex.ru),

**Ol'ga V. Sviridova**, MA, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: [s.lelya.15@mail.ru](mailto:s.lelya.15@mail.ru)

**Dmitriy V. Vasilchenko**, Assistant, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: [shadow951@bk.ru](mailto:shadow951@bk.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1045-0841>

## РЕАЛИЗАЦИЯ ЗОННОГО ПРИНЦИПА В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ АППАРАТУРОЙ РЕГУЛИРОВАНИЯ И КОНТРОЛЯ БОРТОВОЙ СЕТИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

И.И. Таболин, Р.Ю. Кузьменко, А.Д. Данилов

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** описывается применение принципа зонного регулирования при разработке системы управления аппаратуры регулирования и контроля бортовой сети космического аппарата. Приведены краткие описания аппаратуры регулирования и контроля и входящих в её состав модулей. Приведены функциональная схема регулирования аппаратуры регулирования и контроля и график совместной работы её модулей с разбиением на зоны. Рассмотрена система управления аппаратурой регулирования и контроля. Приведены структурные схемы формирования управляющего воздействия для всех регуляторов аппаратуры регулирования и контроля. Реализация принципа зонного регулирования достигается тем, что вся область возможного изменения сигнала управления разбита на зоны работы, при этом каждому типу модулей выделена своя зона работы. Такой подход, в зависимости от баланса мощности "потребитель - источник", обеспечивает автоматическое подключение требуемых регуляторов. Данный принцип обеспечивает непрерывное изменение сигнала управления в зависимости от энергодобавки системы и параметрических возмущений. Полученную систему можно рассматривать как квазилинейную, что позволяет использовать известные линейные методы синтеза и анализа системы управления, при этом настройка контуров регулирования с заданными показателями качества осуществляется отдельно для каждого типа модулей аппаратуры регулирования и контроля

**Ключевые слова:** система электроснабжения, система управления, принцип зонного регулирования, аппаратура регулирования и контроля, бортовая сеть, космический аппарат

### Введение

Для будущих космических миссий необходимы создание новых космических аппаратов (КА) и, в частности, разработка более усовершенствованных систем энергоснабжения (СЭС) этих КА.

В настоящее время ведётся разработка одних из таких СЭС – аппаратура регулирования и контроля (АРК). Данная система предназначена для обеспечения работоспособности КА и корректной обработки и передачи параметров его технических систем. АРК совместно с первичными источниками энергии – солнечными батареями (СБ), и вторичными источниками энергии – аккумуляторными батареями (АБ), обеспечивает потребителей бортовой сети электрической энергией [1-4].

Основное назначение АРК – формирование и стабилизация на выходных шинах напряжения постоянного тока 28,5 В.

### Состав АРК

В состав АРК входят следующие функциональные узлы [5]:

- регуляторы тока СБ (РТ);
- зарядно-разрядные устройства АБ (ЗРУ);

- аппаратно-программный модуль АРК (АПМ);
- стабилизатор напряжения (СН);
- фильтр.

РТ выполнен в виде регулятора параллельного типа, обеспечивает непрерывное регулирование тока генератора СБ и автоматически включается в работу при подключении их ко входу СБ или наземного источника питания – имитатора СБ.

ЗРУ обеспечивает процессы заряда и разряда АБ: заряд АБ с выравниванием токов заряда между АБ и с ограничением зарядного тока; ступенчатый заряд по командам с блока электроники; передача тока от АБ со стабилизацией напряжения шины СЭС на уровне 28,5 В и выравнивание токов разряда между АБ; ограничение разрядного тока АБ; приём и исполнение команд управления от блока электроники АБ.

СН предназначен для обеспечения без гальванической развязки преобразования напряжения постоянного тока (20-37) В в стабилизированное напряжение (28,5±0,5) В в установившемся режиме и (28,5±1,5) В в переходных режимах, связанных со скачкообразным изменением нагрузки до 25 А; ограничения величины выходного тока на уровне (30±1) А; сохранения работоспособности после короткого замыкания в выходных цепях; передачи информации о текущем состоянии СН, значениях входных и выходных токов, выходного напряжения [5].

АПМ предназначен для обеспечения информационной связи между бортовым компьютером (БК), РТ, ЗРУ, СН и модуля контроля и управления АБ.

**Реализация принципа зонного регулирования**

Система управления АКР автоматически стабилизирует выходное напряжение на уровне 28,5 В. Модули РТ, ЗРУ и СН в АКР образуют единую систему управления с отрицательной обратной связью, состоящую из корректирующих звеньев, исполнительных устройств, датчиков обратных связей и объекта управления – силового фильтра и нагрузки [5]. Принцип регулирования в АКР СЭС схематически изображен на функциональной схеме на рис. 1.

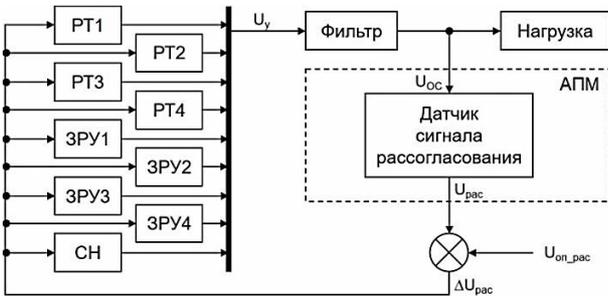


Рис. 1. Функциональная схема регулирования АКР

Сигнал рассогласования определяется разницей между опорным  $U_{on}$  (28,5 В) и фактическим напряжением  $U_{OC}$  на шине питания с необходимым усилением датчика рассогласования  $K_{OY}$  для улучшения точности регулирования и коэффициентом передачи датчика напряжения  $K_{ДН}$ :

$$U_{рас} = K_{OY} \cdot K_{ДН} \cdot (U_{on} - U_{OC}). \quad (1)$$

Ошибка сигнала рассогласования  $\Delta U_{рас}$  определяется разницей  $U_{рас}$  и опорным сигналом рассогласования  $U_{on\_рас}$ :

$$\Delta U_{рас} = U_{on\_рас} - U_{рас}. \quad (2)$$

Значение  $\Delta U_{рас}$  служит входным задающим сигналом регуляторов в цифровых контроллерах модулей РТ, ЗРУ, СН, на выходах которых формируется единый сигнал управления  $U_y$  с учетом зоны работы каждого модуля:

$$U_y = K_n \cdot \Delta U_{рас} + K_u \cdot \int_{i=0}^5 (\Delta U_{рас} - i \cdot U_{см}) di, \quad (3)$$

где  $i$  – номера зон работы модулей;  
 $U_{см}$  – смещение сигнала управления (ширина зоны регулирования);  
 $K_n$  – пропорциональная составляющая коэффициента передачи сигнала ошибки;  
 $K_u$  – интегральная составляющая коэффициента передачи сигнала ошибки.

В АКР для совместной работы модулей РТ, ЗРУ, СН, преобразования и накопления энергии заложен принцип зонного регулирования с общим каналом управления по напряжению. Для этого вся область возможного изменения сигнала управления  $U_y$  разбита на зоны работы, при этом каждому типу модулей выделена своя зона работы. Принцип зонного регулирования показан в виде графика, приведённого на рис. 2.

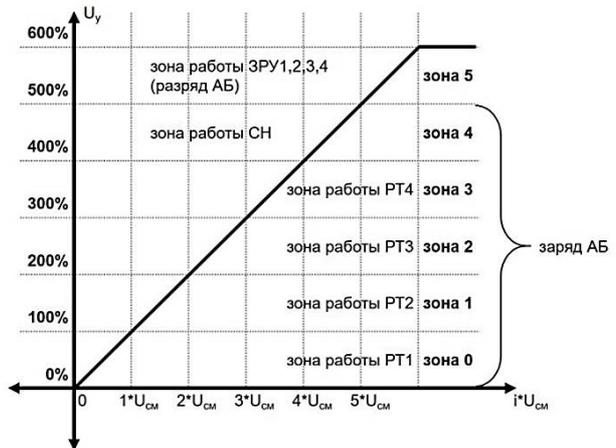


Рис. 2. График совместной работы модулей АКР с разбиением на зоны

Разделение на зоны при общем канале управления осуществляется за счёт введения в цифровое ПИ-звено каждого из регуляторов своего значения смещения  $i \cdot U_{см}$ . При таком выполнении системы в зависимости от баланса мощности "потребитель - источники" в работу автоматически включаются требуемые регуляторы [5, 7].

**Система управления АКР**

Система управления АКР, представляющая собой совокупность автоматических регуляторов напряжения и регуляторов тока с обратной связью, обеспечивает поддержание с заданными точностью и быстродействием выходного напряжения на шине 28,5 В и ограничение токов по заданным уставкам и командам от БК. Регулирование величин напряжения и токов осуществляется на основе широко из-

вестного принципа ПИД-регулирования с выработкой ШИМ-сигналов управления. Все ПИД-регуляторы являются полностью цифровыми, что позволяет поддерживать необходимую точность и стабильность в системе. В АРК для совместной работы модулей регулирования тока, преобразования и накопления энергии заложен принцип зонного регулирования с общим каналом управления по напряжению.

Параметры системы управления АРК:

- частота ШИМ – 50 кГц;
- полоса пропускная контура регулирования напряжения – 150 Гц;
- полоса пропускная контура регулирования тока – 5000 Гц;
- разрешение ШИМ-сигнала 0,0625 %;
- время синхронизации по CAN-сети  $T_c = 300$  мкс.

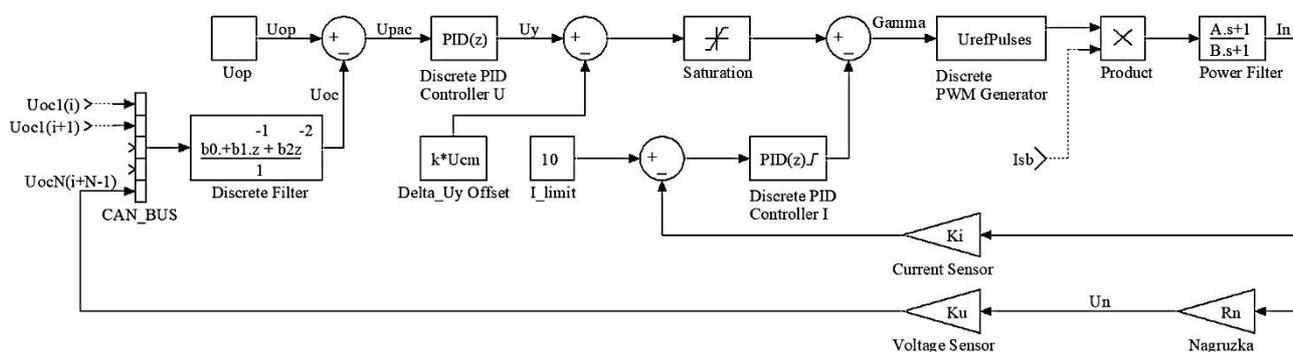
Синхронизация работы модулей и их диагностика построены на базе цифровой шины CAN. Каждый модуль имеет свой номер и циклически передаёт пакет данных, содержащий информацию о  $U_{oc}$ ,  $I_n$ ,  $I_{ab}$ ,  $U_{ab}$ ,  $I_{sb}$ ,  $\Gamma$ ,  $T_{корн}$  силовых приборов, диагностическую информацию. Время передачи пакета – такт 300 мкс. Каждому модулю отведено строго определённое время для передачи своего пакета – такт 300 мкс. Все остальные модули одновременно принимают текущий пакет данных. Значение  $U_{oc}$ , полученное в настоящем такте, используется для расчёта  $\Gamma$  в текущем и во всех остальных модулях. Контур регулирования тока не используют общий канал управления, каждый модуль индивидуально обрабатывает уставку по току. При неисправности какого-либо модуля происходит автоматическое исключение его из про-

цесса управления, происходит автоматическая перенумерация остальных модулей, и цикл передачи данных не прерывается.

Структурные схемы формирования управляющего воздействия ( $\Gamma$ ) для регуляторов АРК (РТ, ЗРУ, СН) приведены на рис. 3-6, где обозначены:

- $U_{op}$  – опорное напряжение РТ, ЗРУ и СН;
- $U_{oc} = K_u \cdot U_n$  – средневзвешенное значение напряжения обратной связи;
- $U_{oc1}(i) \dots U_{ocN}(i+N-1)$  – отсчеты напряжений обратной связи модулей 1...N (РТ, ЗРУ) в моменты времени  $(i) \dots (i+N-1)$  соответственно;
- $U_{oc1}$ ,  $U_{oc2}$  – отсчеты напряжения обратной связи СН;
- $U_{pac} = U_{on} - U_{oc}$  – сигнал рассогласования по напряжению;
- $k$  – номер зоны работы ШИМ конкретного модуля;
- $U_{cm}$  – ширина зоны работы ШИМ конкретного модуля;
- $\Gamma$  – коэффициент заполнения ШИМ-сигнала;
- $U_n$  – напряжение на нагрузке;
- $I_n$  – ток нагрузки;
- $I_{sb}$  – ток СБ;
- $R_n$  – сопротивление нагрузки;
- $U_{ab}$  – напряжение АБ;
- $I_{ab}$  – ток АБ;
- $K_i$ ,  $K_u$  – коэффициенты передачи датчиков тока и напряжения;
- $I_y$  – ток уставки.

Алгоритмы формирования управляющего воздействия ( $\Gamma$ ) указаны на соответствующих рисунках.

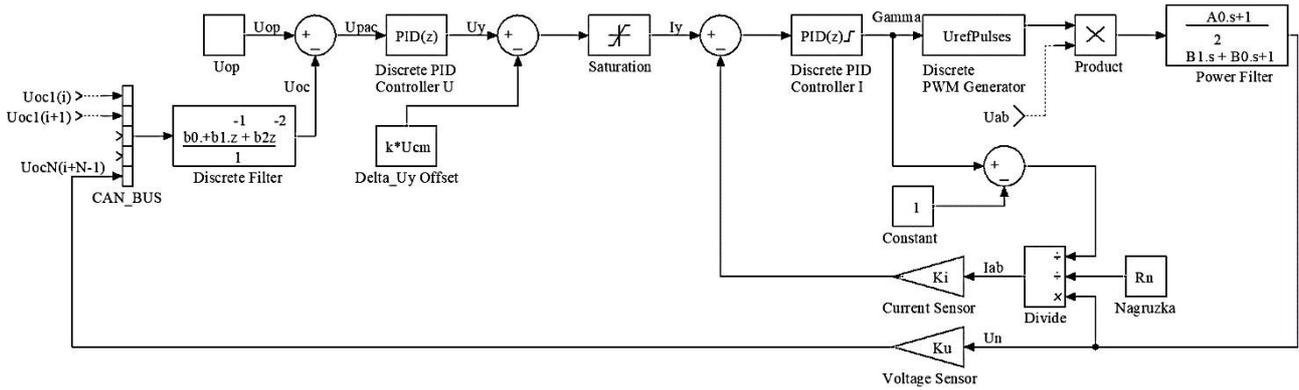


Модуль РТ:

$$U_y = K_{n \ u} \cdot U_{pac} + (I_{pac}) \cdot K_{u \ u} + K_{\partial \ u} \cdot (dU_{pac}/dt),$$

$$\Gamma = -K_{n \ i} \cdot (I_{limit} - I_{oc}) + (I_{limit} - I_{oc}) \cdot K_{u \ i} + U_y - k \cdot U_{cm}, \text{ при } I_{limit} \leq I_{oc}$$

Рис. 3. Структурная схема формирования управляющего воздействия в регуляторе РТ

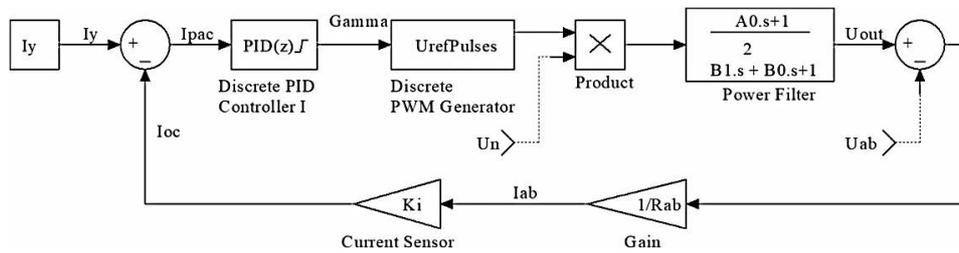


Модуль ЗРУ (режим разряд):  

$$I_y = U_y - k \cdot U_{cm};$$

$$Gamma = K_{n_i} \cdot (I_y - I_{oc}) + \int (I_y - I_{oc}) \cdot K_{u_i};$$

Рис. 4. Структурная схема формирования управляющего в регуляторе ЗРУ в режиме разряда АБ

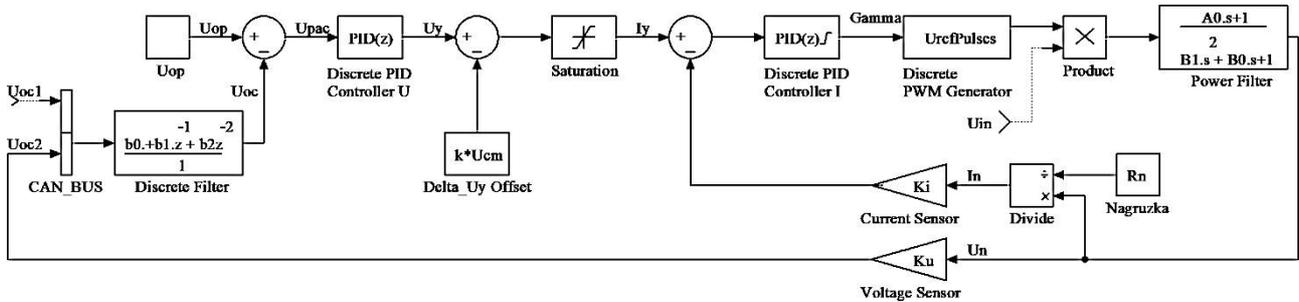


Модуль ЗРУ (режим заряд):  

$$Gamma = K_{n_i} \cdot (I_y - I_{oc}) + \int (I_y - I_{oc}) \cdot K_{u_i};$$

$$I_{oc} = K_i \cdot I_{ab}.$$

Рис. 5. Структурная схема формирования управляющего воздействия в регуляторе ЗРУ в режиме заряда АБ



Модуль СН:  

$$U_y = K_{n_u} \cdot U_{pac} + \int U_{pac} \cdot K_{u_u};$$

$$Gamma = K_{n_i} \cdot (U_y - I_{oc}) + \int (U_y - I_{oc}) \cdot K_{u_i}.$$

Рис. 6. Структурная схема формирования управляющего воздействия в регуляторе СН

В соответствии с рис. 2, вначале работает РТ1, затем, по мере увеличения нагрузки, подключаются следующие модули: РТ 2, 3, 4; при дальнейшей нехватке энергии включается модуль СН, в самой верхней зоне при максимальной нагрузке или нахождении транспортного корабля в тени, энергией СЭС обеспечивают АБ. Разрядные и зарядные токи АБ регулируются в соответствии с ПИД-законом (для одного ЗРУ):

$$Gamma = K_{n_i} \cdot (U_y - I_{oc}) + \int (U_y - I_{oc}) \cdot K_{u_i} + K_{d_i} \cdot d(U_y - I_{oc}) / dt, \quad (4)$$

$$I_{oc} = K_{om} \cdot I_{ab}, \quad (5)$$

где  $Gamma$  – коэффициент заполнения ШИМ-сигнала,

$K_{n_{is}}$ ,  $K_{u_{is}}$ ,  $K_{d_{is}}$  – пропорциональная, интегральная и дифференциальная составляющие ПИД-регулятора тока;

$I_{oc}$  – сигнал обратной связи по току;

$K_{om}$  – коэффициент передачи датчика тока;

$I_{a\delta}$  – ток одной АБ.

### Заключение

Таким образом, в системе организуется зонный принцип регулирования, который обеспечивает непрерывное изменение сигнала  $U_y$  в зависимости от энергобаланса системы и параметрических возмущений. Систему в общем можно рассматривать, при определенных допущениях, как квазилинейную, что позволяет использовать известные линейные методы синтеза и анализа системы управления. При этом настройка контуров регулирования с заданными показателями качества осуществляется раздельно для каждого типа модулей РТ, ЗРУ и СН.

### Литература

1. Гуцин В.Н. Системы энергоснабжения. Основы устройства космических аппаратов: учебник для вузов. М.: Машиностроение, 2003. 272 с.

2. Варенбуд Л.Р., Волокитин В.Н. Инновационные решения при разработке аппаратуры регулирования и контроля систем энергоснабжения космических аппаратов // Энергия - XXI век. 2013. №1 (84). С. 16-27.

3. Савенков В.В., Тищенко А.К., Волокитин В.Н. Принципы построения аппаратуры регулирования и контроля современных систем электроснабжения малоразмерных космических аппаратов // Решетневские чтения. 2017. Т. 1. С. 325-326.

4. Савенков В.В., Тищенко А.К., Волокитин В.Н. Аппаратура регулирования и контроля системы электропитания перспективного пилотируемого транспортного корабля // Решетневские чтения. 2018. Т. 1. С. 303-304.

5. Таболин И.И., Данилов А.Д. Разработка структуры аппаратуры регулирования и контроля системы энергоснабжения космического аппарата // Альтернативная и интеллектуальная энергетика. Воронеж: ВГТУ, 2020. С. 216-217.

6. Таболин И.И., Данилов А.Д. Модуль микроконтроллера в системе автоматического регулирования и контроля энергоснабжения бортовой сети космического аппарата // Новые технологии в научных исследованиях, проектировании, управлении, производстве. Воронеж: ВГТУ, 2019. С. 303-304.

7. Таболин И.И., Данилов А.Д. Реализация зонного принципа работы аппаратуры регулирования и контроля бортовой энергосистемы космического аппарата // Актуальные проблемы электроэнергетики. Н. Новгород: Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р.Е. Алексеева, 2020. С. 132-135.

Поступила 05.08.2021; принята к публикации 20.10.2021

### Информация об авторах

**Таболин Иван Иванович** – аспирант кафедры компьютерных интеллектуальных технологий проектирования, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: iwan.tabolin@yandex.ru

**Кузьменко Роман Юрьевич** – аспирант кафедры компьютерных интеллектуальных технологий проектирования, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: kuzromik7@yandex.ru

**Данилов Александр Дмитриевич** – д-р техн. наук, профессор кафедры компьютерных интеллектуальных технологий проектирования, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: danilov-ad@yandex.ru

## IMPLEMENTATION OF ZONE PRINCIPLE IN THE CONTROL SYSTEM OF REGULATION AND MONITORING EQUIPMENT OF SPACECRAFT ONBOARD NETWORK

I.I. Tabolin, R.Yu. Kuz'menko, A.D. Danilov

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

**Abstract:** the article describes the application of the zone regulation principle in the development of control system for the regulation and monitoring equipment of the spacecraft's onboard network. We present brief descriptions of the regulation and monitoring equipment and its constituent modules. We show regulation functional diagram of the regulation and monitoring equipment and collaboration of its modules graph with the division into zones. We describe the control system for the regulation and monitoring equipment. We present structural diagrams of the formation of a control action for all regulators of the regulation and monitoring equipment. Zone regulation principle implementation is achieved by the fact that the entire area of possible changes in the control signal is divided into zones of operation. Each type of module has its own zone of operation. This approach provides automatic connection of the required regulators depending on the power balance of the "consumer - sources". This principle provides a continuous change in the control signal depending on the energy balance of the system and parametric disturbances. The system can be considered as quasilinear, which makes it possible to use well-known linear meth-

ods of synthesis and analysis of control system. We carried out control loops customization with determined quality indicators separately for each type of the regulation and monitoring equipment modules.

**Key words:** power supply system, control system, zone regulation principle, regulation and monitoring equipment, onboard network, spacecraft.

#### References

1. Gushchin V.N. "Power supply systems. Fundamentals of spacecraft construction" ("Sistemy energopitaniya. Osnovy ustroystva kosmicheskikh apparatov"), Moscow: Mashinostroenie, 2003, 272 p.
2. Varenbud L.R., Volokitin V.N. "Innovative solutions in the development of regulation and monitoring equipment of spacecraft power supply systems", *Energy - XXI century (Energiya - XXI vek)*, Voronezh, 2013, no. 1 (84), pp. 16-27.
3. Savenkov V.V., Tishchenko A.K., Volokitin V.N. "Principles of construction of regulation and monitoring equipment of modern power supply systems for small spacecraft", *Reshetnev Readings (Reshetnevskie chteniya)*, Krasnoyarsk, 2017, vol. 1, pp. 325-326.
4. Savenkov V.V., Tishchenko A.K., Volokitin V.N. "Regulation and monitoring equipment of the power supply system of a promising manned transport vehicle", *Reshetnev Readings (Reshetnevskie chteniya)*, Krasnoyarsk, 2018, vol. 1, pp. 303-304.
5. Tabolin I.I., Danilov A.D. "Development of the regulation and monitoring equipment structure of the spacecraft power supply system", *Alternative and Intellectual Energy (Al'ternativnaya i intellektual'naya energetika)*, VSTU, 2020, pp. 216-217.
6. Tabolin I.I., Danilov A.D. "Microcontroller module of automatic regulation and control system of spacecraft power supply onboard network", *New Technologies in Scientific Research, Design, Management, Production (Novye tekhnologii v nauchnykh issledovaniyakh, proyektirovaniy, upravlenii, proizvodstve)*, VSTU, 2019, pp. 303-304.
7. Tabolin I.I., Danilov A.D. "Implementation of the zone principle of operation of the equipment for regulation and control of the onboard power system of the spacecraft", *Actual problems of the electric power industry (Aktual'nye problemy elektroenergetiki)*, Nizhny Novgorod, 2020, pp. 132-135.

Submitted 05.08.2021; revised 20.10.2021

#### Information about the authors

**Ivan I. Tabolin**, Graduate student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: iwan.tabolin@yandex.ru

**Roman Yu. Kuz'menko**, Graduate student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: kuzromik7@yandex.ru

**Aleksandr D. Danilov**, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: danilov-ad@yandex.ru

## ДВУХРЕФЛЕКТОРНАЯ АНТЕННА BI-QUAD ДЛЯ ЗАДАЧ WLAN

С.М. Фёдоров<sup>1,2</sup>, Е.А. Ищенко<sup>1</sup>, И.А. Баранников<sup>1</sup>, К.А. Бердников<sup>1</sup>, В.В. Кузнецова<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 двухрефлекторная Bi-Quad антенна, способная работать в диапазоне частот, соответствующих WLAN Wi-Fi 2,4 ГГц. Благодаря возможности управления положением рефлекторов удается добиться изменения направления излучения, что повышает эффективность использования антенны, коэффициент направленного действия. При управлении происходит поворот ячеек, из которых сформированы отражательные структуры, что позволяет пропускать электромагнитное излучение, которое формирует излучатель из медного провода в форме цифры «восемь». Предложенная конструкция позволяет обеспечить три стабильных режима работы антенны: двустороннее излучение, когда оба рефлектора в открытом положении, при таком режиме у антенны наблюдается одинаковое излучение в обоих направлениях с равным КНД; излучение вверх, в данном режиме верхний рефлектор открыт, что приводит к свободному протеканию электромагнитных волн, а от закрытого нижнего происходят отражения, в результате этого происходит увеличение КНД антенны по сравнению с ситуацией двустороннего излучения; аналогичная ситуация происходит при излучении вниз, когда открыт нижний рефлектор, так электромагнитные волны отражаются от закрытого верхнего рефлектора вниз, что приводит к увеличению КНД антенны. Предложенная конструкция обладает высокой эффективностью в диапазоне рабочих частот

**Ключевые слова:** рефлектор, Bi-Quad антенна, многорежимный рефлектор, Wi-Fi антенна

## Введение

Для обеспечения функционирования устройств в частотных диапазонах WLAN – 2,4 ГГц применяются Bi-Quad антенны [1], которые представляют собой рефлектор и излучатель, который имеет форму цифры «8». Рефлектор позволяет обеспечить направленность антенны для достижения улучшенных характеристик излучения. Но применение одного рефлектора ограничивает антенну лишь одним направлением излучения, что является недостатком устройства.

Перспективным решением выступает Bi-Quad антенна с двумя динамически управляемыми рефлекторами, которые способны осуществить регулировку направления излучения от двустороннего до направленного.

Для управления рефлектором в данной работе предлагаются вдающиеся рефлекторы, сформированные из периодических структур, в перспективе в роли рефлектора могут выступать две метаматериальные пластины, основанные на структуре из [2].

## Конструкция антенны

Разработанная антенна предназначена для работы в частотном диапазоне от 2401 МГц до 2495 МГц, что обеспечивает покрытие диапазона Wi-Fi 2,4 ГГц. Излучатель представляет собой медный провод, который изогнут в форме цифры «8» (рис. 1).

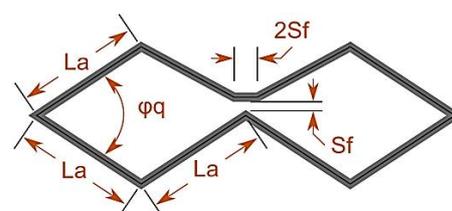


Рис. 1. Модель излучателя

Антенна обладает геометрическими размерами, которые приводятся в табл. 1.

Таблица 1

Размеры излучателя

La, мм	$\varphi_q, ^\circ$	H, мм	Dw, мм	Sf, мм
35,57	55,17	30,88	2,359	1,786

Антенна со сформированными рефлекторами приводится на рис. 2.

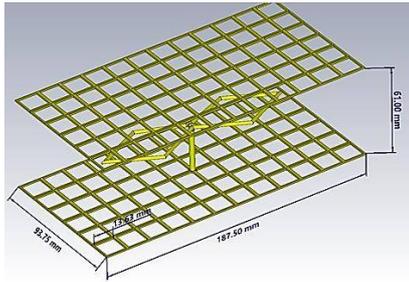


Рис. 2. Антенна с рефлекторами в закрытом состоянии

Так как при предложенной конструкции возможны три режима работы (рис. 3), излучение антенны происходит в вертикальной плоскости с разными характеристиками электромагнитного поля:

- 1) при открытии обоих рефлекторов происходит излучение и вверх, и вниз (рис. 3а);
- 2) при закрытом нижнем и открытом верхнем – направление излучения вверх, так как электромагнитная волна не способна преодолеть нижний рефлектор (рис. 3б);
- 3) при закрытом верхнем и открытом нижнем – излучение вниз (рис. 3в).

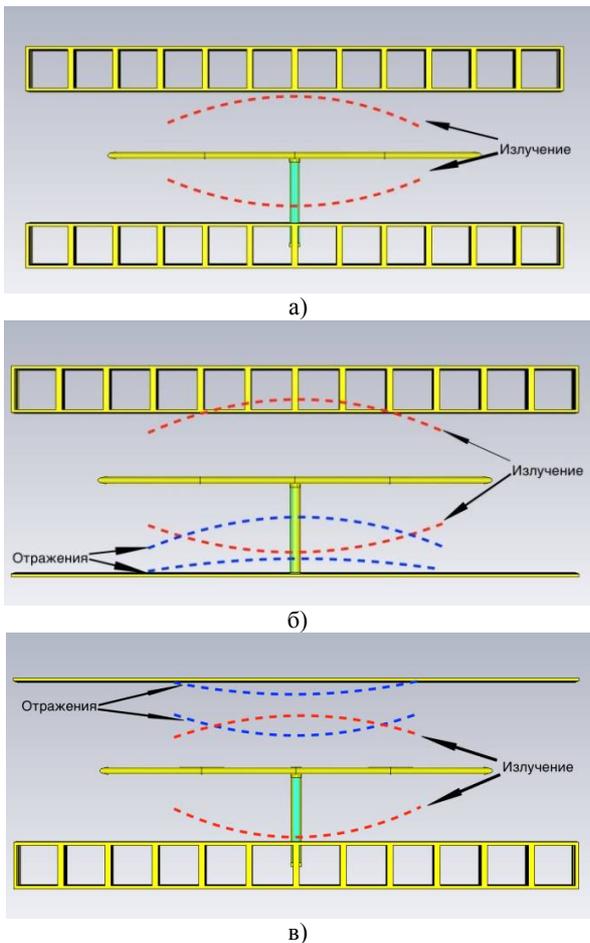


Рис. 3. Антенна при различных состояниях рефлекторов: а) оба открыты; б) открыт верхний; в) открыт нижний

При выполнении электродинамического моделирования производился анализ всех рассмотренных ситуаций. Особо важным является то, что диапазон рабочих частот всех трех рассмотренных антенн сохранялся от 2401 МГц до 2495 МГц. Для определения диапазона рабочих частот воспользуемся графиком  $S_{11}$ , диапазон рабочих частот определяется по уровню -10 дБ (рис. 4).

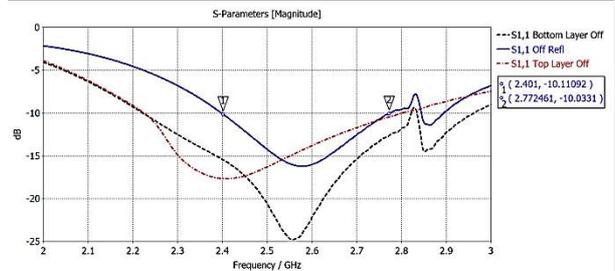


Рис. 4.  $S_{11}$  параметры полученной антенны при всех возможных случаях

Как видно, наиболее узкая полоса рабочих частот наблюдается при открытии обоих рефлекторов, однако диапазон рабочих частот составляет от 2,4 ГГц до 2,77 ГГц, что соответствует изначальным требованиям к антенне. Для анализа влияния рефлектора на картину электромагнитных волн рассмотрим рис. 5.

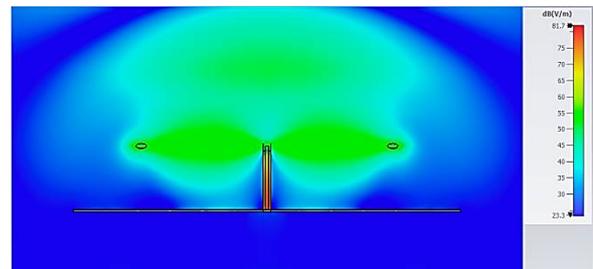


Рис. 5. Картина Е-поля на частоте 2,4 ГГц при закрытом нижнем рефлекторе

По полученной картине видно, что излученные электромагнитные волны отражаются от рефлектора, что приводит к фокусировке излучения в требуемом направлении.

На рис. 6 приводятся картины диаграмм направленности, которые соответствуют разным режимам работы.

Для удобства анализа полученных результатов воспользуемся табл. 2.

Таблица 2

Характеристики диаграмм направленности  $f=2,4$  ГГц ( $\varphi = 90^\circ$ )

Тип рефлектора	Оба открыты	Открыт верхний	Открыт нижний
Направление излучения, °	17, 163	2	177
КНД, дБи	5,68	10,2	9,96

Продолжение табл. 2

Ширина главного лепестка (3 дБ), °	112,8	73,9	72,8
УБЛ, дБ	--	-12,3	-10,8
КПД, %	89,59	97,82	96,61

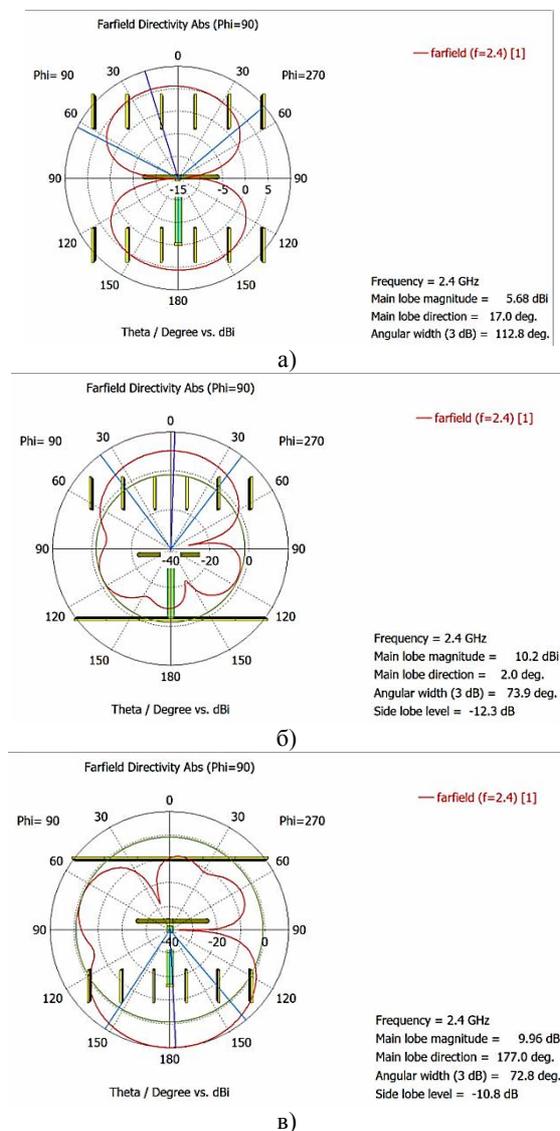


Рис. 6. Диаграммы направленности полученной антенны: а) открыты оба рефлектора; б) открыт верхний; в) открыт нижний

Полученные характеристики диаграмм направленности показывают, что у антенны наблюдаются три режима работы: всестороннее излучение (и вверх, и вниз), излучение вверх, излучение вниз. Полученные характеристики антенны сохраняются во всем рабочем диапазоне частот, что позволяет обеспечить ее применение в диапазоне WLAN 2,4 ГГц.

### Заключение

Антенны с активным рефлектором являются перспективными устройствами обеспечения связи, так как способны обеспечить излучение электромагнитной энергии в нескольких направлениях путем перестройки конструкции. Перспективным является применение коммутируемых метаматериалов, которые позволяют обеспечить управление характеристиками антенн без изменения их физических характеристик [2].

Предложенная конструкция антенны позволяет улучшить прием и передачу сигнала, так как уменьшает побочные излучения и позволяет сфокусировать электромагнитную энергию в нужном направлении.

### Литература

1. Constantine A. Balanis, Antenna Theory Analysis and Design, Fourth Edition, Wiley: Canada, 2016. 1073 p.
2. Исследование влияния интегрированного в конструкцию пирамидального рупора метаматериала на диаграмму направленности / Е.А. Ищенко, Ю.Г. Пастернак, М.А. Сиваш, С.М. Фёдоров // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2020. Т. 16. № 6. С. 107-113.

Поступила 02.07.2021; принята к публикации 20.10.2021

### 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>

**Баранников Илья Андреевич** – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), тел. +7(473)243-77-29, e-mail: 8thbar@gmail.com

**Бердников Кирилл Алексеевич** – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), тел. +7(473)243-77-29, e-mail: kir\_ber@mail.ru

**Кузнецова Валерия Васильевна** – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), тел. +7(473)243-77-29, e-mail: lera.kuznetsova.20@bk.ru

## BI-QUAD DUAL REFLECTOR ANTENNA FOR WLAN TASKS

S.M. Fyedorov<sup>1,2</sup>, E.A. Ishchenko<sup>1</sup>, I.A. Barannikov<sup>1</sup>, K.A. Berdnikov<sup>1</sup>, V.V. Kuznetsova<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 discusses a two-reflector Bi-Quad antenna capable of operating in the frequency range corresponding to WLAN Wi-Fi 2.4 GHz. Thanks to the ability to control the position of the reflectors, it is possible to achieve a change in the direction of radiation, which increases the efficiency of using the antenna, and increases the directivity. During control, the cells are rotated, from which the reflective structures are formed, which allows the transmission of electromagnetic radiation, which is formed by the emitter, formed from a copper wire in the shape of the number "eight". The proposed design makes it possible to provide three stable modes of antenna operation: double-sided radiation, when both reflectors are in the open position, in this mode the antenna has the same radiation in both directions with equal directivity; radiation upward, in this mode, the upper reflector is open, which leads to free flow of electromagnetic waves, and reflections occur from the closed lower reflector, as a result of this, the antenna directivity increases in comparison with the situation of two-sided radiation. A similar situation occurs when radiating downward, when the lower reflector is open, so electromagnetic waves are reflected from the closed upper reflector downward, which leads to an increase in the antenna directivity. The proposed design is highly efficient in the operating frequency range

**Key words:** reflector, Bi-Quad antenna, multimode reflector, Wi-Fi antenna

### References

1. Balanis C.A. "Antenna theory analysis and design", Canada: Wiley, 2016, 1073 p.
2. Ishchenko E.A., Pasternak Yu.G., Sivash M.A., Fedorov S.M. "Investigation of the influence of the metamaterial pyramidal horn integrated into the construction on the directional diagram", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo technicheskogo universiteta)*, 2020, vol. 16, no. 5. pp 107-113.

Submitted 02.07.2021; revised 20.10.2021

### 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 Solnechanya str., Voronezh 39026, Russia), tel.: +7 (473)243-77-29, 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>

**Il'ya A. Barannikov**, student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel.: +7 (473)243-77-29, e-mail: 8thbar@gmail.com

**Kirill A. Berdnikov**, student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel.: +7 (473)243-77-29, e-mail: kir\_ber@mail.ru

**Valeriya V. Kuznetsova**, student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel.: +7 (473)243-77-29, e-mail: lera.kuznetsova.20@bk.ru

## АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ТЕСТЕР УСТОЙЧИВОСТИ ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ К ВОЗДЕЙСТВИЮ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ РАЗРЯДОВ

М.А. Ромашенко, Д.С. Сеимова, М.А. Иванов

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** рассмотрены основные подходы проверки функциональности электронных средств при воздействии электростатического разряда, а также представлены основные этапы разработки автоматизированного тестера устойчивости электронных средств к электростатическому разряду. Электростатический разряд является одним из основных факторов, способствующих снижению надежности и производительности электронных устройств. Предложен подход к повышению качества разработки электронных изделий на основе автоматизированного устройства для тестирования электронных средств на устойчивость к электростатическим разрядам. Представлена концептуальная структура программно-аппаратного комплекса для оценки влияния электростатического разряда на электронные средства. В конструкции испытательного генератора предусмотрены защитные механизмы, предотвращающие создание непреднамеренных излучаемых или кондуктивных электромагнитных помех импульсного или непрерывного характера для исключения паразитных эффектов, способных оказать влияние на испытываемое или вспомогательное оборудование. Целью исследования, в рамках которого происходила разработка тестирующего устройства, является повышение надежности функционирования электронных средств и приборов при воздействии на них электростатических разрядов. Благодаря предлагаемому подходу становится возможным обеспечить эффективность тестирования конструкций электронных средств на устойчивость к электростатическому разряду на основе комплексных методов оптимального проектирования с учетом обеспечения требований международных стандартов

**Ключевые слова:** электромагнитная совместимость, электростатический разряд, моделирование электромагнитных процессов, электронные средства, электромагнитные помехи

### Введение

Электростатический разряд (ЭСР) – это лавинообразное формирование кратковременного тока, образовавшегося между двумя объектами с разными электрическими потенциалами. Он вызывает деградацию электронных устройств, что влечет за собой производственные потери, ежегодно оцениваемые несколькими миллиардами долларов. Разработчики электротехнической промышленности в разных отраслях деятельности, начиная от потребительских до систем управления промышленными процессами, военной и космической отрасли, должны учитывать воздействие ЭСР при конструировании и производстве устройств перед выводом на массовый рынок. В настоящее время существует ряд стандартов для проведения тестов на устойчивость к ЭСР, отвечающих требованиям различных сегментов электротехнической индустрии.

Защита от влияния ЭСР состоит из применения специальных схемотехнических подходов, базирующихся, главным образом, на диодных матрицах, ограничительных диодах и стабилитронах. Независимо от того, какая схема защиты будет выбрана по тем или иным

причинам, необходимо выполнить заключительное испытание на электромагнитную совместимость и проверку работоспособности всего функционального узла. Существует несколько видов испытаний. В зависимости от применяемого метода различают тестирование на уровне устройства и тестирование на уровне системы.

### Актуальность

Стабильная работа электронных средств и их устойчивость к воздействию электростатического разряда напрямую зависит не только от конструктивных решений разработчиков, но также и от четкого соблюдения применяемой технологии производства. Понимание всех тонкостей возникновения ЭСР приводит производителей к желанию удостовериться в качестве выпускаемой продукции посредством проведения тестов.

ЭСР является основным источником повреждения для устройств, чувствительных к электростатическим перенапряжениям. Такие компоненты печатного модуля не способны выдержать импульсы напряжения уже от 50 В и могут выйти из строя или в целом снизить эффективность работы устройства. В основном электростатическое перенапряжение формиру-

ется на выводах микросхем в случае воздействия ЭСР на печатный модуль, и без соответствующих мер защиты могут привести к деградации кристаллов или к их полному выходу из строя. Заряды могут создаваться от операторов, обслуживающих оборудование, от металлических объектов, расположенных поблизости. Также на образование зарядов большое влияние оказывает окружающая среда: погодные условия, электромагнитное поле.

Ежегодные потери промышленности от воздействия ЭСР по некоторым оценкам достигают до нескольких миллиардов долларов. В течение многих лет защита от ЭСР считалась важным этапом проверки на электромагнитную совместимость (ЭМС), определенной в соответствии со стандартами МЭК 61340-5-3 [1]. В последние годы меры экранирования от наведенного электростатического поля корпусов электронных средств (ЭС) указывалось как необязательное. Эксперты комитетов по стандартизации обсуждали, являются ли эти меры необходимыми и правильно ли они оцениваются в настоящее время.

В то же время, в условиях модернизации компонентной базы, уменьшения размеров и потребляемой мощности печатного модуля растет чувствительность компонентов микроэлектроники к электростатическому перенапряжению, усовершенствование существующих методов испытаний и методов защиты от воздействия ЭСР является актуальной задачей.

#### **Деградационные процессы в материалах печатного модуля под воздействием электростатического разряда**

ЭСР воздействует на электронные компоненты различными способами. Большие статические напряжения могут проникать в устройства и повреждать сложные внутренние схемы. Влияние ЭСР стало более очевидным, поскольку высокие входные импедансы технологии MOS во всех ее формах означают, что напряжения не рассеиваются, а небольшие размеры проводников и изолирующих прокладок могут быть легко повреждены высокими напряжениями. С уменьшением размеров компонентов печатного модуля увеличивается их восприимчивость к повреждениям от ЭСР.

Устройства, которые наиболее чувствительны к электростатическому разряду, обычно создаются по технологии MOS - металл-оксид-полупроводник. Эти устройства имеют очень высокие импедансы, которые не позво-

ляют заряду рассеиваться контролируемым образом. Однако это не означает, что биполярные устройства защищены от повреждений.

Стандартные CMOS-чипы могут быть подвержены статическим напряжениям всего 250 В. К ним относятся интегральные микросхемы семейства 74НС и 74НСТ, которые широко используются во многих конструкциях из-за их низкого потребления тока. Однако многие из новых микропроцессоров и микросхем LSI используют гораздо меньшие функциональные размеры и не могут выдерживать подобных напряжений, что делает их сверхчувствительными к электростатическим разрядам. Многие усовершенствованные устройства могут перестать функционировать даже при работе с напряжением питания 5В.

Кроме того, обычные биполярные транзисторы могут быть повреждены потенциалом около 500 В. Данное утверждение особенно актуально для более новых транзисторов, которые имеют гораздо меньшую внутреннюю геометрию, обеспечивающую более высокие рабочие частоты. Это только немногие аспекты, характеризующие уровни восприимчивости к ЭСР, что указывает на то, что все полупроводниковые устройства должны рассматриваться как статически чувствительные устройства.

Эффект от ЭСР зависит от большого количества переменных. Большинство из них трудно определить количественно. Уровень статики создается, варьируется в зависимости от используемых материалов и условий окружающей среды. Каждый человек представляет собой конденсатор, на котором удерживается заряд. В среднем, человек представляет собой конденсатор около 300 пФ, но это значение будет сильно варьироваться от одного человека к другому.

Способ разряда также различается. Часто заряд рассеивается очень быстро: обычно менее чем за сто наносекунд. За это время пиковый ток может подняться до 20 - 30 А. Пиковый ток и время разряда зависят от широкого спектра факторов. Однако если используется металлический предмет, например, пинцет или тонкие плоскогубцы, пик тока выше и достигается за более короткое время, чем если бы разряд происходил через конечность человека. Это происходит из-за гораздо меньшего сопротивления металла и, как следствие, более быстрой разрядки. Однако какими бы ни были средства разряда, количество рассеиваемого заряда будет одинаковое [2].

### Методы проверки функциональности электронных средств при воздействии электростатического разряда

В настоящее время для решения задач обеспечения устойчивости электронных средств к ЭСР используются следующие основные подходы: это подходы, подразумевающие привлечение экспертов; подходы, базирующиеся на САПР; подходы с использованием аппаратных тестирующих средств.

Первый подход подразумевает наличие в штате разработчика с достаточными компетенциями и опытом, позволяющими ему по своему субъективному мнению оценить насколько данная конструкция будет устойчива к ЭСР и какова вероятность нормального функционирования устройства или его повреждения от данного типа дестабилизирующих факторов. Данный подход имеет недостаток, связанный с тем, что оценки даются субъективные, основанные на опыте инженера. Кроме того, такой специалист может в любое время покинуть коллектив.

Подходы с применением САПР основаны на эвристических правилах, которые указываются в соответствующем программном комплексе и при загрузке в него моделей печатной платы происходит ее проверка по данным правилам. В случае если какие-то части печатной платы (дорожки или компоненты) потенциально уязвимы для ЭСР, данные сообщения в виде ошибок будут представлены разработчику. Недостатком данного подхода является то, что правила формулируются также субъективно на основе опыта конкретного инженера или типовых рекомендаций. Кроме того, существует достаточно большая вероятность, что САПР не сможет с приемлемой достоверностью оценить последствия воздействия ЭСР на новейшую элементную базу и материалы.

В подходах с использованием аппаратных тестирующих средств на ЭМС формируется ЭСР с заданными характеристиками и происходит непосредственное воздействие на испытуемое устройство. При этом фиксируются выходные параметры объекта испытания, т.е. насколько они отклоняются от нормальных параметров или остаются в пределах допуска. На основании полученного массива данных делаются выводы о соответствии требованиям устойчивости к ЭСР и рекомендации по их возможному повышению. Недостатком такого подхода является то, что предлагаемое в настоящее время разработки предназначены

для ручного использования, они не предполагают использование в качестве автоматизированного комплекса и не позволяют собирать информацию в автоматизированном режиме. Кроме того, места нанесения электростатического разряда также определяются инженером субъективно [3].

Наиболее распространенный способ тестирования электронных средств на устойчивость к воздействию ЭСР заключается в формировании тестирующих импульсов при помощи генераторов ЭСР. На рис. 1 приведена структурная схема стандартного генератора электростатических разрядов.

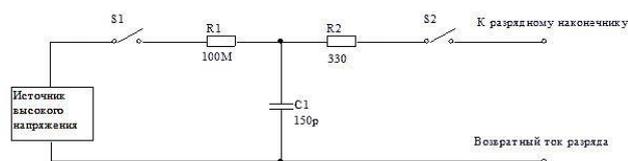


Рис. 1. Структурная схема генератора ЭСР, где R1 – зарядная емкость;

R2 – разрядная емкость, определяющая ток разряда; C1 – зарядно-разрядная емкость;

S1 – подключение источника высокого напряжения для заряда цепи;

S2 – подключение разрядного наконечника к цепи

Применение в данном генераторе современного микроконтроллера позволяет формировать разрядные импульсы с различной величиной тока и напряжения, а также различные формы разрядных импульсов.

Обычно при проведении испытаний используют генератор, включающий в себя набор разрядных наконечников для прямого и непрямого воздействия импульса, пластин связи и устройств калибровки [4].

Для выполнения тестирования всей системы необходимо расположить ее на горизонтальной пластине связи, располагающейся на диэлектрическом столе. При этом пластина связи должна быть соединена с заземлением. Тестируемое устройство также соединяется с системой заземления в соответствии с ТУ. Затем осуществляется выборка определенных точек воздействия электростатических импульсов, которые являются наиболее уязвимыми. В выбранные точки производятся тестовые ЭСР как контактным методом, так и воздушным в пластину связи. Количество импульсов в каждой точке должно составлять не менее 10. Разрядное напряжение постепенно увеличивают от 1кВ до предельно допустимого значения, указанного в ТУ. Показатели производительности

сти должны оставаться неизменными до проведения тестирования и после него [5].

При проведении тестирования электронных средств ЭСР-генератором происходит проверка всех путей распространения электростатического разряда, возникающих в процессе его эксплуатации. Успешному прохождению тестирования способствуют различные методы защиты электрических цепей, которые могут быть потенциально уязвимы для ЭСР [6].

### Реализация устройства

Разрабатываемый тестер является автоматизированной системой. В конструкции предусмотрено прецизионное перемещение высоковольтного разрядника относительно тестируемого объекта. Подобные системы автоматизированного позиционирования активно используются на фрезерных ЧПУ станках, 3D принтерах и др.

На рис. 2 приведена структурная схема предлагаемого программно-аппаратного комплекса тестирования на устойчивость к электростатическому разряду.

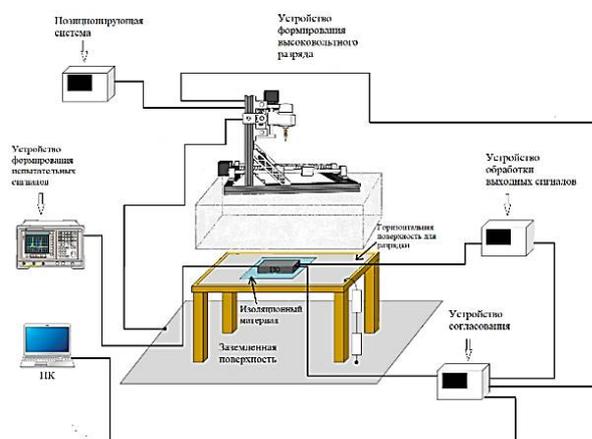


Рис. 2. Структурная схема автоматизированного тестера устойчивости электронных средств к электростатическому разряду

### Высоковольтное разрядное устройство

Для выполнения тестирования электронных средств на устойчивость к высоковольтному разряду используется генератор электростатического разряда (рис. 3). Управление генератором реализовано при помощи микроконтроллера. Основными компонентами устройства являются: компоненты разрядки, сопротивление заземления, целевая нагрузка калибровки и трансформаторные обмотки.

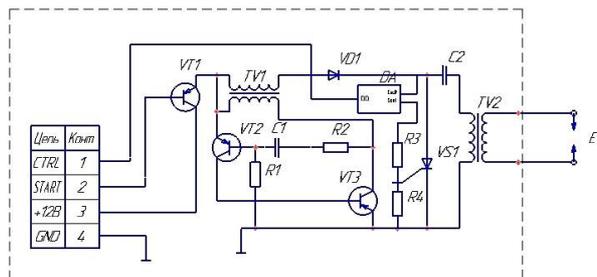


Рис. 3. Электрическая принципиальная схема генератора электростатического разряда

Представленная электрическая принципиальная схема генератора содержит следующие основные компоненты. Через разъем производится управление разрядом и подается питание. Управляющий сигнал через транзистор VT1 воздействует на схему генерации, состоящую из транзисторов VT2, VT3 и трансформатора TV1. Непосредственное формирование высоковольтного импульса происходит при помощи трансформатора TV2, управляемого при помощи тиристора. Высоковольтный разряд возникает на наконечниках E1. При помощи цифрового потенциометра происходит непосредственное воздействие на цепь формирования высоковольтного разряда и затем осуществляется достижение требуемых параметров.

Наконечник разрядника E1 изготавливается из стали и имеет заостренную форму (рис. 4).

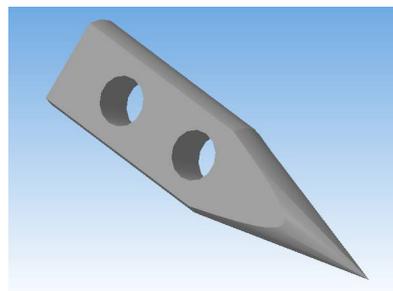


Рис. 4. 3D-модель наконечника разрядника

Компоненты высоковольтного разрядника и наконечник устанавливаются в корпус, закрепленный на плавающей головке системы позиционирования (рис. 5).

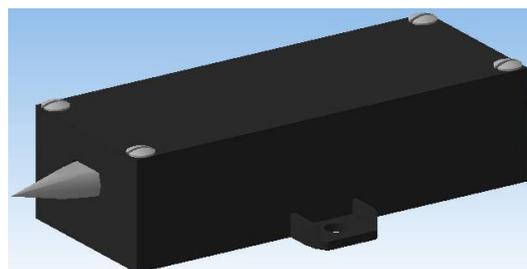


Рис. 5. 3D-модель высоковольтного разрядного устройства

### Кинематика тестирующего устройства

Существует несколько самых распространенных кинематических моделей. Они основаны на декартовой системе координат и, соответственно, работают по осям X, Y и Z. Задаются координаты точек, по которым, в нашем случае разрядное устройство, меняет свое положение относительно нижней части установки, где располагается тестируемая печатная плата. Однако также существует несколько вариантов относительно движения по трем осям:

- разрядное устройство может передвигаться по оси Z, в то время как сама платформа, к которой крепится наше устройство, движется по горизонтали;

- платформа и разрядное устройство движутся сонаправленно по параллельным осям вверх;

- платформа остается в неподвижном положении, в то время как разрядное устройство может двигаться в трех направлениях.

Самым оптимальным вариантом, который прост в реализации, является первый. Данная кинематическая схема отличается несколькими преимуществами относительно ранее рассмотренных:

- простота передвижения и невысокая стоимость изготовления;

- отсутствие жестких требований к габаритным размерам;

- легко модернизируема;

- высокая распространенность расходных материалов, а также существует возможность использовать различные расцветки составляющих конструкции;

- подходит для работы на предприятиях с массовым выпуском изделий, т.к. предназначена для тестирования разногабаритных печатных плат.

При реализации автоматизированного тестера устойчивости электронных средств к электростатическому разряду будем использовать кинематическую модель H-Bot, представленную на рис. 6. Конструкция такой кинематической модели предполагает всего один длинный ремень, который натянут по форме, напоминающей обведенную по контуру букву H, за что схема и получила название H-Bot. Эта концепция представляет собой взаимодействие двух вращающихся моторов, которые соединены одним H-образным кольцевым ремнем вокруг двух ступенчатых линейных осей.

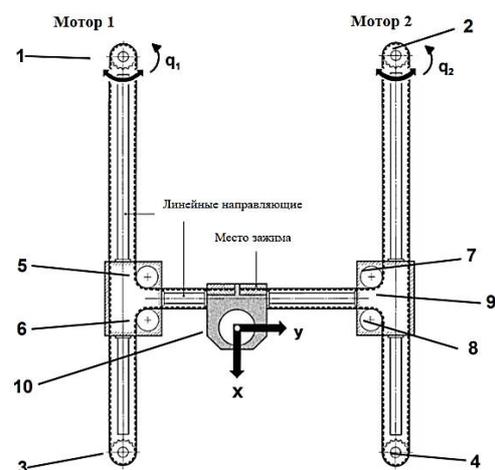


Рис. 6. Кинематическая модель H-Bot

При работе шаговых двигателей 1 и 2 в одном направлении происходит перемещение платформы с разрядным устройством по оси X. Если вращение происходит в противоположные стороны, то платформа и разрядное устройство перемещаются соответственно по оси Y.

Кинематика механизма H-Bot, сформулирована в выражении (1).

$$\begin{Bmatrix} x \\ y \end{Bmatrix} = r_d \begin{bmatrix} -1 & 1 \\ -1 & -1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} q_1 \\ q_2 \end{Bmatrix}, \quad (1)$$

где x и y – траектория движения, а q1 и q2 - координаты мотора в радианах, а rd - радиус шкивов мотора.

Из-за того, что приводы не нужно перемещать, достижимые динамические значения могут быть довольно высокими. Другим аспектом этой концепции, в отличие от кинематики типа дельта-робота, является то, что вес рабочей нагрузки несут линейные направляющие, а не моторы. Кроме того, рабочую область, требуемые параметры и равномерность распределения свойств гораздо легче изменять для промышленного использования, чем рабочие области сложной формы и иную кинематику.

В процессе проектирования программно-аппаратного комплекса проверки электронных средств на устойчивость к электростатическому разряду была получена 3D-модель конструкции. Основные узлы представлены на рис. 7, 8, 9.

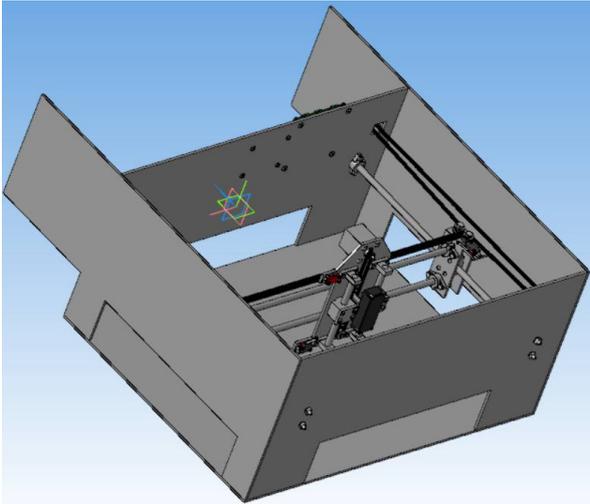


Рис. 7. 3D-модель системы перемещения по оси Z

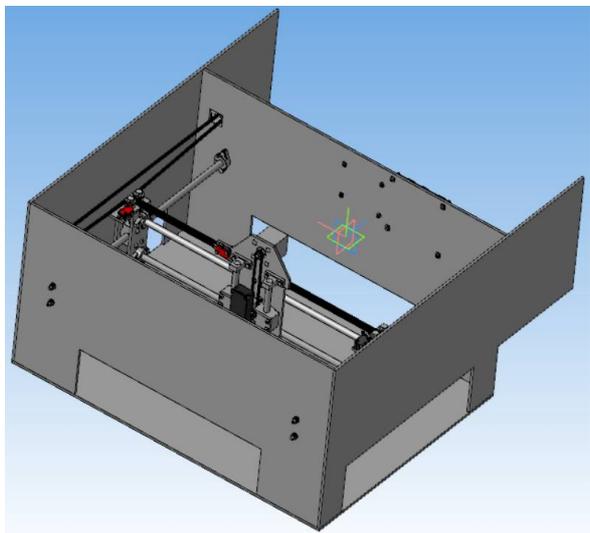


Рис. 8. 3D-модель системы перемещения по осям X и Y

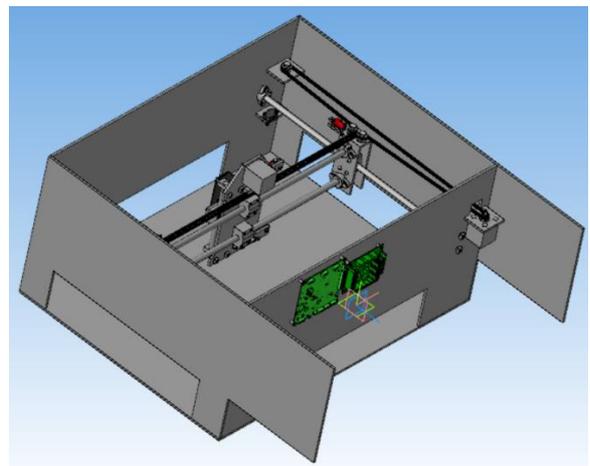


Рис. 9. 3D-модель расположения системы управления и высоковольтного разрядника

Схема электрическая функциональная коммутации основных электронных блоков программно-аппаратного комплекса представлена на рис. 10.

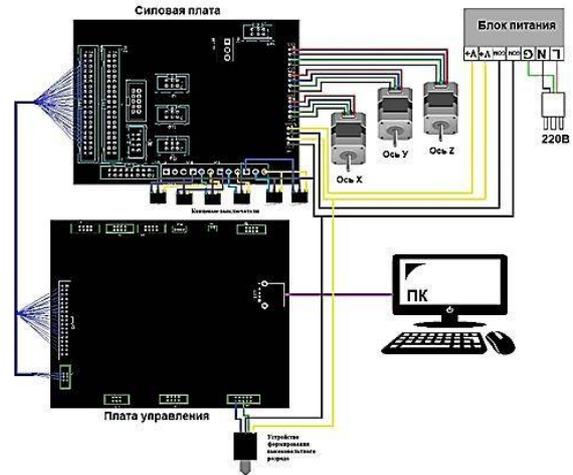


Рис. 10. Схема электрическая функциональная коммутации основных электронных блоков

Автоматизированный тестер устойчивости электронных средств к электростатическому разряду предоставляет пользователю следующие возможности:

- формирование карты точек воздействия электростатических разрядов;
- генерирование испытательных разрядов с требуемыми параметрами;
- упрощение подготовительных процедур для моделирования;
- сохранение данных об испытаниях и их графическое представление.

Автоматизированный тестер устойчивости электронных средств к электростатическому разряду способен проводить анализ как для всей системы в целом, так и для определенной точки печатного модуля, что предотвращает выпуск изделий, не удовлетворяющих требованиям ГОСТа, и повышает эффективность производства. Разработанное устройство воспроизводит разряд напряжением от 1 до 35 кВ со временем нарастания импульса до 1нс.

Одной из особенностей предлагаемого автоматизированного тестера устойчивости электронных средств к электростатическому разряду является автоматическая корректировка нарушения пропорциональности между величинами напряжения и разрядного тока при увеличении показателей напряжения в результате:

- влияния разряда через длинную дугу при высоких напряжениях, что приводит к увеличению времени нарастания импульса разряд-

ного тока и уменьшению пропорциональности более высоких спектральных компонентов разрядного тока напряжению перед разрядом;

- влияния процесса развития разрядного тока через небольшие емкости при высоких значениях напряжения, если объем заряда будет оставаться постоянным для типичных случаев генерации заряда.

### Заключение

При проведении тестирования электронных средств автоматизированным тестером устойчивости электронных средств к электростатическому разряду происходит проверка возможных путей распространения электростатического разряда, возникающих в процессе его эксплуатации. Успешному прохождению тестирования способствуют различные методы защиты электрических цепей, которые могут быть потенциально уязвимы для ЭСР.

Таким образом, происходит полное понимание разработчиком процессов воздействия ЭСР на компоненты печатного модуля и прочие элементы конструкции. Это достигается применением в автоматизированном тестере генератора ЭСР, формирующего электрические разряды, имитирующие характеристики реального электростатического разряда. За счет формирования разрядов с требуемыми параметрами и их воздействием в определенные узлы печатного модуля происходит комплексное тестирование устойчивости электростатическому разряду.

Поступила 03.09.2021; принята к публикации 20.10.2021

### Информация об авторах

**Ромашенко Михаил Александрович** – д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: kipt@vorstu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5629-6056>

**Сеимова Дарья Сергеевна** – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: dashyli98@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4946-5426>

**Иванов Максим Андреевич** - студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: max-121212@ya.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6487-2105>

## AUTOMATED RESISTANCE TESTER OF ELECTRONIC MEANS TO ELECTROSTATIC DISCHARGE

**M.A. Romashchenko, D.S. Seimova, M.A. Ivanov**

**Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia**

**Abstract:** the article discusses the main approaches to checking the functionality of electronic devices when exposed to electrostatic discharge. Electrostatic discharge (ESD) is a major contributor to the reliability and performance of electronic devices. This paper proposes an approach to improving the quality of development of electronic products based on an automated device for testing electronic devices for resistance to electrostatic discharges. We present the conceptual structure of a software

and hardware complex for assessing the effect of electrostatic discharge on electronic means. The test generator is designed with protective mechanisms to prevent the creation of unintentional radiated or conducted electromagnetic interference of a pulsed or continuous nature to eliminate parasitic effects that could affect the tested or auxiliary equipment. The purpose of the study, within the framework of which the development of the testing device took place, is to increase the reliability of the functioning of electronic devices and devices when exposed to electrostatic discharges. Thanks to the proposed approach, it becomes possible to ensure the effectiveness of testing the structures of electronic devices for resistance to electrostatic discharge on the basis of complex methods of optimal design, taking into account the requirements of international standards

**Key words:** electromagnetic compatibility, electrostatic discharge, simulation of electromagnetic processes, electronic means, electromagnetic interference

#### References

1. IEC 61340-5-3:2010 "Electrostatics - Part 5-3: Protection of electronic devices from electrostatic phenomena - Properties and requirements classification for packaging intended for electrostatic discharge sensitive devices", International Standard, 2010, vol. 1.0, pp. 18-23.
2. Seimova D.S., Vasilchenko D.V., Necludov A.N., Romashchenko M.A., Rozhenko S.N. "Software - hardware complex for assessing the effect of an electrostatic discharge on electronic devices", *AIP Conf. Proc.: "VII International Young Researchers. Physics, Technology, Innovations, PTI 2020"*, pp. 060039.
3. Seimova D.S., Romashchenko M.A., Rozhnenko S.N. "Hardware and software complex of the influence of electrostatic discharge on electronic means", *Proc. of the XXVI Int. Sci. and Tech. Conf.: Radar, Navigation, Communication (Radiolokatsiya, navigatsiya, svyaz')*, Voronezh State University, 2020, pp. 379-385.
4. Seimova D.S., Romashchenko M.A. "Improving the efficiency of methods for testing electronic devices for resistance to electrostatic discharge", *Proc. of the winners of the competition of scientific research works of students and postgraduates of VSTU in priority areas of development of science and technology (sb. tr. pobediteley konkursa nauchno-issledovatel'skikh rabot studentov i aspirantov VGTU po prioritnym napravleniyam razvitiya nauki i tekhnologiy)*, Voronezh, 2019, pp. 236-238.
5. Romashchenko M.A., Seimova D.S. "Basic principles of studying the influence of electrostatic discharges on the element base", *Radio Engineering (Radiotekhnika)*, 2019, vol. 83, no. 6 (8), pp. 133-137.
6. Romashchenko M.A., Seimova D.S. "Current state of CAD/CAE-systems for the analysis of electromagnetic compatibility in the problem of optimal design of structures of radioelectronic facilities", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2019, vol. 15, no. 1, pp. 73-77.

Submitted 03.09.2021; revised 20.10.2021

#### Information about the authors

**Mikhail A. Romashchenko**, Dr. Sci. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: kibr@vorstu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5629-6056>

**Dar'ya S. Seimova**, student, Voronezh state technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), email: dashyli98@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4946-5426>

**Maksim A. Ivanov**, student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), email: max-121212@ya.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6487-2105>

## СРАВНЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК КОРРЕЛЯЦИОННО-ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКОГО ПЕЛЕНГАТОРА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ НАПРАВЛЕННЫХ И НЕНАПРАВЛЕННЫХ АНТЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

А.В. Ашихмин<sup>1</sup>, И.Б. Крыжко<sup>1,2</sup>, А.Б. Токарев<sup>1,3</sup>, А.А. Фатеев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Научно-производственная компания АО ИРКОС, г. Воронеж, Россия

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

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

**Аннотация:** при создании корреляционно-фазовых пеленгаторов, как правило, в качестве антенных элементов используют ненаправленные антенные элементы (АЭ). Для использования измерений направленных АЭ требуется модифицировать алгоритмы пеленгации. Представлены соответствующие модификации алгоритмов и проведено сравнительное исследование точности пеленгования применительно к двухканальным корреляционно-интерферометрическим стандартным пеленгаторам, использующим плоские антенные решетки из направленных и ненаправленных АЭ. Рассмотрена также возможность определения пеленгов лишь по энергетическим измерениям, отсутствующая применительно к пеленгаторам с ненаправленными АЭ. Показано, что применение направленных АЭ позволяет снизить вероятность возникновения аномальных ошибок, повысить точность пеленгования при существенно больших значениях угла места, определяющего направление на источник радиоизлучения, снизить негативное влияние отказа от учета сферичности проходящей волны и, следовательно, уменьшить размеры ближней зоны пеленгатора, для которой характерно появление аномальных ошибок пеленгования. В многосигнальной радиообстановке использование направленных свойств АЭ позволяет также формировать пеленгационную диаграмму, обеспечивающую частичное подавление помеховых сигналов. Вместе с тем эффективное использование направленных свойств антенных АЭ требует максимально точного учета их диаграмм направленности (ДН). Погрешности описания ДН могут приводить к заметным ошибкам при определении пеленга, поэтому повышение качества работы пеленгационной системы за счет использования направленных АЭ сопровождается повышением требований к определению и точности практической реализации ДН АЭ

**Ключевые слова:** пеленгация, направленные антенные элементы, амплитудно-фазовая пеленгация, корреляционно-интерферометрический пеленгатор

### Введение

В большинстве случаев при построении корреляционно-интерферометрических пеленгаторов с малым числом антенных элементов (АЭ) используют элементы ненаправленные [1]. Однако в материалах производителей пеленгаторов, например [2, 3], рассматриваются варианты построения пеленгаторов с направленными АЭ. Очевидным преимуществом использования направленных АЭ в пеленгаторных антенных системах является возможность такой их установки, которая позволит уменьшить негативное влияние на результаты измерений конструктивных и схематических элементов антенной системы.

С другой стороны, наличие у антенных элементов направленных свойств приводит к тому, что при проведении пеленгации высокий уровень сигнала наблюдается только на не-

скольких АЭ. Особенностью корреляционно-интерферометрических пеленгаторов с коммутируемыми антенными элементами является относительно малое число АЭ, так что понижение уровня пеленгуемого сигнала на части элементов может повлечь заметное ухудшение качества пеленгования. Это приводит к необходимости проведения исследования влияния направленных свойств АЭ на базовые характеристики работы пеленгаторной системы. Целью работы является сравнение характеристик корреляционно-интерферометрического пеленгатора с направленными и ненаправленными АЭ. В качестве основных подлежащих сравнению характеристик выбраны точность пеленгования (среднеквадратическое отклонение (СКО) оценок пеленга), обеспечиваемая при различных вариантах взаимного размещения пеленгатора и источника радиоизлучения (ИРИ), и наличие аномальных ошибок определения пеленга, вызываемых существенной нелинейностью решающего функционала определения пеленга [4].

Основным объектом для исследования выбран двухканальный корреляционно-интерферометрический пеленгатор с 9-антенными

элементами, расположенными равномерно по кругу с радиусом 1 метр, и опорным элементом в центре. В качестве факторов, влияющих на точность определения пеленга, проанализировано влияние удаленности источника радиоизлучения (ИРИ) и наличие разности высот между пеленгатором и ИРИ. В работе также анализируется возможность применения направленных АЭ для подавления мешающих излучений, действующих на той же частоте, что и пеленгуемый сигнал, но порождаемых ИРИ, разнесенным по угловому направлению с объектом пеленгования.

### Модельные представления измерений

Не нарушая общности, будем полагать, что порождаемый ИРИ пеленгуемый сигнал является гармоническим. В таком случае он может быть представлен в виде:

$$y(t) = A_0 e^{j2\pi \frac{v_c}{\lambda} t}, \quad (1)$$

где  $A_0$  и  $\lambda$  – амплитуда и длина волны излучаемого сигнала,  $v_c$  – скорость света,  $t$  – время,  $j$  – мнимая единица. На входе  $k$ -го АЭ этот сигнал будет иметь вид

$$z_k(t) = AD_k(n) e^{j2\pi \frac{v_c}{\lambda} (t - \Delta t_k)} = AD_k(n) e^{j2\pi \frac{v_c}{\lambda} \left( t - \frac{L_k}{v_c} \right)}, \quad (2)$$

где  $A$  – амплитуда сигнала в точке приема,  $\Delta t_k$  – задержка, соответствующая расстоянию  $L_k$  от ИРИ до  $k$ -го АЭ, которая может быть выражена как  $\Delta t_k = L_k / v_c$ ,  $D_k(n)$  – коэффициент направленности АЭ (отражает поправку амплитудной и фазовой компоненты принимаемого сигнала в зависимости от направления прихода радиосигнала, задающегося ортом  $n$ ). Орт  $n$ , используемый в формуле (2) как направление на ИРИ, связан с углом места  $U$  и азимутом  $\theta$  следующим образом:

$$n = (\cos(U) \sin(\theta), \cos(U) \cos(\theta), \sin(U))^T, \quad (3)$$

где символ  $T$  обозначает операцию транспонирования.

Определение пеленга корреляционно-интерферометрическим пеленгатором с коммутируемыми АЭ реализуется с использованием комплексных измерений на антенных парах. Сама измеряемая величина  $F_{ms}(n, A, \Delta\psi)$  для пары АЭ с номерами  $m, s$  строится с использованием сигналов, принятых двумя антеннами, и имеет вид

$$F_{ms}(n, A, \Delta\psi) = z_m(t) z_s^H(t) = PD_m(n) D_s^H(n) e^{j\Delta\psi} e^{j\Delta\Phi_{ms}(n)}, \quad (4)$$

где символ  $H$  обозначает операцию комплексного сопряжения,  $\Delta\psi$  – набег фаз из-за рассогласования каналов радиоприемника,  $P = A^2$ ,  $\Delta\Phi_k(n) = 2\pi\lambda^{-1} b^T n$  – разность набег фаз между антенными элементами,  $b$  – вектор разности координат между опорным и коммутируемым АЭ в декартовой системе координат, который может быть записан в виде:

$$b = (x_s - x_m, y_s - y_m, z_s - z_m)^T. \quad (5)$$

При этом нам доступно не значение измеренной величины (4), а возмущенное значение

$$z_{ms} = F_{ms}(n, A, \Delta\psi) + \xi_{ms}, \quad (6)$$

где  $\xi_{ms}$  – погрешность измерения.

В дальнейшем будем рассматривать антенны с фиксированным ненаправленным опорным элементом, и, соответственно, индекс  $s$  в измерениях – опускать.

Исходя из предположения, что случайная ошибка, присущая измерениям приемника, имеет нормальное распределение, оптимальным методом определения углов  $U$  и  $\theta$  по измерениям (6) является метод наименьших квадратов (МНК). Для измерений (6) решающий функционал минимизации можно записать следующим образом:

$$J(n, A, \Delta\psi) = \sum_m |z_m - F_m(n, A, \Delta\psi)|^2. \quad (7)$$

Объединим измерения  $z_m$  в вектор  $z = (z_1 \dots z_M)^T$  и введем переменную  $B = P e^{j\Delta\psi}$ , а совокупность комплексных экспонент и значений диаграмм направленности запишем в виде вектора  $h(n) = (D_1(n) e^{j\Delta\Phi_1(n)} \dots D_M(n) e^{j\Delta\Phi_M(n)})^T$ .

Тогда при фиксированном направлении  $n$  зависимость между  $B$  и  $z$  оказывается линейной

$$z = Bh, \quad (8)$$

а значит, величина  $B$ , обеспечивающая минимум (7) при каждом конкретном  $n$ , в соответствии с классическим МНК-решением [5], может быть рассчитана по формуле

$$B = (h^H h)^{-1} h^H z. \quad (9)$$

С учетом введенной новой переменной  $B$ , вместо зависимости (6), связывающей измерения и направление прихода радиосигнала, можно использовать следующую формулу:

$$F_m(n, B) = B D_m(n) e^{j\Delta\Phi_m(n)}. \quad (10)$$

Минимизирующее функционал (7) значение  $B$  для любого конкретного направления прихода  $n$  можно рассчитать как

$$B(n) = \frac{\sum_{k=1}^M D_k(n)^H e^{-j\Delta\Phi_k(n)} z_k}{\sum_{k=1}^M D_k(n) e^{j\Delta\Phi_k(n)} D_k(n)^H e^{-j\Delta\Phi_k(n)}} = \frac{1}{\sum_{k=1}^M D_k(n) D_k(n)^H} \cdot \sum_{k=1}^M D_k(n)^H e^{-j\Delta\Phi_k(n)} z_k, \quad (11)$$

что позволяет сократить пространство перебора до двух переменных  $U$  и  $\theta$ , от которых зависит вектор  $n$ .

С учетом полученного аналитическим образом значения переменной  $B(n)$ , функционал минимизации (7) можно преобразовать к виду

$$J(n) = \sum_{k=1}^M \left| z_k - \frac{\sum_{m=1}^M D_m(n)^H e^{-j\Delta\Phi_m(n)} z_m}{\sum_{m=1}^M D_m(n) D_m(n)^H} D_k e^{j\Delta\Phi_k(n)} \right|^2 \quad (12)$$

и далее упростить, преобразовав к виду:

$$J(n) = \sum_{k=1}^M z_k^H z_k - \frac{\left| \sum_{k=1}^M (z_k^H D_k(n) e^{j\Delta\Phi_k(n)}) \right|^2}{\sum_{m=1}^M D_m(n) D_m(n)^H}. \quad (13)$$

Так как первое слагаемое в полученном выражении не зависит от  $n$ , задачу минимизации (13) можно заменить эквивалентной задачей поиска максимума функционала

$$\begin{aligned} \tilde{J}(n) &= \\ &= \frac{1}{\sum_{m=1}^M D_m(n) D_m(n)^H} \left| \sum_{k=1}^M (z_k^H D_k(n) e^{j\Delta\Phi_k(n)}) \right|^2 = \\ &= \frac{1}{\sum_{m=1}^M D_m(n) D_m(n)^H} \left| \sum_{k=1}^M (D_k(n)^H e^{-j\Delta\Phi_k(n)} z_k) \right|^2. \end{aligned} \quad (14)$$

### Модель энергетических измерений

При использовании направленных АЭ появляется возможность определения пеленга исходя только из значений амплитуд (мощностей) без учета фазовой составляющей. Такой метод определения пеленга в дальнейшем мы будем называть энергетическим. Выберем в качестве энергетических измерения мощности сигнала  $z_{\ominus m}$ , значения которых получаются из (6) при  $D_s(n) \equiv 1$ :

$$z_{\ominus m} = z_m z_m^H. \quad (15)$$

Математическая модель измерений  $z_{\ominus m}$  может быть получена исходя из мощности радиосигнала  $P$  и направления на ИРИ  $n$  следующим образом:

$$\begin{aligned} F_m(P, n) &= P^2 \|D_m(n)\|^2, \\ z_{\ominus m} &= F_m(P, n) + \zeta_k, \end{aligned} \quad (16)$$

где  $\zeta_k$  – погрешность измерения.

Тогда функционал для определения пеленга путем минимизации квадрата невязки будет иметь вид

$$J_{\ominus}(P, n) = \sum_m (z_{\ominus m} - F_m(P, n))^2 \rightarrow \min. \quad (17)$$

Объединим измерения  $z_{\ominus k}$  в вектор измерений  $z_{\ominus} = (z_{\ominus 1} \dots z_{\ominus M})^T$ , а значения диаграммы направленности в вектор  $D_{\ominus} = (D_1^2(n) \dots D_M^2(n))^T$ . Тогда при фиксированном направлении  $n$  зависимость между  $D_{\ominus}$  и  $P^2$  оказывается линейной:

$$z_{\ominus} = D_{\ominus} P^2, \quad (18)$$

а значит величина  $P^2$ , обеспечивающая минимум (17) при каждом конкретном  $n$ , в соответствии с классическим МНК решением может быть рассчитана по формуле

$$P^2 = (D_{\ominus}^H D_{\ominus})^{-1} D_{\ominus}^H z_{\ominus}. \quad (19)$$

Подставив полученное аналитическим образом значение величины  $P$ , определяемое через вектор угла прихода радиосигнала  $n$ , в функционал (17), получим новый функционал минимизации  $J_{\ominus}(n)$ , который зависит только от одной переменной.

$$\begin{aligned} J_{\ominus}(n) &= \sum_m (z_{\ominus m} - F_m(n))^2 \rightarrow \min, \\ F_m(n) &= \frac{D_m^2(n)}{\sum_m D_m^4(n)} \sum_m z_{\ominus m} D_m^2(n). \end{aligned} \quad (20)$$

Раскрыв квадрат разности и сократив полученные подобные члены, функционал (20) можно преобразовать к виду:

$$J_{\ominus}(n) = \sum_m z_{\ominus m}^2 - \frac{\sum_m z_{\ominus m} D_m^2(n)}{\sum_m D_m^4(n)} \rightarrow \min. \quad (21)$$

Так как первое слагаемое полученного функционала от  $n$  не зависит, задачу минимизации (21) можно заменить эквивалентной задачей поиска максимума следующего функционала:

$$\tilde{J}(n) = \frac{\sum_m z_{\varepsilon m} D_m^2(n)}{\sum_m D_m^4(n)} \rightarrow \max. \quad (22)$$

### Модель диаграммы направленности АЭ

При выборе диаграммы направленности (ДН) будем исходить из требования приема радиосигнала с любого направления не менее чем двумя АЭ с разницей уровней не более чем в два раза, что в логарифмической мере примерно соответствует понижению уровня не более чем на 6дБ.

Конкретный вид ДН не принципиален для целей нашего исследования, поэтому в качестве диаграммы направленности АЭ будем использовать кардиоиду, которая является достаточно хорошим приближением ДН электрического вибратора с резистивными нагрузками в разрывах плеч в составе кольцевой антенной решетки при наличии отражателя в центре АС [6, 7]. Формулу кардиоиды запишем в виде:

$$D(n) = (1 + \cos(\gamma)), \quad (23)$$

где  $\gamma$  угол между направлением на ИРИ, определяемым формулой (3), и направлением оси АЭ, орт которого задается формулой

$$n_a = (\cos(\beta)\sin(\alpha) \cos(\beta)\cos(\alpha) \cos(\beta))^T, \quad (24)$$

где  $\alpha$  – угол между направлением проекции оси АЭ на горизонтальную плоскость и севером пеленгатора, а  $\beta$  – угол между направлением оси АЭ и горизонтальной плоскостью. Очевидно, косинус  $\gamma$  определяется следующим образом:

$$\cos(\gamma) = n_a^T n. \quad (25)$$

На рис. 1 приведено сечение ДН (23), плоскостью проходящей через ее ось симметрии.

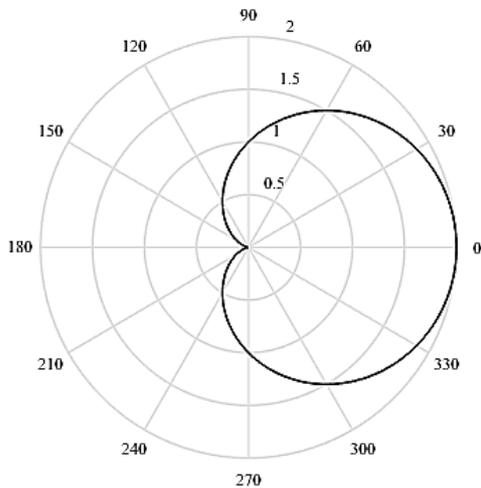


Рис. 1. Сечение диаграммы направленности АЭ

### Коррекция измерений при наличии помехового ИРИ и формирование пеленгационной диаграммы антенной системы

При использовании направленных антенных элементов появляются различные возможности по более сложному комбинированию фазовых и амплитудных составляющих измерений.

Если рассогласование между каналами отсутствует или может быть определено, например, при использовании опорного АЭ одновременно как коммутируемого, можно построить алгоритм компенсации помехового сигнала с заданного направления.

Пусть мы имеем помеховый сигнал, передающийся на той же частоте, что и сигнал, направление прихода которого нам необходимо определить. В этом случае принимаемое на  $k$ -ом АЭ колебание будет определяться соотношением

$$z_k(t) = A_r D_k(n) e^{j2\pi \frac{v_c}{\lambda} \left( t - \frac{L_k}{v_c} \right)} + A_p D_k(n_p) e^{j2\pi \frac{v_c}{\lambda} \left( t - \frac{L_{pk}}{v_c} \right)}, \quad (26)$$

где  $L_{pk}$  – расстояние от источника помехового сигнала до  $k$ -го АЭ, а дополнительным индексом  $p$  обозначены величины, относящиеся к помеховому сигналу.

Пусть, как и ранее,  $s$  – индекс опорного ненаправленного элемента. Сформируем аддитивные измерения вида

$$z_{pk}(t) = z_k(t) - D_k(n_p) e^{j2\pi \frac{v_c}{\lambda} \frac{L_{ps} - L_{pk}}{v_c}} z_o(t) = A_r D_k(n) e^{j2\pi \frac{v_c}{\lambda} \left( t - \frac{L_{pk}}{v_c} \right)} \times \left( 1 - e^{j2\pi \frac{v_c}{\lambda} \frac{L_{ps} - L_{pk}}{v_c}} e^{j2\pi \frac{v_c}{\lambda} \frac{L_{pk} - L_{ps}}{v_c}} \right). \quad (27)$$

Обратим внимание, измерения (27) не зависят от параметров помехового сигнала. Платой за это будут нули диаграмм направленности сформированных измерений в направлении источника помехового сигнала. Для измерений (27) можно построить комплексные измерения на антенных парах, аналогичные (6), функционал, аналогичный (7), и, соответственно, реализовать алгоритм определения направления  $n$  на ИРИ. Недостатком подобного алгоритма полного подавления будет невозможность приема сигнала с направления прихода помехи.

Возможно также частичное подавление помехового радиосигнала, при котором формирование ДН антенной системы происходит за счет отбрасывания или понижения веса части измерений.

Пусть на фиксированной частоте излучаются радиосигналы двух ИРИ, направление на один из них известно, и требуется определить направление на второй. Формирование ДН будем производить путем отбрасывания измерений АЭ, направленных на помеховый сигнал.

Обозначим через  $n_p$  орт направления на помеховый сигнал. В качестве критерия близости направлений диаграммы направленности АЭ и направления на помеховый сигнал будем использовать условие

$$\alpha(n_p, n_a) < \alpha_{\max}, \quad (28)$$

где  $\alpha_{\max} = 39^\circ$  определяет ширину отбрасываемого сектора; указанное значение  $\alpha_{\max}$  выбрано так, чтобы число отбрасываемых измерений не превышало двух.

Проиллюстрируем эффекты понижения веса на примере изменения пеленгационной диаграммы. На рис. 2 и рис. 3 представлены изменения пеленгационной диаграммы при отбрасывании части измерений при направлении на источник помехового сигнала равном  $60^\circ$ . При этом в данных, представленных на рис. 2, источник помехи реально отсутствует, а в данных, представленных на рис. 3, имеется помеховый сигнал с амплитудой равной амплитуде полезного сигнала.

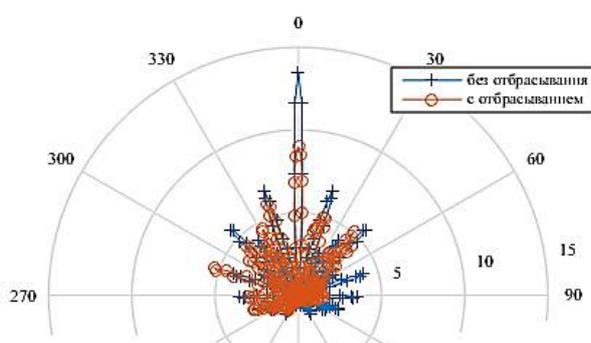


Рис. 2. Изменение пеленгационной диаграммы при отбрасывании измерений по направлению  $60^\circ$ . Помеховый сигнал отсутствует

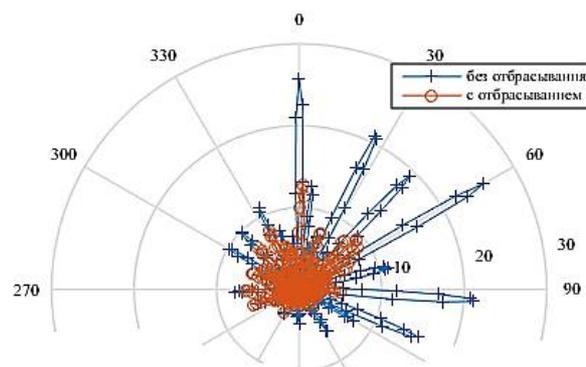


Рис. 3. Изменение пеленгационной диаграммы при отбрасывании измерений по направлению  $60^\circ$ . Амплитуда помехового сигнала равна амплитуде сигнала ИРИ

Как видно из анализа представленных данных, исключение части измерений приводит к относительному росту ложных максимумов, что деформирует пеленгационную диаграмму и влечет ухудшение характеристик пеленгования при отсутствии шумового радиосигнала. С другой стороны, наличие помехового сигнала также приводит к деформации пеленгационной диаграммы, причем так, что эти деформации частично компенсируют друг друга, что позволяет надеяться на улучшение характеристик пеленгования при понижении коэффициентов использования в условиях наличия помехового сигнала.

Для оценки эффективности формирования пеленгационной диаграммы за счет отбрасывания части измерений на рис. 4 и рис. 5 приведены графики СКО определения пеленга при наличии второго радиосигнала в зависимости от угла между двумя ИРИ. В табл. 1 приведены проценты аномальных ошибок в зависимости от частоты излучаемого ИРИ радиосигнала. Полученные результаты позволяют сделать вывод, что отбрасывание части измерений в условиях наличия помехового сигнала улучшает качество пеленгования, так как количество аномальных ошибок сокращается.

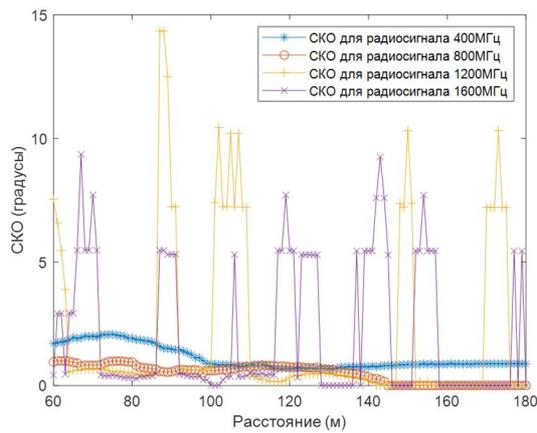


Рис. 4. СКО в определении пеленга при наличии второго сигнала с амплитудой в 2 раза меньше амплитуды первого радиосигнала и использовании всех измерений

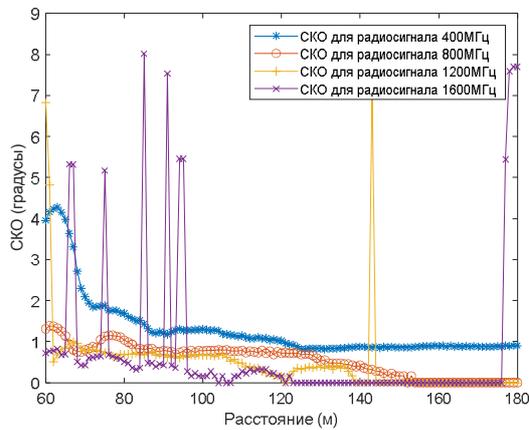


Рис. 5. СКО в определении пеленга при наличии второго сигнала с амплитудой в 2 раза меньше амплитуды первого радиосигнала и отбрасывании части измерений при  $\alpha_{\max} = 39^\circ$

Таблица 1

Процент anomальных ошибок при наличии помехового ИРИ

Тип алгоритма	Частота, МГц			
	400	800	1200	1600
Базовый	0%	0%	3,1%	4,3%
С отбрасыванием части измерений	0%	0%	0.1%	0.3%

### Численные эксперименты

При конструировании антенной системы из направленных АЭ измерения  $z_\alpha$  будут различаться не только фазами, но и амплитудами,

зависящими от угла прихода радиосигнала и вида диаграмм направленности АЭ.

Проанализируем отдельно характеристики корреляционно-интерферометрического пеленгатора с направленными АЭ на основе измерений только амплитуды радиосигнала (16) и на основе полных измерений вида (6).

Функции пеленгационных диаграмм (14) и (22) являются нелинейными и могут иметь несколько локальных максимумов. Это может приводить к аномальным, т.е. не пропорциональным уровню погрешностей измерения ошибкам, связанным с тем, что в условиях присутствия погрешностей измерений уровень бокового лепестка может превысить уровень главного, что приведет к скачкообразному изменению пеленга.

Для определения характеристик пеленгатора оценим влияние случайных ошибок в измерениях на СКО определения пеленга и возможность появления аномальных ошибок пеленгования. Для определения пеленга возможно использование решающего функционала (14) (амплитудно-фазовый метод) или (22) (энергетический метод). Сопоставим эти методы на примере пеленгования радиосигнала с частотой 800 МГц и азимутом  $90^\circ$ . На рис. 6 и рис. 7 приведены примеры пеленгационных диаграмм, по которым можно сделать вывод, что при использовании амплитудно-фазового метода пеленгации (в отличие от энергетического) возможно появление аномальных ошибок пеленгования, вызываемых изменением уровней локальных минимумов пеленгационной диаграммы.

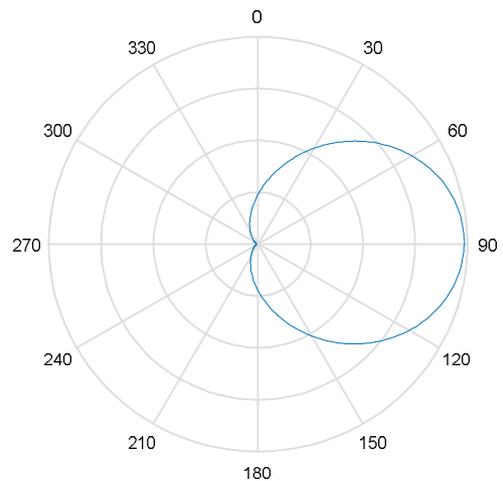


Рис. 6. Пример пеленгационной диаграммы при энергетическом методе пеленгации

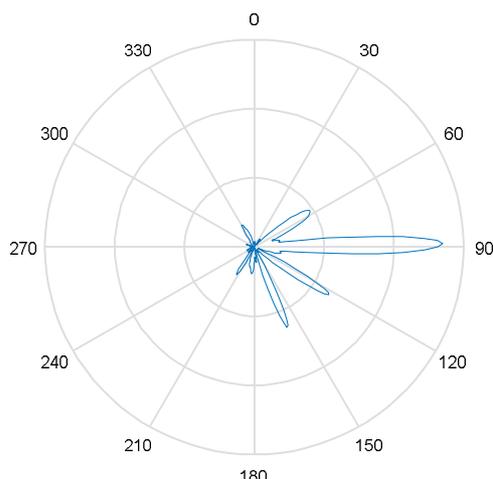


Рис. 7. Пример пеленгационной диаграммы при амплитудно-фазовом методе пеленгации

Для оценки возможности возникновения аномальных ошибок пеленгования рассмотрим уровень боковых лепестков (УБЛ), который явно зависит от частоты и направления прихода радиосигнала ИРИ. В связи с симметрией антенной решетки диапазон направлений прихода радиосигналов с ИРИ может быть сокращен с  $[0^\circ 360^\circ]$  до  $[0^\circ 40^\circ]$ . На рис. 8 проиллюстрирован УБЛ при амплитудно-фазовом методе пеленгования. При амплитудном пеленговании с использованием АЭ с ДН в виде кардиоиды (23) боковые лепестки не появляются.

Для случая использования ненаправленных АЭ сечение пеленгационной диаграммы при том же направлении и удаленности ИРИ, что и для сечения диаграммы выше, показано на рис. 9, а на рис. 10 представлена диаграмма изменения уровней боковых лепестков.

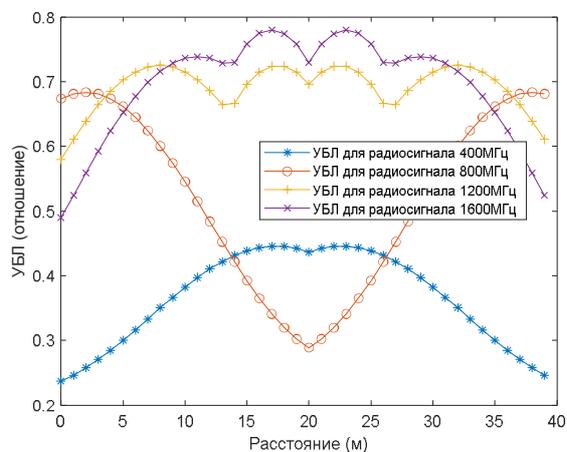


Рис. 8. УБЛ при амплитудно-фазовом методе пеленгования с использованием направленных антенн

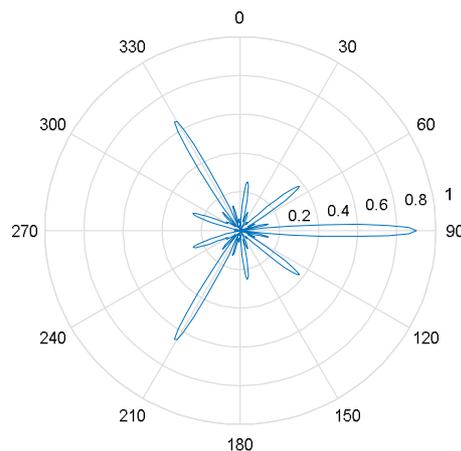


Рис. 9. Пример пеленгационной диаграммы при использовании ненаправленных АЭ

Из приведенного примера видно, что при использовании как направленных, так и ненаправленных антенных элементов в пеленгационной диаграмме имеется более одного локального максимума (бокового лепестка), что может вызывать аномальные ошибки (скачки) при определении пеленга.

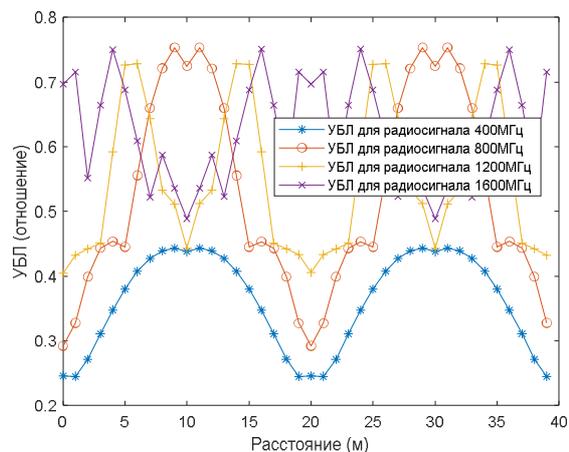


Рис. 10. УБЛ при использовании ненаправленных АЭ

### Влияние пренебрежения сферичностью распространения радиоволн в амплитудно-фазовом методе

При построении алгоритмов пеленгования используют приближение плоской волны, в котором фронт волны считается плоскостью. Рассмотрим погрешности, возникающие из-за пренебрежения сферичностью распространения радиоволн, и определим величину ближней зоны, для которой характерна данная ошибка. Для этого сравним результаты определения пеленга, полученные исходя из приближения плоской волны, с истинными значениями пе-

ленга при отсутствии любых других ошибок. На рис. 11 приведен график, который отображает зависимость СКО определения пеленга от расстояния до ИРИ при амплитудно-фазовом методе пеленгации и отсутствии случайных ошибок в измерениях (используются направленные антенные элементы).

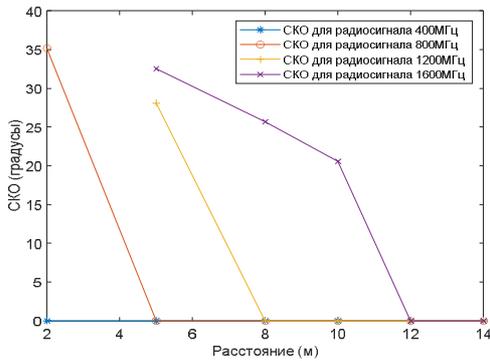


Рис. 11. Зависимости СКО пеленга от расстояния до ИРИ при амплитудно-фазовом методе пеленгации и отсутствии случайных ошибок в измерении. Направленные АЭ

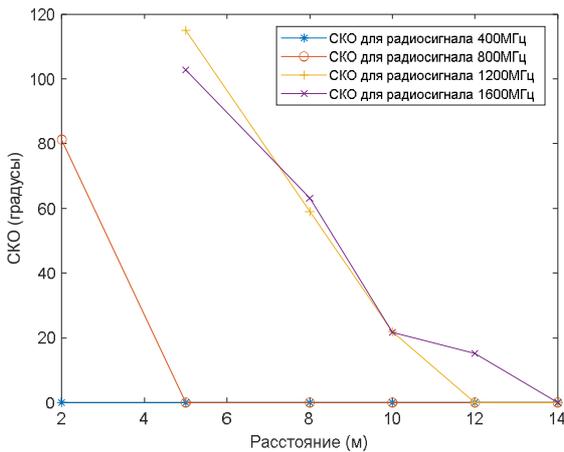


Рис. 12. Зависимости СКО пеленга от расстояния до ИРИ при амплитудно-фазовом методе пеленгации и отсутствии случайных ошибок в измерении. Ненаправленные АЭ

Для определения ближней зоны при использовании ненаправленных антенных элементов на рис. 12 приведен график, аналогичный представленному выше на рис. 11. Исходя из данных на этих двух графиках, следует отметить, что размер ближней зоны практически не меняется от замены направленных антенных элементов на ненаправленные, однако сама ошибка определения пеленга в ближней зоне становится больше.

### Влияние случайных ошибок в измерениях

Проанализируем влияние случайной ошибки в измерениях приемника на точность пеленгования. Относительной погрешностью измерений будем называть отношения СКО  $\sigma$  погрешностей измерений (6) к входящей в (6) амплитуде радиосигнала.

Анализ будем производить для источников, расположенных в дальней зоне на расстоянии от пеленгатора в 1000 м. Полученные СКО пеленга для разных относительных ошибок и частот радиосигналов занесены в табл. 2 и табл. 3.

Таблица 2

СКО определения пеленга при использовании энергетического метода (направленные АЭ)

Относительная погрешность измерений	Частота, МГц			
	400	800	1200	1600
$\sigma/A = 0,25$	6,5°	7°	7°	7°
$\sigma/A = 0,5$	14°	14°	13°	14°
$\sigma/A = 1$	35°	34°	35°	40°

Таблица 3

СКО определения пеленга и процент аномальных ошибок при использовании амплитудно-фазового метода и направленных антенных элементов

Относительная погрешность измерений	Частота, МГц			
	400	800	1200	1600
$\sigma/A = 0,25$	0,6°	0,2°	0,08°	0,06°
$\sigma/A = 0,5$	1,0°	0,6°	0,6°	9,8°/ 5%
$\sigma/A = 1$	15,4°/ 4,9%	16,1°/ 7,3%	19,3°/ 19,5%	27,8°/ 24,4%

Таблица 4

СКО определения пеленга и процент аномальных ошибок при использовании амплитудно-фазового метода (ненаправленные АЭ)

Относительная погрешность измерений	Частота, МГц			
	400	800	1200	1600
$\sigma/A = 0,25$	0,65°	0,45°	0,16°	0,00°
$\sigma/A = 0,5$	1,05°	0,54°	0,52°	8,42°
$\sigma/A = 1$	45,9°/ 26,8%	47,2°/ 19,5%	67,6°/ 39,0%	59,1°/ 31,7%

Сравнительный анализ полученных данных показывает, что энергетический метод по точности существенно уступает амплитудно-фазовому, однако в его целевой функции только один локальный, он же глобальный, максимум и, как следствие, отсутствуют аномальные ошибки, вызванные переходом решения на другой локальный экстремум.

Однако не всегда используемая модель в амплитудно-фазовом методе соответствует реальной функции измерений, что также может влиять на точность определения пеленга. Рассмотрим влияние некоторых факторов более подробно.

### Влияние отклонения реальной ДН АЭ от идеальной

Еще одним источником погрешностей, вкладом которого при использовании направленных АЭ нельзя пренебрегать, является погрешность в описании ДН АЭ. Погрешность описания диаграммы может иметь случайную и систематическую компоненту. Вклад случайной компоненты соответствует случайной ошибке в измерениях, вклад систематической компоненты рассмотрим на примерах, в которых используемые при построении пеленгатора ДН не соответствуют реальным. В табл. 5 приведены СКО и процент аномальных ошибок для пеленгатора, в алгоритмах работы которого предполагаются ненаправленные АЭ, для случая использования ненаправленных АЭ и АЭ с ДН в виде кардиоиды и при относительной погрешности измерений  $\sigma/A=0,25$ . В табл. 6 приведены аналогичные величины для пеленгатора, в алгоритмах работы которого предполагаются направленные АЭ с ДН в виде кардиоиды (23).

Таблица 5

СКО определения пеленга при использовании амплитудно-фазового метода с круговыми ДН

Частота, МГц	400	800	1200	1600
АЭ с круговыми ДН	0.65°	0.45°	0.21°	0.18°
АЭ с ДН типа кардиоиды	0.63°	0.29°/ 0.6%	0.62°/ 0.1%	0.16°/ 0.3%

Таблица 6

СКО определения пеленга при использовании амплитудно-фазового метода с ДН типа кардиоиды

Частота, МГц	400	800	1200	1600
АЭ с ДН типа кардиоиды	0,6°	0,2°	0,08°	0,06°
АЭ с круговыми ДН	0.31°/ 0.64%	3.43°/ 4.8%	1.61°/ 3.8%	2.60°/ 2.7%

Как непосредственно видно из анализа данных табл. 5 и табл. 6, пеленгаторы с направленными АЭ оказываются несколько менее устойчивыми к систематическим погрешностям реализации ДН.

### Исследование влияния отказа от учета угла места прихода радиосигнала при решении одномерной задачи

При решении одномерной задачи (определение только азимута) возникает дополнительная неточность модели, связанная с возможным отличием реального угла места от нулевого, используемого при построении алгоритма, что вносит дополнительную ошибку в определении пеленга. Поэтому оценим максимальное значение угла места, которое не приведет к ошибке пеленгования при отсутствии случайных ошибок. Для оценки приведем графики зависимости максимально допустимого угла места в зависимости от расстояния до ИРИ при использовании направленных и ненаправленных антенных элементов. На рис. 13 и рис. 14 приведены данные зависимости для направленных и ненаправленных антенных элементов, из которых следует, что отказ от учета угла места больше влияет на антенные системы с направленными антенными элементами.

### Заключение

Проведенное исследование доказывает, что замена в антенных системах ненаправленных антенных элементов направленными в целом приводит к улучшению характеристик работы пеленгационной системы. При этом главными результатами являются уменьшение числа аномальных ошибок пеленгования более чем в два раза (см. результаты, представленные в табл. 3 и табл. 4) и уменьшение влияния наличия угла места примерно в полтора раза (см. результаты, представленные на рис. 13 и рис. 14).

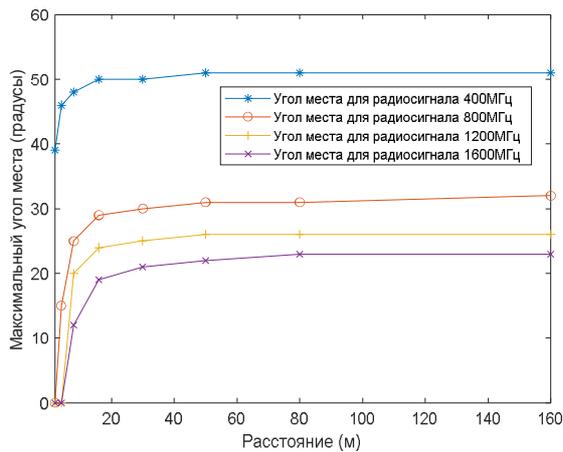


Рис. 13. Максимальный угол места, не приводящий к ошибкам пеленгации при направленных АЭ

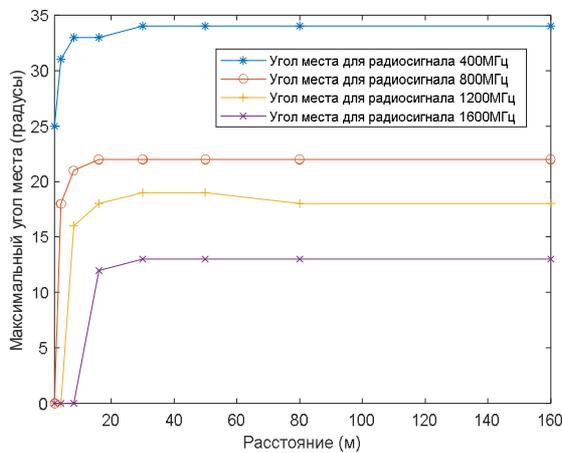


Рис. 14. Максимальный угол места, не приводящий к ошибкам пеленгации при ненаправленных АЭ

Кроме изменения точностных характеристик работы пеленгационной системы, появление направленных свойств у антенных элементов обеспечивает появление новых возможностей, таких как возможность формировать пеленгационную диаграмму для частичного подавления влияния помехового сигнала.

Поступила 28.06.2021; принята к публикации 20.10.2021

#### Информация об авторах

**Ашихмин Александр Владимирович** – д-р техн. наук, профессор, директор ОСП, главный инженер научно-производственной компании АО ИРКОС (394049, Россия, г. Воронеж, Рабочий проспект, 101Б), e-mail: ashihminav@ircos.vrn.ru  
**Крыжко Игорь Борисович** – старший научный сотрудник, Научно-производственная компания АО ИРКОС (394049, Россия, г. Воронеж, Рабочий проспект, 101Б); канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный университет (394036, Россия, г. Воронеж, Университетская площадь, 1), e-mail: kryzhkoib@ircos.vrn.ru  
**Токарев Антон Борисович** – старший научный сотрудник, Научно-производственная компания АО ИРКОС (394049, Россия, г. Воронеж, Рабочий проспект, 101Б); д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры радиотехники, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: TokarevAB@ircos.vrn.ru  
**Фатеев Александр Андреевич** – аспирант, Воронежский государственный университет (394036, Россия, г. Воронеж, Университетская площадь, 1), e-mail: fateevaa@ircos.vrn.ru

Следует отметить, что использование направленных свойств АЭ требует знания их ДН и погрешность в их описании может приводить к ошибкам определения пеленга, что проиллюстрировано примером, результаты которого приведены в табл. 5 и табл. 6. Таким образом, повышение качества работы пеленгационной системы за счет использования направленных АЭ сопровождается повышением требований к реализации или определению ДН АЭ.

#### Литература

1. Рембовский А.М., Ашихмин А.В., Козьмин В.А. Радиомониторинг: задачи, методы, средства/ под ред. А.М. Рембовского. М.: Горячая линия-Телеком, 2012. 640 с.
2. R&S@ADDx Single-Channel DF Antennas Product overview. URL: [https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl\\_downloads/dl\\_common\\_library/dl\\_brochures\\_and\\_datasheets/pdf\\_1/ADDx\\_single-channel\\_bro\\_en\\_3606-8295-12\\_v0700.pdf](https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl_downloads/dl_common_library/dl_brochures_and_datasheets/pdf_1/ADDx_single-channel_bro_en_3606-8295-12_v0700.pdf) (дата обращения: 20.02.2020)
3. TCI Model 643 Dual-Polarized VHF/UHF DF and Spectrum Monitoring Antenna. URL: <https://www.tcibr.com/product/tci-model-643-dual-polarized-vhfuhf-df-and-spectrum-monitoring-antenna/> (дата обращения: 14.06.2021).
4. Исследование возможности пеленгования корреляционным интерферометром источников сигналов, расположенных в области Френеля / А.В. Ашихмин, И.Б. Крыжко, А.Б. Токарев, А.А. Фатеев // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2020. Т. 16. № 1. С. 55–63.
5. Dan Simon. Optimal State Estimation. WILEY-INTERSCIENCE, 2006. 526 с.
6. Кольцевая антенная решетка из симметричных вибраторов с резистивными нагрузками в разрывах плеч / А.В. Ашихмин, Л.Н. Коротков, Ю.Г. Пастернак, П.В. Першин, Ю.А. Рембовский, А.В. Ситников, С.М. Федоров // Радиотехника. 2018. № 7. С. 57 – 59.
7. Кольцевая антенная решетка из петлевых вибраторов Пистолькорса с резистивными нагрузками в контурах протекания токов / А.В. Ашихмин, Л.Н. Коротков, Ю.Г. Пастернак, П.В. Першин, Ю.А. Рембовский, А.В. Ситников, С.М. Федоров // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2019. Т. 15. № 1. С. 69 – 72.

## COMPARISON OF THE CHARACTERISTICS OF THE CORRELATION-INTERFEROMETRIC BELLOWS WHEN USING DIRECTIONAL AND NON-DIRECTIONAL ANTENNA ELEMENTS

A.V. Ashikhmin<sup>1</sup>, I.B. Kryzhko<sup>1,2</sup>, A.B. Tokarev<sup>1,3</sup>, A.A. Fateev<sup>2</sup>

<sup>1</sup>JSC "IRKOS", Voronezh, Russia

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

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

**Abstract:** when creating correlation-phase direction finders, as a rule, non-directional antenna elements (AE) are used. To use directional AE measurements, it is necessary to modify the direction finding algorithms. We present the corresponding modifications of the algorithms and we carried out a comparative study of the direction finding accuracy in relation to two-channel correlation-interferometric standard direction finders using flat antenna arrays of directional and non-directional AEs. We also considered the possibility of determining bearings only from energy measurements, which is absent in relation to direction finders with nondirectional AE. We show that the use of directional AEs makes it possible to reduce the probability of occurrence of anomalous errors, to increase the accuracy of direction finding at significantly large values of the elevation angle, which determines the direction to the radio emission source, to reduce the negative effect of refusing to take into account the sphericity of the incoming wave and, consequently, to reduce the size of the near-field zone of a bearer, which is characterized by the appearance of abnormal direction finding errors. In a multi-signal radio environment, the use of the directional properties of the AE also makes it possible to form a direction finding diagram that provides partial suppression of interference signals. At the same time, the effective use of the directional properties of antenna AEs requires the most accurate consideration of their directional patterns (DP). Errors in the description of the pattern can lead to noticeable errors in determining the bearing, therefore, improving the quality of operation of the direction finding system due to the use of directional AEs is accompanied by increased requirements for the determination and accuracy of practical implementation of the pattern of AE

**Key words:** direction finding, directional antenna elements, amplitude-phase direction finding, correlation-interferometric direction finder

### References

1. Rembovskiy A.M., Ashikhmin A.V., Koz'min V.A. "Radiomonitoring: tasks, methods, means" ("Radiomonitoring: zadachi, metody, sredstva"), Moscow: Goryachaya liniya-Telekom, 2012, 640 p.
2. R&S@ADDx Single-Channel DF Antennas Product overview, available at: [https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl\\_downloads/dl\\_common\\_library/dl\\_brochures\\_and\\_datasheets/pdf\\_1/ADDx\\_single-channel\\_bro\\_en\\_3606-8295-12\\_v0700.pdf](https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl_downloads/dl_common_library/dl_brochures_and_datasheets/pdf_1/ADDx_single-channel_bro_en_3606-8295-12_v0700.pdf) (date of access: 20.02.2020).
3. TCI Model 643 Dual-Polarized VHF/UHF DF and Spectrum Monitoring Antenna, available at: <https://www.tcibr.com/product/tci-model-643-dual-polarized-vhfuhf-df-and-spectrum-monitoring-antenna/> (date of access: 14.06.2021)
4. Ashikhmin A.V., Kryzhko I.B., Tokarev A.B., Fateev A.A. "Investigation of the possibility of direction finding by a correlation interferometer of signal sources located in the Fresnel region", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2020, vol. 16, no. 1, pp. 55–63.
5. Simon D. "Optimal state estimation", WILEY-INTERSCIENCE, 2006, 526 pp.
6. Ashikhmin A.V., Korotkov L.N., Pasternak Yu.G., Pershin P.V., Rembovskiy Yu.A., Sitnikov A.V., Fedorov S.M. "Ring antenna array of symmetrical vibrators with resistive loads in shoulder ruptures", *Radio Engineering (Radiotekhnika)*, 2018, no. 7, pp. 57-59.
7. Ashikhmin A.V., Korotkov L.N., Pasternak Yu.G., Pershin P.V., Rembovskiy Yu.A., Sitnikov A.V., Fedorov S.M. "Ring antenna array of Pistol Kors loop vibrators with resistive loads in current flow circuits", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2019, vol. 15, no. 1, pp. 69-72.

Submitted 28.06.2021; revised 20.10.2021

### Information about the authors

**Aleksandr V. Ashikhmin**, Dr. Sc. (Technical), Professor, Director, Leading Engineer of JSC "IRKOS" (101B, Rabochiy avenue, Voronezh 394049, Russia), e-mail: ashikhminav@ircoc.vrn.ru

**Igor' B. Kryzhko**, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State University (1 Universitetskaya sq., Voronezh 394036, Russia); Senior Researcher, Leading Engineer of JSC "IRKOS" (101B, Rabochiy avenue, Voronezh 394049, Russia), e-mail: kryzhkoib@ircoc.vrn.ru

**Anton B. Tokarev**, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia); Senior Researcher at the Research sector of JSC «IRCOS» (101B Rabochiy prospekt, Voronezh 394049, Russia), e-mail: TokarevAB@ircoc.vrn.ru

**Aleksandr A. Fateev**, graduate student, Voronezh State University (1 Universitetskaya sq., Voronezh 394036, Russia), e-mail: fateevaa@ircoc.vrn.ru

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ШЕСТНАДЦАТИКАНАЛЬНОГО КОМПЛЕКСА РЕГИСТРАЦИИ ЭЛЕКТРОЭНЦЕФАЛОГРАММЫ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ ГОЛОВНОГО МОЗГА С ЦЕЛЬЮ ИХ ДАЛЬНЕЙШЕЙ ИНТЕРПРЕТАЦИИ

Д.В. Журавлёв, А.А. Проводников

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** проведена апробация изготовленного по материалам открытого проекта шестнадцатиканального мобильного комплекса регистрации электроэнцефалограммы (ЭЭГ). Аппаратно-программный комплекс регистрации ЭЭГ позволяет проводить регистрацию неинвазивным способом 16-ти монополярных ЭЭГ каналов, содержащих биоэлектрические сигналы головного мозга человека. Все составные элементы комплекса регистрации конструктивно расположены на шлеме-основе из твердого пластика. Шлем надевается на голову и удерживает на себе до 32-х вкручивающихся штырьковых электродов, платы электронного устройства регистрации и обработки сигналов, радиопередатчики, аккумуляторные батареи. Регистрируемые сигналы ЭЭГ в режиме реального времени передаются по радиоканалу (стандарт Wi-Fi) на ЭВМ для последующей обработки. Сигналы ЭЭГ, полученные в ЭВМ, подаются в пакет прикладных программ MATLAB для последующей обработки. Сигналы ЭЭГ в ЭВМ формируются в виде стандартных цифровых отсчетов и, соответственно, могут быть переданы в любую программу обработки данных. Сигналы ЭЭГ должны быть подвергнуты математической обработке для выявления определенных состояний головного мозга и формирования паттернов ЭЭГ, служащих ориентирами при подготовке управляющих сигналов на внешние исполнительные устройства. При математической обработке полученных сигналов был проведен анализ частотного состава ЭЭГ, проведены специальные преобразования сигналов и вспомогательные операции для идентификации необходимых паттернов ЭЭГ сигналов. В первую очередь была проведена фильтрация полученных сигналов полосовым фильтром и алгебраической функцией вейвлета Добеши 8-го уровня. Затем были собраны контрольные образцы мозговой деятельности при выполнении трех типов активностей. Обнаружена корреляция между экспериментами и контрольными образцами. Сделанные наработки могут быть использованы для упрощения установки входных параметров искусственных нейронных сетей, применяемых для обработки и анализа сигналов ЭЭГ

**Ключевые слова:** нейроинтерфейс, ЭЭГ, аналого-цифровой преобразователь ADS1299IPAG, неинвазивная диагностика, вейвлет преобразование, фильтрация сигнала

### Введение

Наш мозг является основным движущим фактором развития нашей цивилизации. Принимая во внимание её прогрессивное движение вперед, целесообразно найти автоматизированные способы и методы взаимодействия мозговой активности с внешним миром путем установления связи мозг-компьютер. Это позволит управлять любыми устройствами с помощью улавливания изменений биоэлектрических потенциалов мозга и их расшифровывания [1].

Нейроинтерфейс - это система обмена информацией между мозгом человека и электронным оборудованием. Это технология, которая позволяет человеку взаимодействовать с внешним миром на основе расшифровывания электроэнцефалограммы (ЭЭГ), электрической активности головного мозга. Желание человека совершать действия отражается в изменении ЭЭГ, которая декодируется компьютером. «Активность мозга» может выражаться по-

разному, поэтому задача создания интерфейса мозг-компьютер усложняется и решается постепенно [2].

Существуют однонаправленные и двунаправленные нейронные интерфейсы. Однонаправленные либо получают сигналы от мозга, либо отправляют их ему. Соответственно, двунаправленные могут делать это в обе стороны одновременно. Далее рассмотрим разработку шестнадцатиканального комплекса для регистрации ЭЭГ, который разрабатывался с целью создания, в том числе однонаправленного нейроинтерфейса.

### Аналоги

Анализ российского и мирового рынков показывает высокую доступность различных типов оборудования для приема сигналов мозговой активности неинвазивными методами с поверхности головы при использовании металлических электродов и усилителей ЭЭГ. Однако средняя стоимость 16-канального ЭЭГ комплекса составляет порядка 100 тыс. рублей. По-

этому существует острая необходимость в разработке, отладке и апробации универсальных ЭЭГ комплексов, построенных на широкодоступной элементной базе. Данные ЭЭГ комплексы позволят широкому кругу радиоинженеров или просто научным работникам самостоятельно собирать и налаживать аппаратуру регистрации ЭЭГ.

Кратко рассмотрим основные аналоги построенного комплекса регистрации ЭЭГ. Изготовленный комплекс позволяет применять его как в качестве беспроводной стандартной медицинской системы регистрации ЭЭГ, так и в качестве беспроводной нейро-гарнитуры, благодаря простоте одевания на голову и малогабаритности конструкции. Поэтому в качестве аналогов рассмотрим как обычные беспроводные медицинские ЭЭГ системы, так и беспроводные нейро-гарнитуры.

Среди Российских беспроводных профессиональных медицинских ЭЭГ систем, присутствующих на сегодняшнем рынке, целесообразно выделить: Мицар-ЭЭГ-Смарт (ООО «МИЦАР», Россия, г. Санкт-Петербург), 24/32/64 канала, «мокрые» электроды; «Нейрополиграф» (ООО НМФ «Нейротех», Россия, г. Таганрог), 24 канала, «мокрые» электроды; «Энцефалан-ЭЭГР-19/26» («Медиком МТД», Россия, г. Таганрог), 26 каналов, «мокрые» электроды; Нейрон-Спектр-СМ (Нейрософт, Россия, г. Иваново), 21 канал, «мокрые» электроды; NeoRecCap (ООО "Медицинские Компьютерные Системы", г. Москва), 8 каналов, «мокрые» электроды.

Среди нейро-гарнитур выделим нижеследующие. Нейро-гарнитура BrainReader (ИНЭУМ им. Брука, Россия, г. Москва), количество каналов 8, частота дискретизации до 400 Гц, «сухие» электроды. Нейроплэй-8С (Нейроботикс, Россия, г. Зеленоград), количество каналов 8, частота дискретизации до 125 Гц, «сухие» электроды. ЕРОС Х (EMOTIV, Австралия), 14 каналов, работает с сигналом с разрешением от 14 до 16 бит на канал в диапазоне частот от 0,16 Гц до 43 Гц, в качестве электродов используются пропитанные солевым раствором войлочные подушечки. Unicorn Brain Interface (Unicorn Hybrid Black) (Компания g.tec medical engineering, Австрия), 8 каналов, «сухие» электроды. BrainBit (ООО "НейроМД", Россия, г. Таганрог), 4 канала, «сухие» электроды. MindWave Mobile 2 (NeuroSky, США), 1 канал, частота дискретизации 512 Гц, «сухие» электроды.

Рассмотренное оборудование показывает, что, несмотря на передовые технические характеристики профессиональных медицинских ЭЭГ систем, очень существенным недостатком является их цена (порядка 100 тыс. руб. для 16-ти канального изделия). Цена некоторых нейро-гарнитур значительно ниже. Например, стоимость MindWave Mobile 2 около 20 тыс. руб. Однако регистрирует она лишь одно отведение ЭЭГ. При этом подавляющее большинство рассмотренных ЭЭГ комплексов имеют фиксированное количество регистрируемых каналов ЭЭГ без возможности наращивания либо сокращения.

Рассматриваемый далее беспроводной шестнадцатиканальный комплекс регистрации ЭЭГ позволяет легко наращивать либо сокращать количество каналов, имеет возможность использования как «мокрых», так и «сухих» электродов. При этом вся аппаратная часть построена на широкодоступной элементной базе и полная стоимость ЭЭГ комплекса значительно ниже аналогов.

#### **Технические особенности ЭЭГ комплекса для электроэнцефалографических исследований**

Беспроводной шестнадцатиканальный комплекс регистрации ЭЭГ был реализован на основе материалов Open Source проекта, доработан и адаптирован под текущие научно-исследовательские задачи [3].

Технически аппаратная реализация комплекса для ЭЭГ исследований осуществлена в виде нескольких печатных плат, имеющих возможность установки друг над другом. Это позволяет быстро устанавливать именно те платы, которые требуются, в зависимости от собираемой конфигурации изделия. Все электронные платы вместе с аккумуляторной батареей жестко крепятся на пластиковом шлеме-держателе. Шлем-держатель имеет также множество резьбовых отверстий для ввинчивания электродов. Электроды в зависимости от исследовательских задач могут быть расположены практически над любой зоной поверхности головы. Универсальность ввинчивающихся держателей для электродов позволяет использовать любые типы электродов, как пассивные «сухие»/«мокрые» электроды, так и активные «сухие»/«мокрые» электроды различных видов.

Внешний вид аппаратной реализации комплекса регистрации ЭЭГ в 8-канальном исполнении совместно со шлемом-держателем представлен на рис. 1.

Основная «материнская плата», содержащая микроконтроллер для обработки данных, расположена в пластиковом корпусе и имеет несколько штырьковых соединителей для крепления к ней дополнительных печатных плат. На рис. 1 видно, что к «материнской» печатной плате прикреплена плата радиопередачи для беспроводной связи с персональным компьютером.

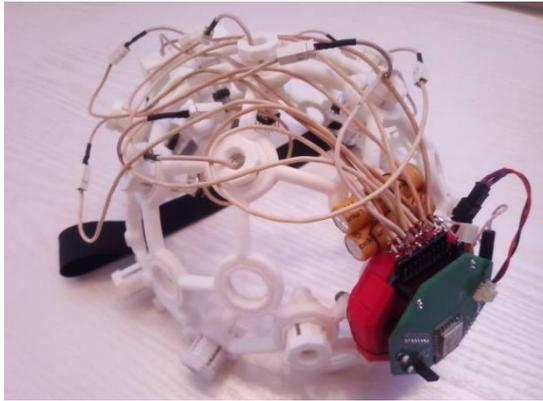


Рис. 1. Аппаратная реализация собранного ЭЭГ комплекса в 8-канальном исполнении

Основу «материнской» печатной платы (ПП) составляет микроконтроллер семейства PIC32MX250. Микроконтроллер проводит всю цифровую обработку сигнала и передачу его на приемопередатчик модуля радиоканала. Также микроконтроллер управляет всеми системами устройства, основной из которых модуль усиления и аналого-цифровой обработки сигнала. Модуль усиления и аналого-цифровой обработки сигнала построен на микросхеме ADS1299IPAG. Данная микросхема включает в себя 8 дифференциальных каналов, соответственно, 8 дифференциальных малошумящих усилителей со встроенными программируемыми коэффициентами усиления. Также в микросхему входит 24-битный 8-канальный сигма-дельта АЦП одновременной выборки. Также имеется встроенный осциллятор, усилитель смещения, источники опорных напряжений, последовательный интерфейс, совместимый с SPI. Также микросхема имеет входной мультиплексор для переключения входных каналов в режим подачи тестовых сигналов, измерения сопротивления кожа-электрод и т.д. Микросхема ADS1299-х может работать со скоростью от 250 SPS до 16 kSPS. Ключевая особенность данной микросхемы состоит в том, что она позволяет включать множество 8-канальных микросхем в каскад, одновременно синхронизируя их одним тактовым генератором. При этом все

подключенные микросхемы оказываются синхронизированы по времени и осуществляют одновременные выборки сигналов. Такое соединение позволяет провести необходимое наращивание каналов регистрации ЭЭГ.

Проектирование «материнской» ПП выполнено в программе KiCad EDA. Плата имеет 4 слоя металлизации (верхний, нижний и два внутренних). Внутренние слои соединены один с AGND другой с шиной питания.

На рис. 2 показаны все 4 слоя металлизации «материнской» ПП.

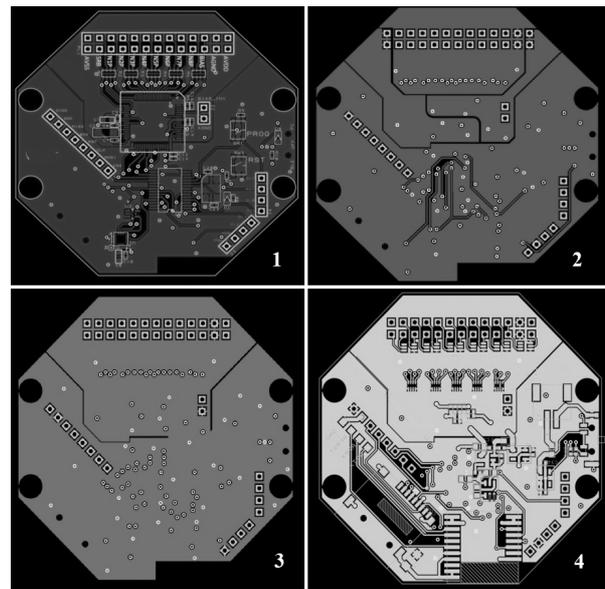


Рис. 2. Четыре слоя металлизации «материнской» ПП

Печатная плата была изготовлена в ООО «Электроконнект» (г. Новосибирск).

Для расширения числа регистрируемых каналов ЭЭГ до 16 и реализации «гирляндного» соединения микросхем ADS1299IPAG была разработана и собрана плата расширения. Схема электрическая, реализованная на данной плате, включает в себя только входные узлы фильтрации сигнала, защиты от перенапряжения и одну дополнительную микросхему ADS1299IPAG. Плата предназначена для использования только совместно с «материнской» ПП и располагается сверху над ней. При необходимости число каналов можно увеличить путем добавления дополнительных плат расширения. Плата расширения также спроектирована в среде KiCad EDA и имеет четыре слоя металлизации (рис. 3).

Основная ПП («материнская») спроектирована с поддержкой возможности расположения на ней собственного приемопередатчика стандарта Bluetooth v4.0 и 3-осевого акселеро-

метра. Однако данные устройства могут и не устанавливаться на плату, не нарушая работу устройства.

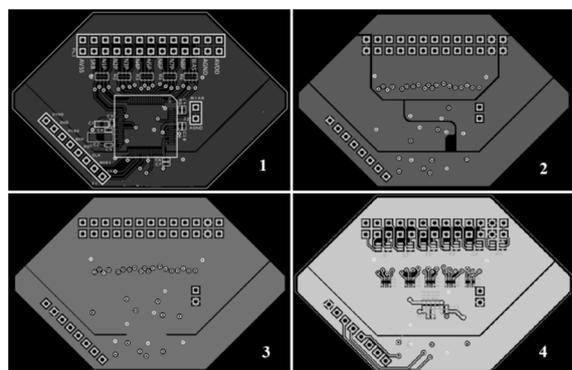


Рис. 3. Четыре слоя металлизации платы расширения числа каналов

При беспроводной регистрации данных гораздо удобнее использовать радиопередатчик стандарта Wi-Fi для передачи данных на ПК. При этом устройство может быть зарегистрировано в сети домашней/корпоративной, получит IP адрес и будет доступно с любого ПК или иного устройства, подключенного к данной сети. Для организации радиосвязи стандарта Wi-Fi спроектирована двухсторонняя ПП, имеющая два слоя металлизации. Внешний вид слоев металлизации такой платы показан на рис. 4.

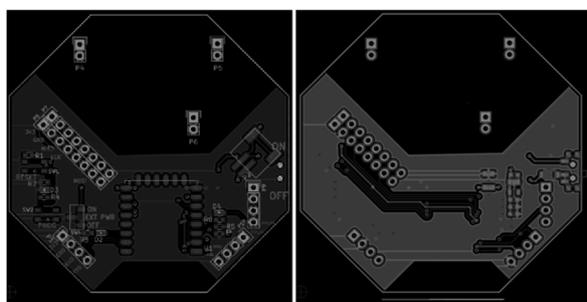


Рис. 4. Слои металлизации платы приемопередатчика стандарта Wi-Fi

Основу платы приемопередатчика составляет радиомодуль ESP-12E. ESP-12E - это модуль Wi-Fi, основанный на однокристалльной системе ESP8266. По сравнению с другими модулями и технологией DLP он очень маленький. Этот модуль специально используется для создания мобильных устройств и Интернета вещей.

Конструктивно плата радиопередатчика крепится сверху всех остальных плат на штырьковых разъемах.

Технические характеристики изготовленного комплекса регистрации ЭЭГ следующие:

- количество каналов ЭЭГ: 16 (монополярная схема включения), 8 (биполярная схема включения);
- количество полиграфических каналов: 2 (опционально);
- подключение к компьютеру: беспроводное Wi-Fi, 2,4 ГГц;
- рабочая полоса частот усилителя: 0,01-80 Гц;
- полоса пропускания усилителя: 0,01-100 КГц;
- входное сопротивление: 1000 МОм;
- частота дискретизации по каждому из каналов: программируемая от 250Гц до 1000 Гц;
- собственные шумы усилителей и АЦП: 1 мкВ от пика до пика (по паспортным данным);
- среднеквадратическое значение шума, приведенное к входу усилителей: не более 0,35 мкВ (по паспортным данным);
- среднеквадратическое значение шума, полученное при замыкании входа на общий проводник: 0,1 мкВ;
- диапазон амплитуд измеряемых сигналов от  $\pm 0.18\text{В}$  до  $\pm 4.5\text{В}$ ;
- устойчивость к электростатическим разрядам: до  $\pm 5\text{ кВ}$  (по проводам) и до  $\pm 15\text{ кВ}$  (по воздуху);
- программируемый коэффициент усиления: 1, 2, 4, 6, 8, 12, 24;
- разрядность АЦП: 24 Бит;
- питание АЦП биполярное:  $\pm 2,5\text{В}$ ;
- время работы между зарядами аккумулятора: не менее 12 ч;
- коэффициент ослабления синфазного сигнала: 110 дБ;
- частота захвата сигнала: 16 КГц;
- уровень сигнал/шум: 121 дБ;
- питание от аккумулятора 3.7 В;
- время непрерывной работы в режиме передачи: 6 часов.

Сгенерированный поток данных с каждого канала ЭЭГ передается на ПК в виде цифровых отсчетов. Для того чтобы принятые отсчеты правильно интерпретировать, нужно знать значения двух основных параметров: частоту дискретизации и коэффициент масштабирования.

Коэффициент масштабирования зависит от трех параметров: опорное напряжение (в нашем случае 4.5V), коэффициент усиления (стандартно 24) и константа. Если коэффициент усиления изменяется, используется следующая

формула для расчета коэффициента масштабирования:

$$ScaleFactor = \frac{volts}{count} = \frac{4,5}{K_y (2^{23} - 1)} \quad (1)$$

Из-за высокого уровня шума при регистрации ЭЭГ достаточно сложно получить сигнал без артефактов. Частично проблема шума может быть решена путем выбора наилучшего метода позиционирования электродов, конфигурации канала, правильного выбора опорных точек, инструктирования испытуемых, обработки записываемых материалов и генерации управляющих сигналов. Дополнительным и прогрессивным инструментом борьбы с зашумленностью сигнала является цифровая фильтрация, которая была реализована в ЭЭГ комплексе средствами Matlab.

Программная часть комплекса содержит программы для сбора и обработки сигналов нейроинтерфейса, а обработка сигналов осуществляется преимущественно с помощью пакета прикладных программ Matlab.

### Размещение электродов

Существует общепринятый способ нанесения электродов на поверхность головы, это система 10-20, которая является признанной в международном сообществе схемой расположения электродов. Система 10-20 отличается тем, что расстояние от одного электрода до другого определяется как 10 или 20% от индивидуального размера головы. Этот метод был разработан для поддержки стандартизированных методов тестирования, позволяющих собирать, воспроизводить, эффективно анализировать и сравнивать результаты исследований.

Собранный 16-канальный комплекс регистрации ЭЭГ был настроен по международной схеме 10-20 нанесения электродов на поверхность головы. Данная схема показана на рис. 5.

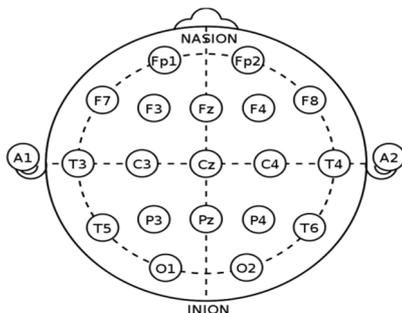


Рис. 5. Схема расположения электродов при проведении экспериментов

Расшифровка обозначений символов расположенных на схеме электродов:

- Fp1, Fp2 – фронтальный;
- F3, F4 – лобные;
- Fz – средний лоб;
- C3, C4 – центральный;
- Cz – центральная вершина;
- P3, P4 – теменные;
- Pz – центральная теменная;
- Po3, Po4 – затылочно-теменные;
- F7, F8 – передние височные;
- T3, T4 – средние височные;
- T5, T6 – задние височные;
- O1, O2 – затылочные;
- Oz – центральные затылочные;
- A1, A2 - уши.

Нечетные числа обозначают левое полушарие, четные числа – правое.

В комплексе регистрации ЭЭГ лобные электроды были выполнены в виде пластин из материала с высокой электропроводностью, а в качестве остальных электродов были использованы подпружиненные штырьковые электроды (рис. 6).

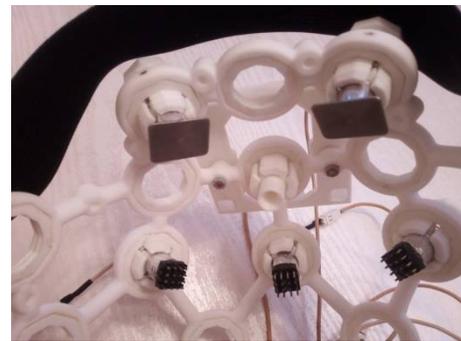


Рис. 6. Реализация электродов в комплексе регистрации ЭЭГ

### Регистрация изменений электрической активности головного мозга. Первичная подготовка сигнала

После сборки и настройки комплекса регистрации ЭЭГ была произведена серия тестовых записей сигналов ЭЭГ. Данные сигналы были записаны в текстовые файлы в виде матриц для возможности их последующего открытия и обработки в программном пакете MatLab.

Регистрация тестовых данных различных состояний электрической активности головного мозга проводилась в следующих состояниях: бодрствование с закрытыми глазами; чтение; расслабленное состояние. Записи были разбиты на фрагменты, составляющие 1500 отсчетов для

каждого из каналов. Также создан фрагмент, имитирующий работу мозга в чередующемся состоянии «закрытые глаза» - «чтение». Этот файл представляет собой контрольный образец. Вид необработанных данных показан на рис. 7.

Для шумоподавления тестовый фрагмент записи был отфильтрован с помощью полосового фильтра 8-13 Гц и алгебраической функции - вейвлета Добеши 8 уровня (рис. 8), так как такой порядок родительского вейвлета обеспечивает наилучшее приближение к виду сигнала ЭЭГ.

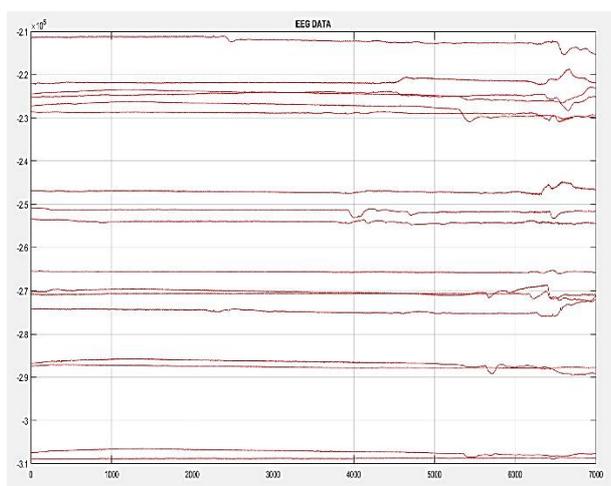


Рис. 7. Тестовый фрагмент до фильтрации

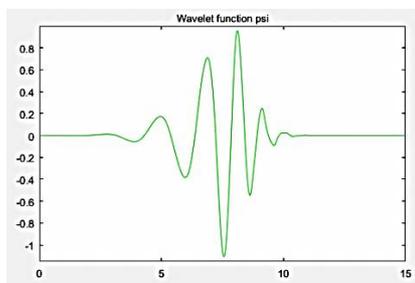


Рис. 8. Вейвлет Добеши 8-го порядка

Отфильтрованный тестовый фрагмент показан на рис. 9. Полученный диапазон является диапазоном альфа-ритмов.

Для оценки эффективности фильтрации была проведена сравнительная оценка спектральной плотности мощности (СПМ) сигналов до фильтрации полосовым фильтром и после нее. Оценка СПМ была проведена с использованием быстрого преобразования Фурье (БПФ) и метода Уэлча. Результаты расчетов СПМ показаны на рис. 10 (а – необработанный сигнал; б – сигнал после полосового фильтра 8-13 Гц) [4].

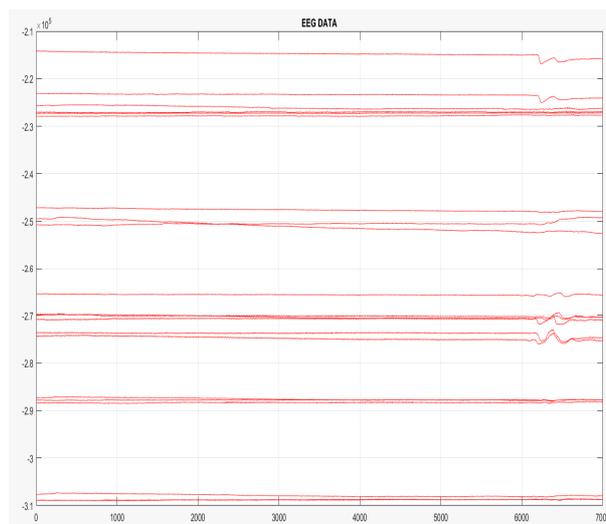


Рис. 9. Тестовый фрагмент после фильтрации

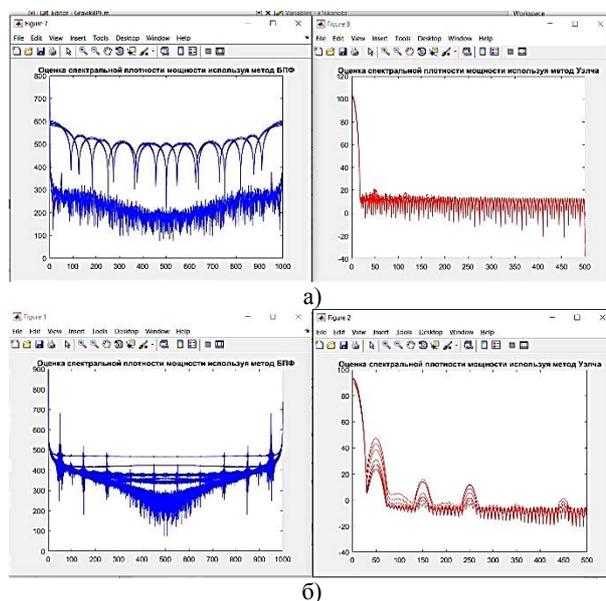


Рис. 10. Результаты расчетов СПМ отфильтрованного и неотфильтрованного сигналов

После устойчивого выделения альфа-ритмов был проведен ряд экспериментов.

### Эксперимент первый. Выявление артефактов от морганий глазами

Далее была проведена оценка в различных частотных диапазонах влияния артефактов от моргания глазами на полезный сигнал.

Испытуемый по команде во время опыта моргает, что позволяет четко фиксировать возникновение артефактов в виде резкой активности альфа волн. На экране монитора можем увидеть изменения активности разных волн головного мозга и понять, в какое время испы-

тующий закрыл глаза, а когда они у него открыты (рис. 11). С учетом полученных графиков, представленных на рисунке ниже, мы видим, глаза были закрыты меньше секунды в промежутке от 4.7 до 5 секунд. На 5-й секунде глаза были открыты. Это можно увидеть на приближенном графике Альфа-ритма (рис. 12).

Альфа-ритм регистрируется, когда человек находится в физическом и психическом состоянии покоя, с закрытыми глазами, близкое состояние между бодрствованием и сном, медитация, погружение в сновидения и фантазии без внешних раздражителей обязательно. Поэтому именно на Альфа-ритме мы видим наибольшую амплитуду всплеска.

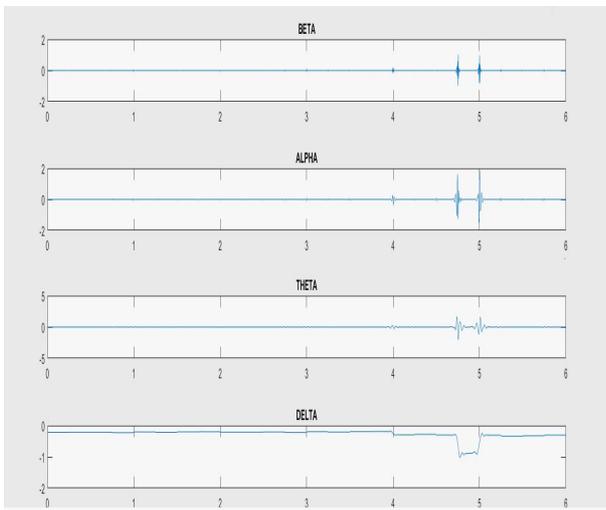


Рис. 11. Активность волн разных поддиапазонов при закрытии и открытии глаз

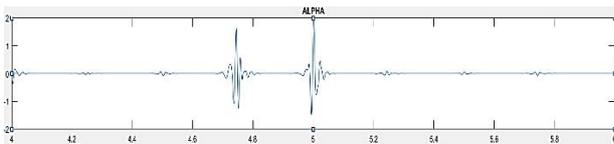


Рис. 12. Приближенный график Альфа-ритма

Данный эксперимент позволяет установить величину и характер изменений сигналов в зависимости от 4-частотных диапазонов ЭЭГ (Beta, Alpha, Theta, Delta). Так как появление артефактов от моргания глаз крайне нежелательно, то полученные данные в дальнейшем позволят настроить и провести математическую обработку сигнала с целью автоматического исключения таких участков ЭЭГ из анализируемых данных.

### Эксперимент второй. Обнаружение усиленной мозговой активности

Примерно через 5 секунд после начала отсчета регистрации сигнала человек получает математический пример и приступает к его решению. На графиках выводится фиксация сигналов разных диапазонов волн, полученных с головного мозга. Используя данные графики, можно увидеть, что мозговая активность усиливается после получения примера и просьбы решить его. Было зафиксировано проявление волн разных поддиапазонов, показанных на рис. 13. Также, принимая во внимание первый эксперимент, можно сделать вывод, что испытуемый моргнул в промежутке между 11 и 13 секундами.

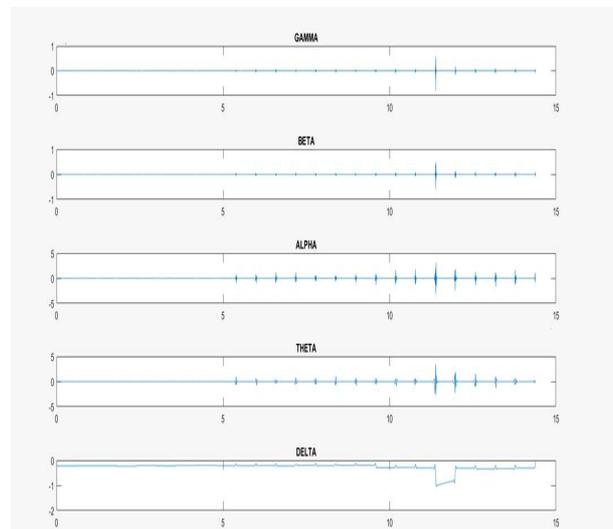


Рис. 13. Активность волн разных поддиапазонов до и после получения примера

### Эксперимент третий. Обнаружение концентрации человека в Бета-диапазоне волн

Третий эксперимент проведен для исследования частотного диапазона Бета-волн. Испытуемый с надетым на голову шлемом был заведен в комнату. В комнату внесли коробку и мячи. С учетом того, что бета-волны фиксируются в основном в случаях повышенной бдительности, активного внимания, тревожности, решения сложных проблем или пугающего мышления, испытуемому было предложено сконцентрироваться на коробке и после включения записи ЭЭГ кидать в нее мячи, пытаться попасть в коробку.

В данном случае величина выборки записи ЭЭГ была равна 10000 отсчетов (10 секунд). Записанные данные показаны на рис. 14.

По графику можно увидеть, что сначала человек сосредотачивался, после чего примерно на 2-й секунде произошел бросок, затем броски были примерно на 5, 7-й секундах и в самом конце.

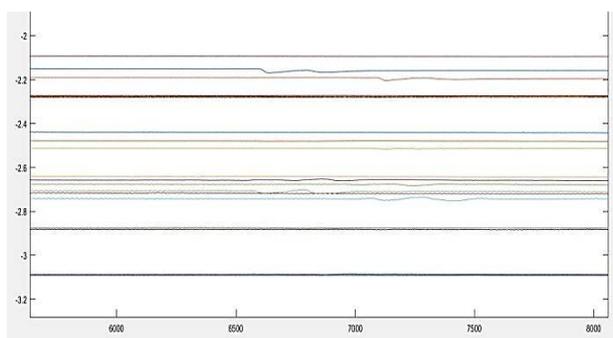


Рис. 14. График ЭЭГ-данных человека, находящегося при повышенной концентрации

После фильтрации полученного сигнала в Бета-диапазоне можно обнаружить усиление сигнала, коррелирующего со временем бросков мяча (рис. 15).

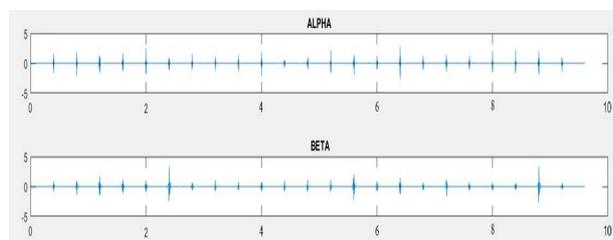


Рис. 15. Выделение сигнала в моменты концентрации человека с использованием полосового фильтра и вейвлетов Добеши

Данный эксперимент показывает, что при значительной концентрации сознания мозгом излучаются электромагнитные волны Бета-диапазона, значительно более сильные по амплитуде, чем в расслабленном состоянии.

### Выводы

Изначально основная область применения ЭЭГ гарнитур и комплексов была медицина. Однако в то же время бизнес-компании проявляют интерес к технологии «мозг-компьютер», предлагая использовать различные игры, которыми можно управлять с помощью «силы мышления». Нейронные интерфейсы используются для управления роботами. По мнению

экспертов, могут потребоваться десятилетия, чтобы нейронные интерфейсы стали частью нашей повседневной жизни. Однако уже очевидно, что развитие технологий движется к миру, в котором можно расшифровывать психологические процессы людей, манипулировать процессами, связанными с эмоциями или намерениями, и общаться с людьми без слов.

Нейроинтерфейсы могут улучшить лечение черепно-мозговой травмы, паралича, эпилепсии или шизофрении. Это большой вклад в дальнейшее развитие человечества.

Таким образом, беспроводное использование, портативность, удобство ношения на голове, низкая стоимость разработки, универсальность программно-аппаратной части и с возможностью улучшения характеристик делает разработанный комплекс регистрации ЭЭГ ценным вкладом в биомедицинские технологии.

Проведенные исследования-эксперименты по возможностям регистрации и обработки тестовых данных различных состояний электрической активности коры головного мозга позволяют провести количественную оценку степени изменений электрической активности в зависимости от его состояний. Такая оценка была проведена в различных частотных диапазонах, и она является основополагающей для дальнейших исследований.

Помимо вейвлет-преобразования Добеши, или же какого-либо другого вейвлет-преобразования, нами применялось и классическое оконное преобразование Фурье с окном Бартлетта (треугольным) и окном Кайзера для частотно-временного анализа. Но после проведенных исследований было отмечено, что в данном случае вейвлет-преобразование оправдывает свой положительный эффект по частотно-временному разрешению, хоть и является более сложным и долгим в машинных вычислениях.

Проведенная математическая обработка сигнала и численные результаты экспериментов в первую очередь могут быть использованы в дальнейшем для упрощения установки входных параметров искусственных нейронных сетей, применяемых для обработки и анализа сигналов ЭЭГ.

### Литература

1. Кулаичев А.П. Компьютерная электрофизиология и функциональная диагностика. Изд. 4-е. М.: ФОРУМ – ИНФРА-М, 2016. 640 с.

2. Toward Brain-Computer Interfacing/ G. Dornhege, J. Millan del R., T. Hinterberger, D.J. McFarland, K.-R. Muller, eds.// A Bradford book. The MIT Press. 2007. 520 p.

3. Журавлёв Д.В. Аппаратура для электроэнцефалографических исследований: монография. Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2021. 258 с.

4. Сотников П.И. Обзор методов обработки сигнала электроэнцефалограммы в интерфейсах мозг-компьютер // Инженерный вестник. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2014. № 10. С. 612-632.

Поступила 07.09.2021; принята к публикации 19.10.2021

#### Информация об авторах

**Журавлёв Дмитрий Владимирович** – канд. техн. наук, доцент кафедры радиоэлектронных устройств и систем, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), тел. +7(473)243-77-29, e-mail: ddom1@yandex.ru

**Проводников Александр Андреевич** – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), тел. +7(473)243-77-29, e-mail: a.provodnikov@mail.ru

### USING A SIXTEEN-CHANNEL EEG RECORDING COMPLEX TO DETECT VARIOUS CHANGES IN THE ELECTRICAL ACTIVITY OF THE BRAIN FOR FURTHER INTERPRETATION

**D.V. Zhuravlev, A.A. Provodnikov**

**Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia**

**Abstract:** we carried out the approbation of a sixteen-channel mobile EEG registration complex made based on the materials of an open project. The hardware and software complex for EEG registration allows for non-invasive registration of 16 monopolar EEG channels containing bioelectric signals of the human brain. All the components of the registration complex are structurally located on a helmet-based made of hard plastic. The helmet is put on the head and holds up to 32 screw-in pin electrodes, boards of an electronic device for recording and processing signals, radio transmitters, and batteries. The recorded EEG signals are transmitted in real time via a radio channel (Wi-Fi standard) on a computer for subsequent processing. The EEG signals received in the computer are fed into the MATLAB application software package for subsequent processing. The EEG signals in the computer are formed in the form of standard digital samples and, accordingly, can be transmitted to any data processing program. EEG signals should be subjected to mathematical processing to identify certain states of the brain and form EEG patterns that serve as guidelines for the preparation of control signals to external actuators. During the mathematical processing of the received signals, we analyzed the frequency composition of the EEG, special signal transformations and performed auxiliary operations to identify the necessary EEG signal patterns. First of all, we filtered the received signals by a bandpass filter and an algebraic function of the Daubechey wavelet of the 8th level. Then, we collected control samples of brain activity when performing three types of activities. We found a correlation between the experiments and the control samples. It can be developed to be used to simplify the installation of input parameters of artificial neural networks used for processing and analyzing EEG signals

**Key words:** neurointerface, EEG, ADS1299IPAG analog-to-digital converter, non-invasive diagnostics, wavelet transform, signal filtering

#### References

1. Kulaichev A.P. “Computer electrophysiology and functional diagnostics” (“Komp'yuternaya elektrofizyologiya i funktsional'naya diagnostika”), Moscow: FORUM-INFRA-M, 2016, 640 p.

2. Dornhege G., Milan J. del R., Hinterberger T., McFarland D.J., Muller K.-R., eds. “Toward Brain-Computer Interfacing. A Bradford book”, The MIT Press, 2007, 520 p.

3. Zhuravlev D.V. “Equipment for electroencephalographic studies” (“Apparatura dlya elektroentsefalograficheskikh issledovaniy”), monograph, Voronezh State Technical University, 2021, 258 p.

4. Sotnikov P.I. “Review of electroencephalogram signal processing methods in brain-computer interfaces”, *Engineering Bulletin. Bauman Moscow State Technical University (Inzhenernyy vestnik. MGTU im. N.E. Baumana)*, 2014, no. 10, pp. 612-632.

Submitted 07.09.2021; revised 19.10.2021

#### Information about the authors

**Dmitriy V. Zhuravlev**, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel. +7 (473)243-77-29, e-mail: ddom1@yandex.ru

**Aleksandr A. Provodnikov**, Graduate student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel. +7 (473)243-77-29, e-mail: a.provodnikov@mail.ru

## АСИМПТОТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ АНАЛИЗА В ЭЛЕКТРОДИНАМИКЕ

И.А. Баранников<sup>1</sup>, К.А. Бердников<sup>1</sup>, Е.А. Ищенко<sup>1</sup>, С.М. Фёдоров<sup>1,2</sup>

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

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

**Аннотация:** рассматривается метод геометрической дифракции и физической оптики, который является одним из самых точных и эффективных для решения крупных электродинамических задач. Для анализа характеристик процесса приводится его математическое описание, а также для сравнения с ним приведено описание метода конечного интегрирования, который является наиболее популярным и эффективным для малых объектов. Так показано, что применение метода МКИ невозможно для крупных объектов, так как в процессе сеточного разбиения происходит создание слишком большого числа ячеек для расчета, что значительно усложняет процедуру анализа. Для оценки эффективности и точности метода было произведено моделирование антенного элемента, который установлен на корабле-носителе. Так, характеристики излучателя рассчитывались с использованием метода конечного интегрирования, после чего характеристики диаграмм направленности передавались в проект с кораблем, затем производилось моделирование с использованием метода SBR. Итоговые результаты моделирования показали высокую эффективность и точность метода, а возможность установки шага сканирования позволяет управлять временем моделирования, однако стоит учитывать, что слишком большой шаг приводит к снижению точности анализа

**Ключевые слова:** метод геометрической дифракции и физической оптики, электродинамика

### Введение

В электродинамике очень часто приходится решать задачи, которые имеют большие геометрические размеры. Такими задачами являются: расчет эффективных поверхностей рассеяния, определение характеристик диаграмм направленности антенн после установки на носители.

Исследование эффективной площади рассеяния возможно с использованием различных методов: интегральных и асимптотических. Для вычисления диаграмм направленности применяется несколько методов: метод конечного интегрирования (малые размеры задачи), метод геометрической дифракции и физической оптики (SBR).

Примеры использования метода SBR для решения крупных электродинамических задач приводятся в работах [1-3]. Одним из наиболее перспективных направлений использования метода SBR является расчет диаграмм направленности антенн на крупных объектах.

### Математическое описание метода конечного интегрирования

Базовым и наиболее популярным методом решения задач в электродинамике является ме-

тод конечного интегрирования (МКИ), который был предложен Т. Вейландом. Метод основывается на решении уравнений Максвелла в интегральной форме:

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = - \iint_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{s}, \quad \oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = \iint_S \left( \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{j} \right) \cdot d\vec{s} \quad (1)$$

$$\oint \vec{D} \cdot d\vec{s} = \iiint_V \rho dV, \quad \oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = 0 \quad (2)$$

В начале выполнения моделирования определяется область, в которой выполняются расчеты, после чего происходит разбиение на ячейки, состоящие из двух сеток – первичной и вторичной, которая ортогональна первичной. Далее осуществляется дискретизация уравнений Максвелла на ортогональных сетках, на основе чего записываются уравнения для каждой грани ячейки:

$$\oint_{\partial A} \vec{E}(\vec{r}, t) \cdot d\vec{s} = - \iint_A \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}(\vec{r}, t) \cdot d\vec{A} \quad \forall A \in R^3 \quad (3)$$

Вид ячейки приводится на рис. 1.

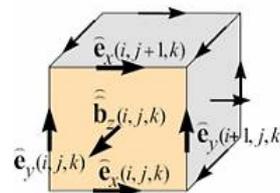


Рис. 1. Ячейка с указанными электрическими напряжениями  $\vec{e}$  на ребрах и магнитными потоками  $\vec{b}$  через поверхность

Уравнение (3) может быть заменено обыкновенным дифференциальным уравнением:

$$\hat{e}_x(i, j, k) + \hat{e}_y(i + 1, j, k) - \hat{e}_x(i, j + 1, k) - \hat{e}_y(i, j, k) = -\frac{d}{dt} \hat{b}_z(i, j, k) \quad (4)$$

Если провести замену уравнения (3) на (4) для каждой ячейки, тогда правило расчета может быть представлено в матричном виде: топологической матрице  $C$  как дискретном эквиваленте аналитическому оператору ротора:

$$\underbrace{\begin{pmatrix} \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & \dots & 1 & \dots & -1 & \dots & -1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{pmatrix}}_C \begin{pmatrix} \hat{e}_{n1} \\ \vdots \\ \hat{e}_{n2} \\ \vdots \\ \hat{e}_{n3} \\ \vdots \\ \hat{e}_{n4} \\ \vdots \end{pmatrix} = -\frac{d}{dt} \underbrace{\begin{pmatrix} \vdots \\ \vdots \\ \hat{b}_n \\ \vdots \\ \vdots \end{pmatrix}}_{\hat{b}} \quad (5)$$

Если применить описанную выше схему к правилу Ампера для вторичной сетки (ортогональной первичной), применяемой для дискретизации уравнений, можно получить соответствующий дискретный оператор циркуляции  $\tilde{C}$ . Похожим образом дискретизация оставшихся уравнений дивергенции дает дискретные операторы  $\tilde{S}$  и  $S$ , которые соответствуют потоку, принадлежащему первичной и вторичной сетке соответственно. Эти дискретные матричные операторы состоят только из элементов 0, 1, -1 и обозначают исключительно топологическую информацию. В результате применения описанного метода мы получаем набор сеточных уравнений Максвелла:

$$C e = -\frac{\partial}{\partial t} b, \tilde{C} h = \frac{\partial}{\partial t} d + j \quad (6)$$

$$\tilde{S} d = q, S b = 0 \quad (7)$$

Однако данный метод имеет достаточно плотное сеточное разбиение, что делает невозможным решение крупных электродинамических задач. Так в данной работе главной целью выступает исследование диаграммы направленности антенны, которая устанавливается на корабле. Для рассматриваемой ситуации сеточное разбиение МКИ приведено на рис. 2. Так как при сеточном разбиении МКИ происходит уплотнение сеток вблизи проводников, а корабль выполнен из проводящих материалов, то было получено 150 386 421 459 440 ячеек, что нереально решить с текущими вычислительными мощностями, а также лишено смысла, так

как приведет к необоснованно долгому решению задачи.

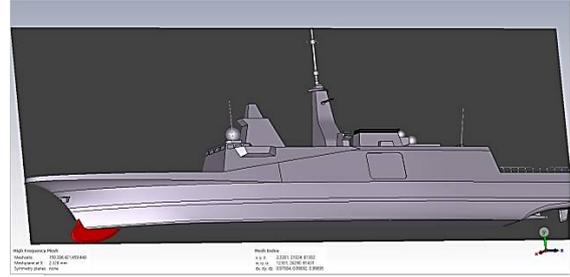


Рис. 2. Сеточное разбиение МКИ для корабля с антенной

Однако для расчета антенны МКИ является наиболее оптимальным, поэтому воспользуемся следующим алгоритмом действия:

- 1) Рассчитаем диаграмму направленности антенного элемента с использованием МКИ;
- 2) Произведем пересчет полученных данных с использованием метода SBR.

### Метод геометрической дифракции и физической оптики (SBR)

Асимптотические методы, к которым относится метод геометрической дифракции и физической оптики (SBR), позволяют решать крупные задачи электродинамики, когда размеры объектов более 1000 длин волн. В процессе подготовки моделирования источник излучения заменяется лучами, которые трассируются на основе характеристик объектов.

При подготовке моделирования происходит построение картины поверхностей, которые могут появиться на пути распространения лучей и вызвать отражения. Объект, который находится на пути распространения, формируется в виде полудетерминированной модели поверхности (SDFM), которая формируется на основе моделей, описывающихся методами Монте-Карло. Рассеяние волн основывается на теории Брэгга, согласно которой только волна, движущаяся вдоль сканера поля, вносит вклад в рассеяние от объекта, с которым встречается луч, исходящий от источника. Волна Брэгга формируется в виде синусоидальных излучений:

$$\zeta_{cap}(r') = B(k_c) \cos(k_c r' - \omega_c t), \quad (8)$$

где  $B(k_c)$  – амплитуда волны, равная  $\sqrt{\frac{S(k_c)}{\Delta S}}$ ,  $\Delta S$  – площадь поверхности;  $S(k_c)$  – спектр Эльфухайми;  $k_c$  – пространственный волновой вектор

тор, направление которого совпадает с линией проекции  $q_i$  вектора рассеяния:  $q = k(k_s - k_i)$  на плоскость объекта.

Для увеличения точности расчетов применяется методика гибридного моделирования на основе геометрической оптики (GO), физической оптики (ПО) и SDFM. На основе данной технологии метод трассировки лучей (SBR) учитывает картины отражений лучей, свободного распространения и повторного отражения от объектов на пути. В процессе расчета излучаемая волна заменяется сеткой из тонких трубок или лучей. В соответствии с требованиями геометрической оптики происходит отслеживание распространения между гранями. Каждая облучаемая поверхность в соответствии с характеристиками распространения электромагнитных волн выступает источником повторного излучения как небольшая антенна, на основе чего происходит расчет дальнего поля. Трассировка луча происходит до момента достижения максимальной длины или до тех пор, пока он не перестанет пересекаться ни с какими гранями. В изначальном процессе моделирования проводящие поверхности заменяют идеальным проводником (РЕС), после чего происходит решение уравнений Стрэттона-Чу в интегральном приближении физической оптики:

$$E^{PO} = \frac{jke^{-ikR}}{4\pi R} \iint \eta \hat{k}_s \times (\hat{k}_s \times J(r')) e^{ik\hat{k}_s r'} ds', \quad (9)$$

$\hat{k}_s$  – единичный вектор для вектора рассеяния  $k_s$ ;  
 $R$  – расстояние расчетов;  
 $J(r')$  – плотность поверхностных токов, которые возникли на объекте.

Для решения этого интеграла применяется метод Гордона, а размер целевых граней менее 1/10 длины падающей волны.

Рассеяние относительно SDFM поверхности:

$$E^{SDFM} = \frac{k^2(1-\varepsilon)e^{ikR}}{i4\pi R} F_{pq} \iint \zeta(r') e^{-iqr'} dr', \quad (10)$$

$\zeta(r')$  – имеет синусоидальную форму, как было описано в (8), а для решения выражения (10) применяются формулы Эйлера и разложения плоских волн по функциям Бесселя:

$$I(\cdot) = \iint \zeta(r') e^{-iqr'} dr' = \frac{\Delta S}{2n_z} e^{-iqr_c} \{ B(k_c^+) \sum_{n=-\infty}^{\infty} (-i)^n J_n[q_z B(k_c^+)] I_0(k_c^+) + B(k_c^-) \sum_{n=-\infty}^{\infty} (-i)^n J_n[q_z B(k_c^-)] I_0(k_c^-) \}. \quad (11)$$

При этом в ряду Бесселя рассматриваются только главные члены, равные 0,  $\pm 1$ .  $J_n(\cdot)$  – функция Бесселя n-порядка. В локальной координатной системе полудетерминированной поверхности  $I_0(k_c)$  определяется в соответствии с:

$$I_0(k_c) = e^{-i(1+n)\omega_c t} \text{sinc}\left\{\frac{\Delta x}{2}[(1+n)k_{cx} - q_x - q_z z_x]\right\} \cdot \text{sinc}\left\{\frac{\Delta y}{2}[(1+n)k_{cy} - q_y - q_z z_y]\right\} + e^{-i(1-n)\omega_c t} \text{sinc}\left\{\frac{\Delta x}{2}[(1-n)k_{cx} + q_x + q_z z_x]\right\} \cdot \text{sinc}\left\{\frac{\Delta y}{2}[(1-n)k_{cy} + q_y + q_z z_y]\right\}. \quad (12)$$

Применение полудетерминированных поверхностей позволяет существенно уменьшить число плоскостей отражения, однако некоторые ячейки способны приводить к разделению лучей в процессе выполнения трассировки, а неучитывание повторных отражений может приводить к ухудшению точностей расчетов. Для решения данной проблемы применяется технология учета двунаправленной трассировки лучей, при этом дополнительно применяется технология К-d дерева, позволяющая ускорить расчеты.

На рис. 3 показаны ячейки расчетов, которые заранее нумеруются и сохраняются в памяти вычислительного устройства.

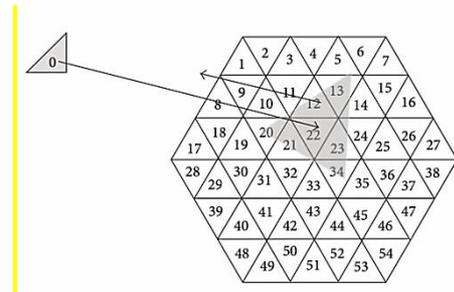


Рис. 3. Геометрия двунаправленной трассировки лучей SBR

Предполагается в расчетах, что серая область – зона, которая засвечена источником 0. Для определения идентификатора освещенной грани применяется ряд шагов:

1) прямой падающий луч используется для проведения анализа на пересечение, чтобы обнаружить одну из засвеченных поверхностей (поверхность 22);

2) на основе этого строится двоичное дерево, как показано на рис. 4, где поверхность 22 является источником повторного излучения, а три соседних – возбуждённые вторичные ячейки;

3) после этого отраженный луч используется для проверки засвечивания вторичных

плоскостей (12, 21 и 23 ячейки), тогда они также считаются засвеченными;

4) затем происходит процесс обратной трассировки лучей, продолжается для этих трех возбужденных ячеек до тех пор, пока не появятся поверхности за пределами области возбуждения (ячейка 10), после этого анализ обратной трассировки лучей прекращается.

В процессе каждой трассировки при этом происходит проверка на пересечение с построенным К-d дерева поверхностей, что позволяет определить засвечена ли грань лучом. Таким образом, итоговая картина рассеяния может быть получена путем векторного суммирования всех рассеянных лучей от всех возбужденных граней.

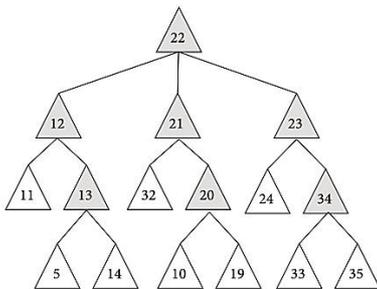


Рис. 4. Бинарное дерево, сформированное на основе трассировки лучей

Очень важно в процессе определения краевой дифракции учитывать возникшие эквивалентные краевые токи (ЕЕС). Для их описания применяются:

$$E^d = \frac{ik_0}{4\pi} \frac{e^{-jk_0 r}}{r} \int_l [\hat{s} \times (\hat{s} \times \hat{t}) I_e + (\hat{s} \times \hat{t}) I_m] e^{ik_0 \hat{s} r'} dt', \quad (13)$$

$$I_e = \frac{i2E_{inc} \hat{t} D_e^{EEC}}{k \sin^2 \beta_i} + \frac{i2\eta H_{inc} \hat{t} D_{em}^{EEC}}{k \sin \beta_i}$$

$$I_m = \frac{i2\eta H_{inc} \hat{t}}{k \sin \beta_i \sin \beta_s} D_m^{EEC},$$

где  $E_{inc}$  и  $H_{inc}$  – падающие электрические и магнитные поля;

$\hat{t}$  – единичный вектор вдоль ребер.

Интеграл определяется краями структуры рассеивания.

$D_e^{EEC}$ ,  $D_{em}^{EEC}$ ,  $D_m^{EEC}$  – коэффициенты дифракции эквивалентных краевых точек, при этом их значения в основном определяются углами между соседними гранями.

На основе этого метода удобно решать крупные электродинамические задачи, например распределение полей на крупных объектах носителях.

### Анализ картины диаграммы направленности антенны, установленной на носителе

Рассмотрим пример использования предлагаемой конструкции антенны для выполнения связи на малых дистанциях. Так, предлагаемая конструкция антенны устанавливается на одной из мачт корабля, вид исследуемой ситуации приводится на рис. 5.

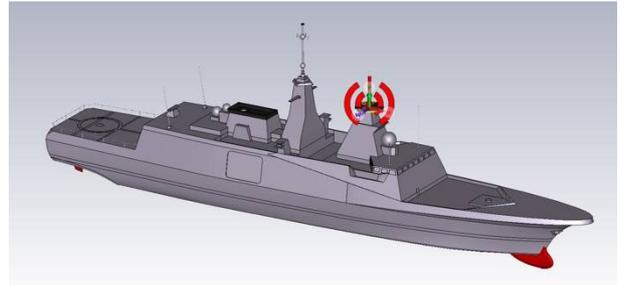


Рис. 5. Вид исследуемой ситуации, место установки антенны показано пиктограммой

Для решения данной задачи применялся метод геометрической дифракции и физической оптики (SBR), который позволяет путем трассировки лучей определить характеристики диаграммы направленности антенны, при этом для моделирования был выбран случай с формированием внутреннего уголкового отражателя, который формирует направленное излучение в направлении 45 градусов. Вид выполнения моделирования приводится на рис. 6.

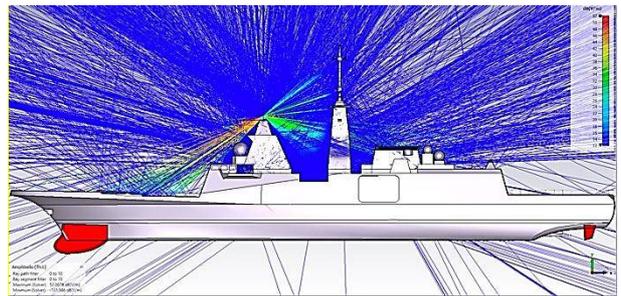


Рис. 6. Картина работы метода SBR для определения характеристик диаграммы направленности

Как видно, корпус корабля вносит отражения в картину излучаемых радиоволн, что возможно отследить на основе отраженных лучей. На рис. 7а приводится трехмерная диаграмма направленности (частота моделирования 9,2 ГГц, шаг сканирования 1 градус), а на рис. 7б диаграмма направленности в горизонтальной

плоскости и ее сравнение с изначально используемой, а также с полученной при шаге сканирования в 10 градусов.

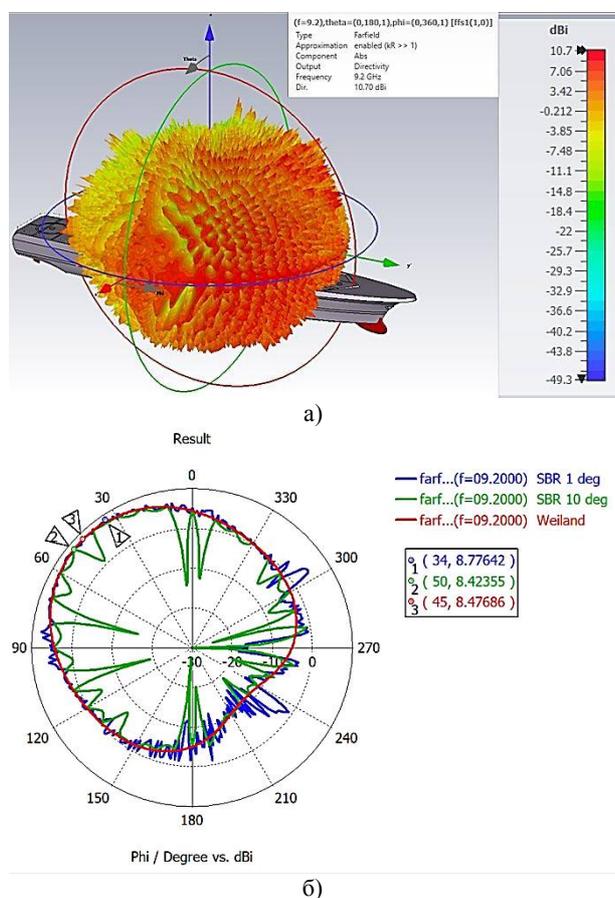


Рис. 7. Результаты моделирования с использованием метода SBR: а) трехмерная диаграмма направленности; б) сравнение диаграмм направленности в горизонтальной плоскости

Как видно, возникающие искажения в направлении главного излучения не сильны по сравнению с изначальными данными, поэтому предлагаемое место установки антенны оптимально, при этом достигается излучение в целевом направлении, а следовательно, удается достичь поставленной цели. Таким образом предложенная конструкция антенны позволяет обеспечить направленную защищенную связь между объектами, которые расположены на целевых направлениях.

Для ускорения расчетов возможно увеличение шага угла сканирования, правда это приводит к ухудшению точностей расчетов, а следовательно, и к появлению искажений на ДН [1].

### Литература

1. Buddendick H., Eibert T. Concept for accelerated ray-based monostatic RCS simulations using bistatic approximations // *Advances in Radio Science - Kleinheubacher Berichte*. 2009. Vol. 7. pp. 29-35.
2. Comparison of SBR and MLFMM techniques for the computation of RCS of a fighter aircraft/ A. Bilal, S.M. Hamza, Z. Taj, S. Salamat // *IET Radar Sonar Navig.* 2019. Vol. 13. pp. 1805-1810.
3. Gao W., Sui M., Xu X. Impact of the divergence factor on accurate RCS calculation using shooting and bouncing rays // 2011 4th IEEE International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications. 2011. pp. 206-209.

Поступила 26.05.2021; принята к публикации 19.10.2021

### Информация об авторах

**Баранников Илья Андреевич** – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), тел. +7(473)243-77-29, e-mail: 8thbar@gmail.com

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

**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>

ASYMPTOTIC METHODS OF ANALYSIS IN  
ELECTRODYNAMICSI.A. Barannikov<sup>1</sup>, K.A. Berdnikov<sup>1</sup>, E.A. Ishchenko<sup>1</sup>, S.M. Fyedorov<sup>1,2</sup><sup>1</sup>Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia<sup>2</sup>International Institute of Computer Technologies, Voronezh, Russia

**Abstract:** the article discusses the method of geometric diffraction and physical optics, which is one of the most accurate and effective for solving large electrodynamic problems. To analyze the characteristics of the process, we give its mathematical description and, for comparison, a description of the final integration method, which is the most popular and effective for small objects. Thus, we show that the application of the MCI method is impossible for large objects since in the process of grid division, too many cells are created for the calculation, which significantly complicates the analysis procedure. To assess the effectiveness and accuracy of the method, we simulated the antenna element, which is installed on the carrier ship. We calculated the characteristics of the emitter using the method of finite integration, after which we transferred the characteristics of the radiation patterns to the project with the ship, then we carried out the simulation using the SBR method. The final results of modeling showed high efficiency and accuracy of the method, and the ability to set the scanning step allows you to control the simulation time, however, it should be borne in mind that too large a step leads to a decrease in the accuracy of the analysis.

**Key words:** shooting bouncing rays, electrodynamics

## References

1. Buddendick H., Eibert T. "Concept for accelerated ray-based monostatic RCS simulations using bistatic approximations", *Advances in Radio Science - Kleinheubacher Berichte*, 2009, vol. 7, pp. 29-35.
2. Bilal A., Hamza S.M., Taj Z., Salamat S. "Comparison of SBR and MLFMM techniques for the computation of RCS of a fighter aircraft", *IET Radar Sonar Navig.*, 2019, vol. 13, pp. 1805-1810.
3. Gao W., Sui M., Xu X. "Impact of the divergence factor on accurate RCS calculation using shooting and bouncing rays", *2011 4th IEEE International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications*, 2011, pp. 206-209.

Submitted 26.05.2021; revised 19.10.2021

## Information about the authors

**И'ya A. Barannikov**, student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel.: +7 (473)243-77-29, e-mail: 8thbar@gmail.com

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

**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 Solnechanya str., Voronezh 39026, Russia), tel.: +7 (473)243-77-29, e-mail: fedorov\_sm@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9027-6163>

## СДВОЕННЫЙ СФЕРИЧЕСКИЙ ДАТЧИК НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

С.В. Бирюков<sup>1,2</sup>, А.В. Тюкин<sup>2</sup>, Л.В. Тюкина<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

<sup>2</sup>Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет, г. Омск, Россия

<sup>3</sup>Омский промышленно-экономический колледж, г. Омск, Россия

**Аннотация:** мы живем в мире высоких энергетических технологий, способных передавать электрическую энергию на большие расстояния. Эту энергию невозможно сосредоточить только внутри передающих энергетических систем. Она выплескивается наружу в виде электрических полей. Эти электрические поля неблагоприятно воздействуют на окружающую среду, технические и биологические объекты. В связи с этим необходимо контролировать уровни электрических полей, важной характеристикой которых является напряженность электрического поля. Для восприятия электрического поля необходимы датчики напряженности электрического поля. Существующие датчики неудобны в эксплуатации и имеют высокую погрешность восприятия напряженности электрического поля, достигающую  $\pm 20\%$ . Выдвигается идея создания универсального датчика нового вида, относящегося к виду сдвоенных датчиков. Его универсальность заключается в том, что он воплощает в себе все виды известных датчиков – одинарные, сдвоенные и теперь еще двойные. Погрешность восприятия напряженности неоднородного электрического поля сдвоенных датчиков не превышает  $+5\%$  во всем пространственном диапазоне измерения  $0 \leq a \leq 1$ . При этом расстояние  $d$  до источника поля ограничено только радиусом сферического основания датчика, т.е.  $d \approx R$ , в то время как для датчиков, входящих в состав сдвоенного датчика, в том же пространственном диапазоне измерение погрешности составляет  $\pm 35\%$ . Используя сдвоенный датчик, можно добиться значительного повышения точности измерения напряженности неоднородных электрических полей в широком пространственном диапазоне измерений по сравнению с известными датчиками

**Ключевые слова:** датчик напряженности электрического поля, одинарный датчик, двойной датчик, сдвоенный датчик, напряженность электрического поля, погрешность от неоднородности поля

### Введение

Измерение напряженности квазистатических электрических полей энергетических систем непосредственно связано с разработкой датчиков, взаимодействующих с электрическим полем. Разработка датчиков напряженности электрических полей энергетических объектов ведется с начала 80-х годов [1-4]. Многолетний опыт показывает целесообразность использования для этих целей с экономической и практической точки зрения электроиндукционных датчиков напряженности электрических полей. В настоящее время существует большое многообразие таких датчиков [5-10]. Датчики отличаются как формой тела основания, так и направленностью восприятия вектора напряженности электрического поля [11]. Формы основания датчиков могут быть – планарная, кубическая, цилиндрическая и сферическая [12]. Оценка погрешностей электроиндукционных датчиков показывает их уровень от 10 до 20 %. Из сказанного следует, что разработка высокоточных электроиндукционных сферических датчиков напряженности

электрического поля является довольно сложной задачей и исчерпывает свои возможности. В связи с этим, разработка электроиндукционных сферических датчиков напряженности электрического поля нового поколения, обеспечивающих высокую точность в широком пространственном диапазоне измерения, является целью данной работы.

### Постановка задачи

Исследовать конструктивные решения существующих электроиндукционных сферических датчиков напряженности электрического поля и на основании этого предложить идею создания датчика нового поколения с повышенной точностью. Для этого необходимо решить следующие задачи:

- рассмотреть особенности конструктивных решений сферических датчиков напряженности электрического поля;
- выдвинуть идею создания датчика нового поколения, позволяющего значительно уменьшить погрешность измерения неоднородных электрических полей;
- провести разработку датчика нового поколения и оценить его погрешности при измерении неоднородных электрических полей.

**Конструктивные решения известных датчиков**

В настоящее время известны два вида электроиндукционных датчиков напряженности электрического поля – одинарные [5] и двойные [13]. Одинарные датчики имеют один проводящий чувствительный элемент, изолированно расположенный от проводящего основания корпуса датчика. В этом случае проводящее основание является вторым чувствительным элементом датчика. Двойные датчики имеют два чувствительных элемента, изолированно расположенных с двух противоположных сторон проводящего основания корпуса датчика. Одинарные датчики дешёвы и просты в изготовлении, но сильно восприимчивы к различным электрическим помехам. Сильная восприимчивость к помехам одинарных датчиков приводит их к значительным систематическим погрешностям. Последние обстоятельства ограничивают использование одинарных и способствуют широкому распространению двойных датчиков.

Для дальнейших теоретических исследований рассмотрим сферические электроиндукционные двойные датчики напряженности электрического поля. В качестве таких датчиков выберем два датчика. У одного датчика два чувствительных элемента выполнены в форме сферических сегментов, имеют угловые размеры  $\theta_0 \leq 45^\circ$  [14, 15], у другого – в форме полушфер с угловыми размерами  $\theta_0 = 90^\circ$  [17-19].

**Конструктивная модель датчика первого вида**

Датчик первого вида представлен на рис. 1 и рассмотрен в работе [15].

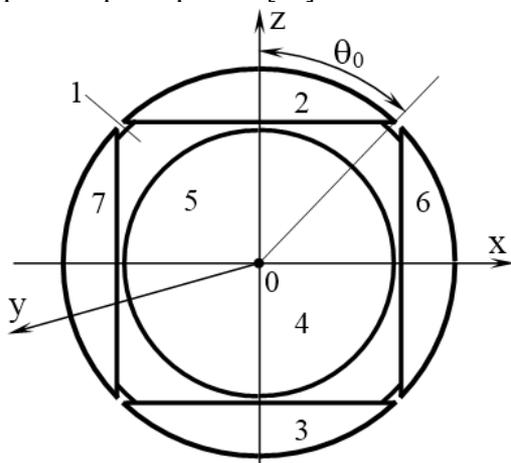


Рис. 1. Двойной трехкоординатный сферический датчик

Датчик состоит из проводящего сферического основания 1 с тремя парами проводящих чувствительных элементов 2-3, 4-5 и 6-7.

Пары чувствительных элементов расположены по трем координатным осям x, y и z, проходящим через центр сферического основания 0. Чувствительные элементы имеют форму сферических сегментов и изолированы друг от друга и поверхности сферического основания. Для предотвращения перекрытия чувствительных элементов их угловой размер не должен превышать  $\theta_0 \leq 45^\circ$ . Малая толщина изоляционного слоя и чувствительных элементов позволяет считать поверхность датчика единой сферической поверхностью.

Для проведения дальнейшего теоретического анализа будем рассматривать только одну из координатных осей, например, ось z, трехкоординатного датчика, при этом нас в первую очередь будет интересовать погрешность сформированного датчика от неоднородности электрического поля.

Неоднородные электрические поля можно модулировать с помощью униполей - точечных зарядов [3, 7, 15, 17-23]. За показатель неоднородности поля примем параметр  $a=R/d$ , где R – линейный размер датчика, например, его радиус; d – расстояние от центра основания датчика до источника поля. Параметр a также определяет пространственный диапазон измерения.

Погрешность от неоднородности электрического поля датчика будем оценивать, воспользовавшись известным выражением для погрешности, приведенным в [3].

$$\delta(a) = \left[ \begin{array}{c} \frac{1}{3a^2 \sin^2 \theta_0} \\ \left( 2 - \frac{1-a^2}{\sqrt{1-2a \cos \theta_0 + a^2}} - \frac{1-a^2}{\sqrt{1+2a \cos \theta_0 + a^2}} \right) - 1 \end{array} \right] \times 100, \quad (1)$$

где  $\theta_0 \leq 45^\circ$  - угловой размер сферического сегмента.

Погрешность (1) от неоднородности электрического поля в зависимости от пространственного диапазона измерения a, построенная для двойного датчика с угловыми размерами сферических сегментов  $\theta_0 = 45^\circ$ , представлена на

рис. 2.

Из графика следует, что двойной датчик первого исполнения при угловых размерах сферических сегментов  $\theta_0=45^\circ$  во всем пространственном диапазоне измерения  $0 \leq a \leq 1$  имеет положительную погрешность, достигающую 35%.

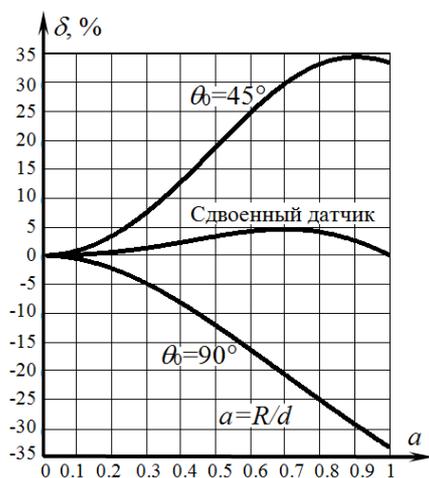


Рис. 2. Графические зависимости погрешности от неоднородности электрического поля для двойных датчиков с угловыми размерами чувствительных элементов  $\theta_0=45^\circ$  и  $\theta_0=90^\circ$  и двойного датчика

Если ограничиться приемлемой погрешностью 10%, то расстояние  $d$  до источника поля не превысит  $3 \cdot R$ , а пространственный диапазон измерения составит  $0 \leq a \leq 0,35$ .

### Конструктивная модель датчика второго вида

Двойной датчик второго исполнения рассмотрен в работе [7] и представлен на рис. 3.

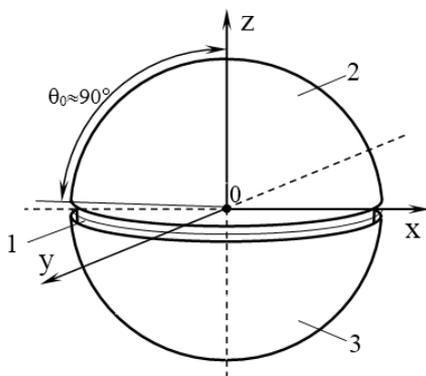


Рис. 3. Двойной однокоординатный датчик с чувствительными элементами в форме полусфер

Датчик состоит из двух изолированных друг от друга проводящих тонкостенных полу-

сфер 1-2, являющихся чувствительными элементами датчика. Специально принятые меры позволяют считать датчик единой эквипотенциальной сферической поверхностью. К таким мерам относятся малый зазор между полусферами и малое входное сопротивление измерительной цепи.

Проведем оценку погрешности от неоднородности поля для двойного однокоординатного датчика с чувствительными элементами в форме полусфер, имеющих угловой размер  $\theta_0 \approx 90^\circ$ . Для этого по выражению (1) построим на рис. 2 график погрешности  $\delta(a)$  рассматриваемого датчика.

Из графика (рис. 2) следует, что двойной датчик второго вида при угловых размерах сферических сегментов  $\theta_0=90^\circ$  во всем пространственном диапазоне измерений  $0 \leq a \leq 1$  имеет отрицательную погрешность, достигающую 35%. Если ограничиться допустимой погрешностью -10%, то расстояние  $d$  до источника поля не превысит  $2 \cdot R$ , а пространственный диапазон измерения составит  $0 \leq a \leq 0,45$ .

Можно заключить, что датчики первого и второго вида имеют следующие особенности и недостатки, заключающие в том, что знак и значения погрешностей от неоднородности поля зависят от угловых размеров их чувствительных элементов; допустимая погрешность датчиков составляет  $\pm 10\%$ ; датчики имеют ограниченный пространственный диапазон измерения, который не превышает  $0 \leq a \leq 3 \cdot R$ .

Эти особенности и недостатки необходимо учитывать при разработке датчиков нового поколения. В основу построения датчиков нового поколения может быть положена особенность датчиков первого и второго видов, иметь разную по знаку погрешность от неоднородности электрического поля.

### Датчик нового поколения

Выявленная особенность двух видов датчиков иметь отличные по знаку погрешности позволила выдвинуть идею совмещения двух видов датчиков в одном. Это позволило одновременно измерять двумя датчиками с разными по знаку значениями погрешности два значения напряженности электрического поля с последующим определением среднего из них, которое всегда будет ближе к истинному значению. Таким образом, можно уменьшить погрешность измерения неоднородного электри-

ческого поля. Объединив два датчика в одном, получаем универсальный датчик нового поколения, которому присваиваем название – «сдвоенный датчик».

Введя понятие сдвоенного датчика, наряду с известными двумя видами датчиков - одинарный и двойной, появляется еще и третий новый вид - сдвоенный. Сдвоенный датчик может воплощать в себе одинарные, двойные и сдвоенные виды датчиков. В этом его универсальность.

Сдвоенный датчик напряженности электрического поля представлен на рис. 4.

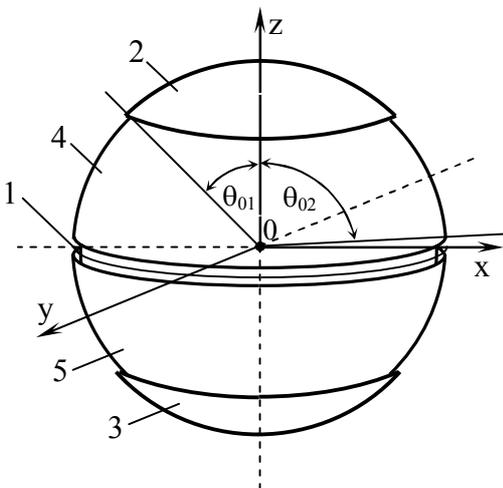


Рис. 4. Сдвоенный однокоординатный сферический датчик

Сдвоенный датчик состоит из проводящего сферического основания 1 и двух пар чувствительных элементов 2-3 и 4-5, расположенных на поверхности сферического основания и одной координатной оси z. Чувствительные элементы 2-3 выполнены с угловым размером  $\theta_{01}=45^\circ$ , а 4-5 – с угловым размером  $\theta_{02}\approx 90^\circ$ . Они изолированы друг от друга и от сферического основания. Толщина изоляционного слоя и чувствительных элементов датчика много меньше радиуса сферического основания. Это и специально принятые меры позволяют считать поверхность датчика единой сферической эквипотенциальной поверхностью.

Рассмотрим работу сдвоенного датчика в неоднородном электрическом поле.

При внесении сдвоенного датчика в электрическое поле каждым датчиком происходит одновременное измерение напряженностей  $E_1$  и  $E_2$ . Причем напряженность поля  $E_1$  измеряется с положительной погрешностью, а напряженность  $E_2$  - с отрицательной погрешностью. С учетом знака погрешности запишем для

каждого датчика измеренные значения напряженности электрического поля  $E_1$  и  $E_2$ :

$$\begin{cases} E_1 = E_0(1 + \delta_1) \\ E_2 = E_0(1 + \delta_2) \end{cases}, \quad (2)$$

где  $E_0$  – напряженность электрического поля в исследуемой точке пространства;  $\delta_1$  – погрешность первого датчика;  $\delta_2$  – погрешность второго датчика. Найдем среднее значение напряженности электрического поля

$$\begin{aligned} E &= \frac{E_1 + E_2}{2} = \\ &= \frac{E_0(1 + \delta_1) + E_0(1 + \delta_2)}{2}, \quad (3) \\ &= E_0 \left( 1 + \frac{\delta_1 - \delta_2}{2} \right) = E_0(1 + \delta) \end{aligned}$$

где

$$\delta = \frac{\delta_1 - \delta_2}{2} \quad (4)$$

- погрешность, получаемая при использовании сдвоенного датчика.

Оценим эту погрешность, подставив в выражение (4) погрешности  $\delta_1$  для углового размера сферического сегмента  $\theta_{01}=45^\circ$  и  $\delta_2$  для углового размера сферического сегмента  $\theta_{02}=90^\circ$ , определяемые выражением (1).

$$\delta(a) = \frac{\delta_1(a, 45^\circ) - \delta_2(a, 90^\circ)}{2}. \quad (5)$$

После преобразования выражения (5) получим

$$\delta(a) = \left\{ \frac{1}{3a^2} \left[ \begin{array}{c} 3 - (1 - a^2) \cdot \\ \left( \frac{1}{\sqrt{1 - a\sqrt{2 + a^2}}} + \right) \\ \frac{1}{\sqrt{1 + a\sqrt{2 + a^2}}} + \\ \frac{1}{\sqrt{1 + a^2}} \end{array} \right] - 1 \right\} \times 100 \quad (6)$$

Построим по выражению (5) график погрешности  $\delta(a)$  для сдвоенного датчика в зависимости от пространственного диапазона измерения  $a$  и представим его на рис. 2. На этом же

рисунке показаны погрешности двойных датчиков, входящих в состав сдвоенного датчика с угловыми размерами сферических сегментов  $\theta_0=45^\circ$  и  $\theta=90^\circ$  соответственно. Из представленных на рис. 2 графиков следует, что сдвоенный датчик позволяет не только значительно снизить погрешность измерения неоднородных электрических полей, но и расширить пространственный диапазон измерения. Согласно рис. 2, сдвоенный датчик имеет погрешность, не превышающую +5 % во всем пространственном диапазоне измерения  $0 \leq a \leq 1$ . В то время как для датчиков, входящих в состав сдвоенного датчика, в том же пространственном диапазоне измерения погрешность составляет  $\pm 35\%$ .

Таким образом, используя сдвоенный датчик можно добиться значительного повышения точности измерения напряженности неоднородных электрических полей в широком пространственном диапазоне измерений по сравнению с известными датчиками.

### Результаты исследований

Проведенные исследования двойных датчиков позволили выявить зависимость знака их погрешностей от размеров чувствительных элементов датчиков. Это привело к идее создания универсального датчика напряженности электрического поля нового вида, относящихся к виду сдвоенных датчиков. Сдвоенный датчик позволяет воспринимать напряженность неоднородного электрического поля с погрешностью, не превышающей +5 % во всем пространственном диапазоне измерения  $0 \leq a \leq 1$ . При этом расстояние  $d$  до источника поля ограничено только радиусом сферического основания датчика, т.е.  $d \approx R$ .

### Выводы и заключения

Предложен новый универсальный датчик, относящийся к виду сдвоенных датчиков. Введено новое понятие – «сдвоенный датчик». Сдвоенный датчик без усложнения процесса измерений позволяет повысить точность измерения напряженности неоднородных электрических полей в широком пространственном диапазоне.

### Литература

1. Воздействие электрического поля распределительных устройств 500 и 750 кВ на обслуживающий персонал и средства для его защиты / В.П. Коробкова, Ю.А. Морозов, М.Д. Столяров и др. // Подстанции переменного тока: материалы Междунар. конф. по большим электрическим системам (СИГРЭ-72). М.: Энергоатомиздат, 1974. С. 33–43.
2. Eggert S., Goltz S. NFM-1 ein aperiodisches Nahfeld- Stärkemeßgerät für Messungen an Hochfrequenzarbeitsplätze // Radio fernsehen elektronik. 1976. 25, H 15. P. 488–490.
3. Calculation and measurement of fields on EHV and UHV substations and near transmission lines / S.V. Biryukov, F.G. Kaidanov, R.A. Kats, V.Ya. Lozhnikov // CIGRE-86. International Conference on Large High Voltage Electric Systems, Report 36-06, Session 27th August-4th September 1986. Paris. 5 P.
4. Прибор для измерения напряженности электрического поля / В.И. Сукманов, В.И. Сафонов, А.Н. Ильин, М.Ю. Масленников // Электрические станции. 1987. № 6. С. 69–71.
5. Берент Г.Н., Плейс И.Р. Датчик электрического поля // Приборы для научных исследований. 1971. № 6. С. 141–142.
6. Пат. 148321 ЧССР, МКИ G01R 33/02. Zapojeni pro akumulacni mčeni intensity elektromagnetického pole / Alfred Delong. № PV1794-68; Заявлено 11.09.71; Оpubл. 15.04.73.
7. Misakian M., Kotter F.R., Kahler R.L. Miniature ELF Electric Field Probe // Instruments for scientific research. 1978. Vol. 7. P. 933-935.
8. Датчики напряженности электростатического поля EP-600. Руководства, инструкции, описание для "Narda PMM EP-600, EP-601, EP-602, EP-603, EP-604 датчики напряженности поля": URL: <https://newpribor.ru/catalog/ispytatelnoe-oborudovanie/probniki-polya/narda-pmm-ep-600-ep601-ep-602.html> (дата обращения: 05.08.2019).
9. Mathieu Baicry, Matthieu Le Prado. Device for measuring an electric field in a conducting medium and method of calibrating such a device. US patent № US20160238646 A1, USA, / №US 15/045,445; filed 17.02.2016; published 18.08.2017.
10. William H. Beasley, Leon G. Byerley, Jody A. Swenson, Ivan G. Bogoev. Low power, low maintenance. Electric-field meter. US patent US006984971B1/ №6984971B1; filed 14.03.2002; published 10.01.2006.
11. ГОСТ Р 51070-97. Государственный стандарт Российской Федерации. Измерители напряженности электрического и магнитного полей. Общие технические требования и методы испытаний. М.: Издательство стандартов, 1997. 16 с.
12. Бирюков С.В. Трёхкоординатный электроиндукционный датчик напряженности электрического поля в виде трех взаимно перпендикулярных дисков // Омский научный вестник. 2000. № 5 (173). С. 67-73.
13. Гатман С. Двойной измеритель электрического поля с защитой // Приборы для научных исследований. 1968. № 1. С. 45-49.
14. Бирюков С.В., Ложников В.Я. Цифровой измеритель напряженности электрического поля промышленной частоты // Приборы и техника эксперимента. 1981. № 1. С. 275.
15. Horvath T., Clement G. Измерение напряженности неискаженного электрического поля в высоковольт-

ных установках // Measurement of the distortion less electric field intensity of high voltage installations. Third International Symposium on High Voltage Engineering. Milan, 28-31 Aug. 1979. P. 44.05/1-44.05/4.

16. Бирюков С.В., Тюкин А.В. Конструктивные погрешности трехкоординатных датчиков напряженности электрического поля // Омский научный вестник. 2017. №3 (153). С. 82-86.

17. Chauzy Serge, Magnes Pierre. Mise au point d'un mesureur de champ électrique alternatif 50 Hz // Rev. gen. elec. 1988. № 7. P.27-38.

18. Charles J., Miller J. The Measurement of Electric Fields in Live Line Working // IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. 1967. Vol. pas-86. №4. P.493-498.

19. Pop E., Crişans S., Stoica V. Măsurarea intensităţii câmpului electric alternativ // Metrologia aplicată. 1975. V.22. № 2. P. 73-81.

20. Böcker H., Hagenmeyer E. Ein Paitrag zur Messung der elektrischen Feldstärke bei hoher Gleichspannung // Elektrotechnische Zeitschrift. 1966. A87. №23. P.829-831.

21. Feser K., Pfaff W. A potential free spherical sensor for the measurement of transient electric fields // IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems. 1984. Vol. Pas-103. №10. P.2904-2911.

22. Thomson Ewen M., Medelius Pedro J., Uman Martin A. A remote sensor for the three components of transient electric field // IEEE Trans. Ind. Electron. 1988. 35. №3. P.426-433.

23. Bassen H.I., Smith G.S. Electric field probes – a review // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 1983. Vol. AP-31. №5. P.710-718.

Поступила 07.09.2021; принята к публикации 20.10.2021

#### Информация об авторах

**Бирюков Сергей Владимирович** - д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры «Физика», Омский государственный технический университет (644050, Россия, г. Омск, пр-т Мира, д. 11), профессор кафедры «Физика и математика», Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (644080, Россия, г. Омск, проспект Мира, 5), тел.: (3812) 65-02-18, +79081066078, e-mail: sbiryukov154@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1362-9911>

**Тюкин Александр Владимирович** - канд. техн. наук, доцент кафедры «Физика и математика», Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (644080, Россия, г. Омск, проспект Мира, 5), тел.: +79831101529, (3812) 65-02-18, e-mail: tyukin\_av@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7316-3797>

**Тюкина Людмила Владимировна** - преподаватель, Омский промышленно-экономический колледж (644029, Россия, г. Омск, Нефтезаводская, 6), тел. (3812) 67-04-92, +79095361782, e-mail: lyudmila.omsk@mail.ru

## DUAL SPHERICAL ELECTRIC FIELD VOLTAGE SENSOR

S.V. Biryukov<sup>1,2</sup>, A.V. Tyukin<sup>2</sup>, L.V. Tyukina<sup>3</sup>

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

<sup>2</sup> Siberian State Automobile and Highway University, Omsk, Russia

<sup>3</sup> Omsk Industrial and Economic College, Omsk, Russia

**Abstract:** we live in a world of high energy technologies capable of transmitting electrical energy over long distances. This energy cannot be concentrated only within the transmitting energy systems. It spills out in the form of electric fields. These electric fields adversely affect the environment, technical and biological objects. In this regard, it is necessary to control the levels of electric fields, an important characteristic of which is the strength of the electric field. Sensors of the electric field strength are required to sense the electric field. The existing sensors are inconvenient in operation and have a high error in the perception of the electric field strength, reaching  $\pm 20\%$ . In the work under consideration, the idea of creating a universal sensor of a new type, related to the type of dual sensors, is put forward. Its versatility lies in the fact that it embodies all types of known sensors - single, twin, and now dual. The error in the perception of the intensity of the inhomogeneous electric field of the dual sensors does not exceed  $+ 5\%$  in the entire spatial measurement range  $0 \leq a \leq 1$ . In this case, the distance  $d$  to the field source is limited only by the radius of the spherical base of the sensor, i.e.  $d \approx R$ . At the same time, for sensors that are part of a dual sensor in the same spatial measurement range, the error is  $\pm 35\%$ . Using a dual sensor, it is possible to achieve a significant increase in the accuracy of measuring the strength of inhomogeneous electric fields in a wide spatial measurement range in comparison with known sensors.

**Key words:** electric field strength sensor, single sensor, double sensor, dual sensor, electric field strength, field homogeneity error

#### References

1. Korobkova V.P., Morozov Yu.A., Stolyarov M.D. et al. "The impact of the electric field of switchgears 500 and 750 kV on service personnel and means for its protection", *Proc. of the Intern. Conf. for Large Electrical Systems: Alternating Current Substations (Podstantsii peremennogo toka: materialy Mezhdunar. konf. po bol'shim elektricheskim sistemam (SIGRE-72))*, Moscow: Energoatomizdat, 1974, pp. 33-43.
2. Eggert S., Goltz S. "NFM-1 ein aperiodisches Nahfeld- Stärkemessgerät für Messungen an Hochfrequenzarbeitsplätze", *Radio Fernsehen Elektronik*, 1976, vol. 25, no. 15, pp. 488-490.

3. Biryukov S.V., Kaidanov F.G., Kats R.A., Lozhnikov V.Ya. "Calculation and measurement of fields on EHV and UHV substations and near transmission lines", *CIGRE-86. International Conference on Large High Voltage Electric Systems*, report 36-06, session 27th August - 4th September 1986, Paris, 5 p.
4. Sukmanov V.I., Safonov V.I., Ilin A.N., Maslennikov M.Yu. "A device for measuring the strength of the electric field", *Electric Stations (Elektricheskie stantsii)*, 1987, no. 6, pp. 69-71.
5. Berent G.N., Pleys I.R. "Electric field sensor", *Instruments for Scientific Research (Pribory dlya nauchnykh issledovaniy)*, 1971, no. 6, pp. 141-142.
6. Delong A. "Zapojeni pro akumulacni mēreni intensity elektromagnetického pole", patent 148321 ChSSR. MKI G01R, Zavavleno, 11.09.71.
7. Misakian M., Kotter F.R., Kahler R.L. "Miniature ELF electric field probe", *Instruments for Scientific Research*, 1978, vol. 7, pp. 933-935.
8. "Sensors of intensity of an electrostatic field EP-600. Manuals, instructions, description for "Narda PMM EP-600, EP-601, EP-602, EP-603, EP-604 field strength sensors"", available at: <https://newpribor.ru/catalog/ispitatelnoe-oborudovanie/probniki-polya/narda-pmm-ep-600-ep601-ep-602> (date of access: 05.08.2019).
9. Baicry M., Le Prado M. "Device for measuring an electric field in a conducting medium and method of calibrating such a device", patent US20160238646 A1, USA, filed 17.02.2016, published 18.08.2017.
10. Beasley W.H., Byerley L.G., Swenson J.A., Bogoev I.G. "Low power, low maintenance. Electric-field meter", patent US006984971B1, filed 14.03.2002, published 10.01.2006.
11. GOST R 51070-97 "State standard of the Russian Federation. Electric and magnetic field strength meters. General technical requirements and test methods", Moscow: Izdatelstvo standartov, 1997, 16 p.
12. Biryukov S.V. "Three-coordinate electric induction sensor of electric field strength in the form of three mutually perpendicular disks", *Omsk Scientific Bulletin (Omskiy nauchnyy vestnik)*, 2000, no. 5 (173), pp. 67-73.
13. Gatman S. "Double electric field meter with protection", *Instruments for Scientific Research (Pribory dlya nauchnykh issledovaniy)*, 1968, no. 1, pp. 45-49.
14. Biryukov S.V., Lozhnikov V.Ya. "Digital meter of electric field strength of industrial frequency", *Instruments and Experimental Technique (Pribory i tekhnika eksperimenta)*, 1981, no. 1, pp. 275.
15. Horvath T., Clement G. "Measurement of the distortion less electric field intensity of high voltage installations", *Third International Symposium on High voltage Engineering*, Milan, 28-31 Aug. 1979, p. 44.05/1-4.
16. Biryukov S.V., Tyukin A.V. "Constructive errors of three-coordinate sensors of electric field strength", *Omsk Scientific Bulletin (Omskiy nauchnyy vestnik)*, 2017, no. 3 (153), pp. 82-86.
17. Chauzy S., Pierre M. "Mise au point d'un mesureur de champ électrique alternatif 50 Hz", *Rev. Gen. Elec.*, 1988, no. 7, pp. 27-38.
18. Charles J., Miller J. "The measurement of electric fields in live line working", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1967, vol. 86, no. 4, pp. 493-498.
19. Pop E., Crișan S., Stoica V. "Măsurarea intensității câmpului electric alternativ", *Metrologia Aplicată*, 1975, vol. 22, no. 2, pp. 73-81.
20. Böcker H., Hagenmeyer E. "Ein Paitrag zur Messung der elektrischen Feldstärke bei hoher Gleichspannung", *Elektrotechnische Zeitschrift*, 1966, A87, no. 23, pp. 829-831.
21. Feser K., Pfaff W. "A potential free spherical sensor for the measurement of transient electric fields", *IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems*, 1984, vol. 103, no. 10, pp. 2904-2911.
22. Thomson E.M., Medelius P.J., Uman M.A. "A remote sensor for the three components of transient electric field", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 1988, vol. 35, no. 3, pp. 426-433.
23. Bassen H.I., Smith G.S. "Electric field probes – a review", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1983, vol. AP-31, no. 5, pp. 710-718.

Submitted 07.09.2021; revised 20.10.2021

#### Information about the authors

**Sergey V. Biryukov**, Dr. Sc. (Technical), Professor, Omsk State Technical University (11 Prospect Mira, Omsk 644050, Russia); Professor, Siberian State Automobile and Highway University (5 Prospect Mira, Omsk 644080, Russia), tel. +7(3812)65-02-18, +79081066078, e-mail: sbiryukov154@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1362-9911>

**Aleksandr V. Tyukin**, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Siberian Automobile and Highway University (5 Prospect Mira, Omsk 644080, Russia), tel. +79831101529, +7(3812) 65-02-18, e-mail: tyukin\_av@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7316-3797>

**Lyudmila V. Tyukina**, Assistant Professor, Omsk Industrial and Economic College (6 Neftezavodskaya str., Omsk 644029, Russia), tel. +7(3812) 67-04-92, +79095361782, e-mail: lyudmila.omsk@mail.ru

**Машиностроение и машиноведение**

DOI 10.36622/VSTU.2021.15.5.013

УДК 621.914

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЧИСТОВОГО ФРЕЗЕРОВАНИЯ  
ВОГНУТЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ НА МАЛОГАБАРИТНЫХ СТАНКАХ С ЧПУ**А.М. Козлов<sup>1</sup>, Г.Е. Малютин<sup>2</sup>, Е.А. Малявин<sup>1</sup>, А.А. Козлов<sup>1</sup><sup>1</sup>Липецкий государственный технический университет, г. Липецк, Россия<sup>2</sup>Елецкий государственный университет имени И.А. Бунина, г. Елец, Россия

**Аннотация:** развитие систем ЧПУ современного полногабаритного металлорежущего оборудования дало возможность корректировать режимы резания, например, величину рабочей подачи непосредственно в процессе обработки. Однако на производстве имеется значительная часть деталей, которые по своим габаритам экономически невыгодно обрабатывать на дорогостоящих крупных станках, имеющих мощную систему ЧПУ. Поэтому на предприятиях все большее применение получают относительно недорогие малогабаритные металлорежущие станки. Технологические возможности такого оборудования позволяют обрабатывать не только цветные металлы и сплавы, но и стали. Особенностью управления таким оборудованием является использование упрощенных систем ЧПУ, установленных на персональных компьютерах, которые не имеют возможности выполнять арифметические операции, и это становится препятствием для повышения производительности обработки сложных поверхностей. В то же время из-за своей простоты и низкой стоимости эти системы становятся все более востребованными. Предлагается повысить производительность обработки поверхностей сложной пространственной формы на основе расчета движения инструмента САПР системой путем преобразования реальной траектории в набор симметричных отрезков с известными координатами. Этот метод позволяет при заданной точности обработки установить значения параметров режима резания, близкие к оптимальным, исключить аварийные ситуации, связанные с выходом из строя инструмента при работе с переменной глубиной резания, сформированной после черновой обработки, и повысить производительность на 15-20%

**Ключевые слова:** объемное фрезерование, концевая фреза, точность, производительность

**Введение**

Одним из наиболее распространенных способов обработки поверхностей различной конфигурации, в том числе произвольной пространственной формы, является фрезерование. Нестабильность процесса резания, присущая этому способу обработки, выражается в колебаниях силовых и температурных параметров процессов стружкообразования и создает дополнительные трудности в обеспечении качества обрабатываемых поверхностей и работоспособности режущего инструмента [1].

**Постановка задачи**

Совершенствование изделий машино-, автомобиле- и самолетостроения приводит к необходимости механической обработки деталей все более сложной конфигурации из новых, все более прочных и, соответственно, труднообрабатываемых материалов. В этой связи при разработке и реализации технологических процессов механической обработки

возникает задача обеспечения выполнения требований точности и качества обработки, заданных чертежом, при требуемой производительности.

Обеспечить выполнение указанных требований возможно с применением станков с числовым программным управлением (ЧПУ). На таких станках при применении надлежащего инструмента даже для деталей со сложной пространственной формой, изготавливаемых из материалов с высокими механическими свойствами, обеспечивается выполнение высоких требований по геометрической точности обрабатываемых поверхностей и их взаимному расположению, а также шероховатости и волнистости.

В производственных условиях процесс обработки поверхности сложной пространственной формы, в частности, вогнутой, как правило, выполняется в два этапа. Сначала, на этапе черновой обработки, удаляется максимально возможный припуск с помощью инструмента простой геометрической формы, например, цилиндрической или концевой фрезы с плоским торцом. В результате на обработанной поверхности формируется неравномерный припуск под чистовую обработку, т.е. по-

верхность имеет характерный «ступенчатый» вид, а у детали с вогнутыми поверхностями образуется необработанная зона у дна (рис. 1).

Чистовая обработка вогнутых поверхностей производится концевыми фрезами со сферическим торцом с поперечной подачей в конце хода по заданной траектории (рис. 2). Такие фрезы, в силу своей конструкции, имеют относительно невысокую жесткость и могут претерпевать «отжатие» от обрабатываемой поверхности под действием сил резания. В этом случае возникает отклонение формы обработанной поверхности от заданной чертежом, что может потребовать дополнительной обработки, например, шабрением.

При перемещении инструмента по такой траектории геометрические параметры зоны резания будут переменными, что вызывает колебания сил резания и, как следствие, колебания величины срезаемого припуска. Такая нестабильность приводит к возникновению дополнительной погрешности обработки. Поэтому, чтобы исключить такую ситуацию, обработку ведут на заниженных режимах. Необходимо провести исследования возможности повышения производительности чистовой обработки вогнутых поверхностей.

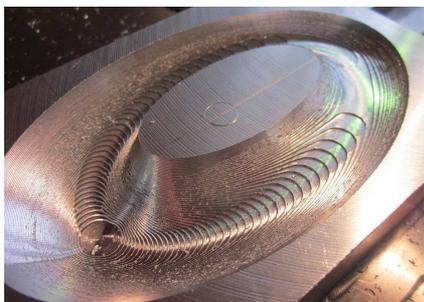
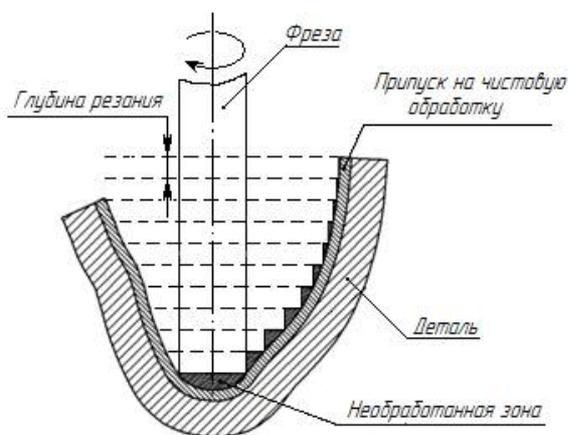


Рис. 1. Схема образования припуска на чистовую обработку вогнутой поверхности и внешний вид детали после черновой обработки

## Методы исследования

С целью стабилизации сил резания на современных станках устанавливаются системы управления, имеющие возможность корректировать режимы резания, например, величину рабочей подачи непосредственно в процессе обработки. Но они работают с некоторым запаздыванием, что создает опасность «зарезания» рабочего контура детали [2] и ограничивает их применение.

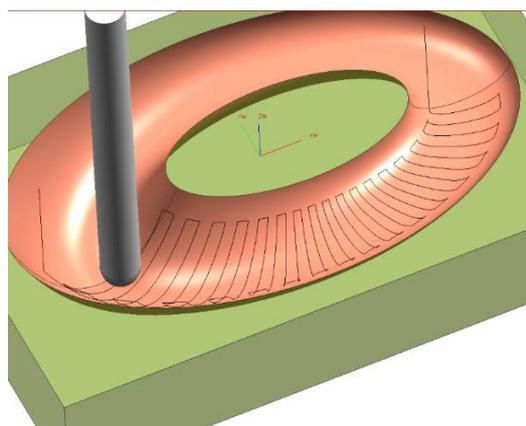


Рис. 2. Схема чистовой обработки вогнутой поверхности

Кроме того, такие системы значительно повышают стоимость металлорежущего оборудования. С другой стороны, имеется довольно большая группа деталей, которые из-за небольших габаритных размеров можно обрабатывать на малогабаритных, настольных станках с ЧПУ. Недостатком таких станков является отсутствие сложной системы ЧПУ, т.е. упрощенная система управления. Для таких станков необходимо найти способ стабилизации силовых параметров процесса резания, учитывающий изменение контура обрабатываемой поверхности. В исследованиях [3-6] отмечается, что одним из вариантов решения задачи является покадровое управление подачей. В данной работе методом исследования является геометрический анализ траектории перемещения режущего инструмента с целью снижения нестабильности сил резания и вероятности возникновения аварийной ситуации или получения брака.

## Результаты

Современные САПР системы, как правило, решают только задачи по формированию траектории перемещения инструмента для получения

требуемой конфигурации обработанной поверхности. Однако при этом не учитывается изменение силовых параметров процесса при колебаниях геометрических параметров срезаемого слоя.

В управляющих программах, разработанных для сложных, в основном, импортных, систем ЧПУ некоторые расчеты по корректировке режимов резания в зависимости от траектории движения инструмента производятся во время работы оборудования - рис. 3.

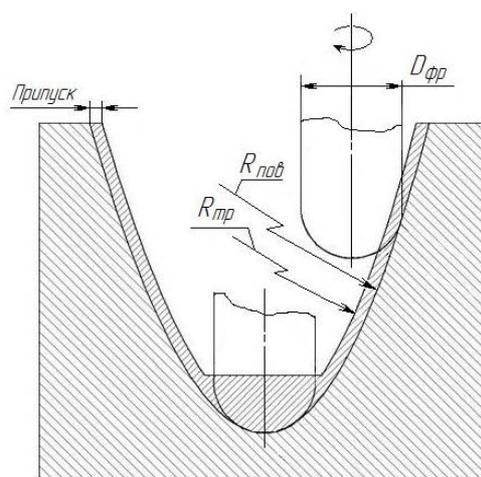


Рис. 3. Схема чистовой обработки вогнутой поверхности

Как следует из рисунка, фреза на различных участках своей траектории движения – при формировании «стенки» или «дна» профиля детали - работает в различных условиях действия сил резания [7-9]. Учитывая относительно невысокую жесткость инструмента, возможно искажение траектории его перемещения и искажение рабочего профиля детали относительно чертежа [10, 11].

В зарубежных системах ЧПУ имеются специальные блоки управления для корректировки подачи в зависимости от условий резания

$$F_i = F_3 K_i, \quad (1)$$

где  $F_i$  – подача на  $i$ -ом участке;  $F_3$  – заданная подача;  $K_i$  – коэффициент коррекции:

$$K_i \approx 0,18NR_{фр.}^{-1,3} \ln(R_{мп.} + R_{фр.}), \quad (2)$$

где  $R_{фр.}$  – радиус концевой фрезы,  $R_{мп.}$  – радиус аппроксимации траектории обрабатываемого участка произвольного контура.

Как следует из выражения (2) для корректировки подачи, следует знать значение радиуса, описывающего произвольный участок траектории. Для определения этого значения необходимы координаты минимум трех точек, задающих траекторию обрабатываемого участ-

ка: предыдущую, текущую и последующую.

В используемых в настоящее время САПР системах блоки управления генерируют команды описания координат только первых двух точек. Команда описания координаты последующей точки, расположенной на кривой второго порядка, отсутствует. Поэтому в управляющих программах систем ЧПУ со сложной математической структурой данная точка рассчитывается из последующей траектории. Для упрощенных систем ЧПУ выполнение таких расчетов невозможно. По этой причине на практике задают заниженные значения подачи, что снижает производительность обработки.

Для определения траектории перемещения инструмента при обработке участка произвольной конфигурации криволинейная траектория аппроксимируется прямолинейными отрезками. При этом отсчет ведется от предыдущей точки траектории –  $T_1$ . Необходимо определить положение последующей точки траектории -  $T_2$ . Зададимся точностью обработки  $\Delta T$  - т.е. допустимой величиной отклонения реальной конфигурации обработанной поверхности от заданной чертежом. Для упрощения построения траектории примем симметричное расположение предыдущей и последующей точек и построим равнобедренный треугольник со стороной  $a$  (расстояние между точкой  $T_1$  траектории движения инструмента и текущей) и основанием  $c=L$ , которое является расстоянием между точками  $T_1$  (предыдущей) и  $T_2$  (последующей).

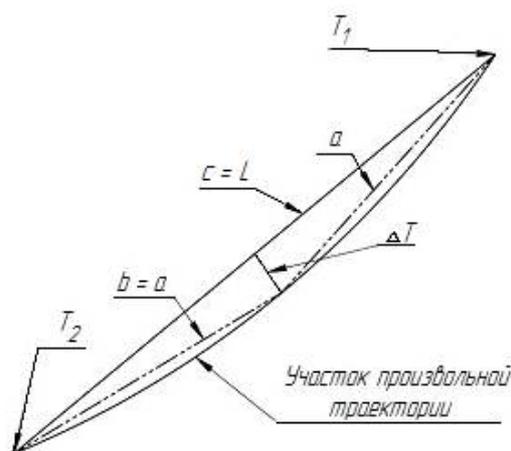


Рис. 4. Схема определения радиуса участка произвольной траектории

Известно [12], что

$$R_{мп.} = \frac{abc}{4S}, \quad (3)$$

где  $a, b, c$  – длины сторон треугольника;  $S$  – площадь треугольника, которая может быть

определена через основание и высоту  $\Delta T$

$$S = \frac{L \cdot \Delta T}{2}.$$

Значение  $c = L$  определяется САПР системой,  $a = b$  рассчитывается по выражению:

$$a = \sqrt{\Delta T^2 + \frac{L^2}{4}}. \quad (4)$$

Тогда

$$R_{mp.} = \frac{abc}{4S} = \frac{\left(\Delta T^2 + \frac{L^2}{4}\right)L}{4\left(\frac{L\Delta T}{2}\right)} = \frac{\Delta T}{2} + \frac{L^2}{8\Delta T} \quad (5)$$

Подставив (5) в зависимость (1), получим:

$$F_i = F_z 0,18 NR_{фр.}^{-1,3} \ln\left(\frac{\Delta T}{2} + \frac{L^2}{8\Delta T} + R_{фр.}\right) \quad (6)$$

На рис. 5 представлено экспериментальное фрезерование детали с вогнутой поверхностью.

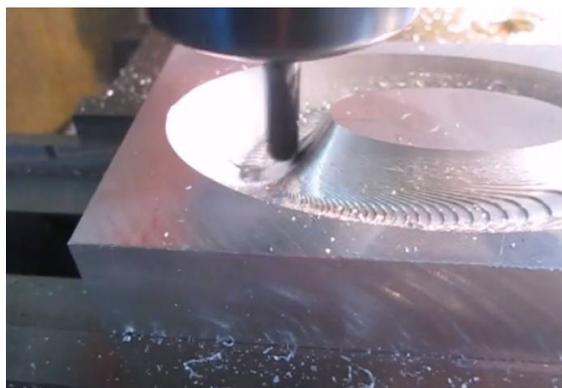


Рис. 5. Чистовое фрезерование детали с вогнутой поверхностью сложной формы

Для проверки предложенных решений были проведены исследования в производственных условиях. Обработывалась деталь – пресс-форма. На рис. 6 представлено фрезерование такой детали, имеющей вогнутую поверхность.

В результате проведенных производственных испытаний на настольном фрезерном станке с упрощенной системой управления было установлено, что применение предложенной зависимости позволяет корректировать значение подачи при обработке вогнутых поверхностей в зависимости от условий резания в данной точке участка произвольной конфигурации.

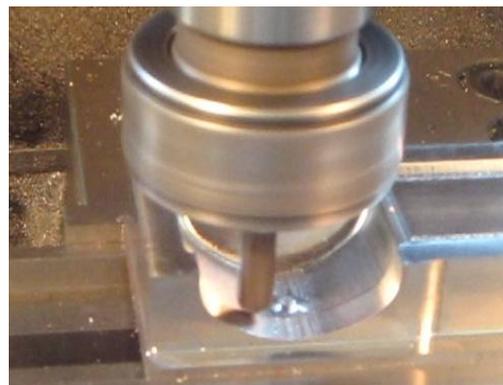


Рис. 6. Фрезерование пресс-формы детали «концевик» с вогнутой поверхностью

Корректировка величины подачи дает возможность повысить производительность на 15-20%, а также снизить вероятность поломки инструмента при изменении геометрических параметров зоны резания.

## Вывод

Предложенные решения позволяют повысить производительность обработки поверхностей, описываемых кривыми второго порядка, на настольных фрезерных станках, укомплектованных упрощенными системами ЧПУ, за счет управления подачей с учетом заданной погрешности обработки и точности симметричной экстраполяции траектории перемещения инструмента.

## Литература

1. Свинин В.М. Исследование регенеративных автоколебаний при многолезвийной обработке // Обработка металлов. 2005. № 3(28). С. 28-30.
2. Амбросимов С.К., Поддубных И.Ю. Решение некоторых задач обработки резанием методами алгебры логики // Вестник ЛГТУ. 2020. № 2 (43). С. 20-29.
3. Козлов А.М., Малютин Г.Е. Повышение производительности чистового объемного фрезерования на станках с ЧПУ // Научные технологии в машиностроении. 2013. № 11. С. 14-18.
4. Козлов А.М., Малютин Г.Е. Повышение эффективности чистового объемного 3D фрезерования на станках с ЧПУ // Научные технологии в машиностроении. 2014. № 6. С. 39-44.
5. Козлов А.М., Малютин Г.Е. Расчет подачи при чистовом фрезеровании вогнутых поверхностей на станках с ЧПУ // Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении: материалы междунар. науч.-техн. конф. Севастополь: ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», 2015. С. 40-45.
6. Малютин Г.Е. Определение усилий резания при чистовой объемной обработке вогнутых поверхностей сложной формы сферическими фрезами на станках с

ЧПУ // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. 2014. № 4(306). С. 74-81.

7. A New Algorithm for the Numerical Simulation of Machined Surface Topography in Multiaxis Ball-End Milling / Weihong Zhang, Gang Tan, Min Wan, Tong Gao, David Bassir // *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 2008. Vol. 130.

8. Afazov S.M., Ratchev S.M., Segal J. Modelling and simulation of micro-milling cutting forces // *Journal of Materials Processing Technology*. 2010. №210 (15). P. 2154–2162.

9. He K.J., Chen Z.M., Zhao L.H. A new method for classification and parametric representation of freeform sur-

face feature // *Int J Adv Manuf Technol*. 2011. № 57. P. 271-283.

10. Zakovorotny V.L., Gubanova A.A., Lukyanov A.D. Stability of Shaping Trajectories in Milling: Synergetic Concepts // *Russian Engineering Research*. 2016. № 36 (11). P. 956–964.

11. Zakovorotny V.L., Gubanova A.A., Lukyanov A.D. Parametric Self-Excitation of a Dynamic End-Milling Machine // *Russian Engineering Research*. 2016. № 36 (12). P. 1033–1039.

12. Цыпкин А.Г., Цыпкин Г.Г. Математические формулы. Алгебра. Геометрия. Математический анализ: Справочник. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит.-ры, 1985. 128 с.

Поступила 02.09.2021; принята к публикации 22.10.2021

#### Информация об авторах

**Козлов Александр Михайлович** – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой технологии машиностроения, Липецкий государственный технический университет (398055, Россия, г. Липецк, ул. Московская, 30), e-mail: kam48@yandex.ru, тел. 8-905-044-90-10, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7650-0616>

**Малютин Геннадий Евгеньевич** - канд. техн. наук, доцент кафедры технологических процессов в машиностроении и агроинженерии, Елецкий государственный университет имени И.А. Бунина (399770, Россия, Липецкая область, г. Елец, ул. Коммунаров, д. 28.1), e-mail: malgena@rambler.ru, тел.+7-950-805-48-60, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1199-9687>

**Малывин Евгений Андреевич** – магистр, кафедра технологии машиностроения, Липецкий государственный технический университет (398055, Россия, г. Липецк, ул. Московская, 30), e-mail: zheniok19@rambler.ru, тел.+7-951-307-04-20, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8922-5518>

**Козлов Андрей Александрович** - канд. техн. наук, доцент кафедры технологии машиностроения, Липецкий государственный технический университет (398055, Россия, г. Липецк, ул. Московская, 30), e-mail: soy4astnik@mail.ru, тел.+7-904-218-85-44, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1841-7106>

## IMPROVING THE EFFICIENCY OF FINISHING MILLING OF CONCAVE SURFACES ON SMALL-SIZED CNC MACHINES

A.M. Kozlov<sup>1</sup>, G.E. Malyutin<sup>2</sup>, E.A. Malyavin<sup>1</sup>, A.A. Kozlov<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>Yelets State University named after I.A. Bunin, Yelets, Russia

**Abstract:** the development of CNC systems of modern full-sized metal-cutting equipment made it possible to adjust cutting modes, for example, the value of the working feed, directly during processing. However, there is a significant number of the parts in production that, according to their dimensions, are economically unprofitable to process on expensive large machines with a powerful CNC system. Therefore, relatively inexpensive small-sized metal-cutting machines are becoming increasingly used in enterprises. The technological capabilities of such equipment allow processing not only non-ferrous metals and alloys but also steels. A feature of the control of such equipment is the use of simplified CNC systems installed on personal computers that are not able to perform arithmetic operations and this becomes an obstacle to improving the productivity of processing complex surfaces. At the same time, due to their simplicity and low cost, these systems are becoming more and more popular. In the article, we proposed to increase the productivity of processing surfaces of complex spatial shape on such machines based on the calculation of the CAD tool movement by the system by converting the real trajectory into a set of symmetrical segments with known coordinates. This method allows you, with a given processing accuracy, to set the values of the cutting mode parameters close to the optimal ones, to eliminate emergencies associated with tool failure when working with a variable cutting depth formed after roughing and to increase productivity by 15-20%

**Key words:** volumetric milling, end mill, accuracy, productivity

#### References

1. Svinin V.M. “The study of regenerative oscillations during multi-blade processing”, *Metal Processing (Obrabotka metallov)*, 2005, no. 3(28), pp. 28-30.

2. Ambrosimov S.K., Poddubnykh I.Yu. “Solution of some problems of cutting processing by methods of logic algebra”, *Bulletin of Lipetsk State Technical University (Vestnik LGTU)*, 2020, no. 2 (43), pp. 20-29

3. Kozlov A.M., Malyutin G.E. “Improving the productivity of finishing volumetric milling on CNC machines”, *High-Tech Technologies in Mechanical Engineering (Naukoymkiye tekhnologii v mashinostroyenii)*, 2013, no. 11, pp. 14-18.

4. Kozlov A.M., Malyutin G.E. "Improving the efficiency of pure 3D volumetric milling on CNC machines", *High-Tech Technologies in Mechanical Engineering (Naukoyemkiye tekhnologii v mashinostroyenii)*, 2014, no. 6, pp. 39-44
5. Kozlov A.M., Malyutin G.E. "Calculation of feed during finishing milling of concave surfaces on CNC machines", *Proc. of the Int. Sci. and Tech. Conf.: Modern Trends and Prospects for the Development of Processing and Equipment Technologies in Mechanical Engineering (Sovremennye napravleniya i perspektivy razvitiya tekhnologiy obrabotki i oborudovaniya v mashinostroyenii: Materialy mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii)*, Sevastopol State University, 2015, pp. 40-45
6. Malyutin G.E. "Determination of cutting forces during finishing volumetric processing of concave surfaces of complex shape with spherical cutters on CNC machines", *Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology (Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii)*, 2014, no. 4(306), pp. 74-81.
7. Zhang W., Tan G., Wan M., Gao T., Bassir D. "A new algorithm for the numerical simulation of machined surface topography in multi-axis ball-end milling", *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2008, vol. 130.
8. Afazov S.M., Ratchev S.M., Segal J. "Modelling and simulation of micro-milling cutting forces", *Journal of Materials Processing Technology*, 2010, no. 210 (15), pp. 2154-2162.
9. He K.J., Chen Z.M., Zhao L.H. "A new method for classification and para-metric representation of freeform surface feature", *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2011, no. 57, pp. 271-283.
10. Zakovorotny V.L., Gubanova A.A., Lukyanov A.D. "Stability of shaping trajectories in milling: synergetic concepts", *Russian Engineering Research*, 2016, no. 36 (11), pp. 956-964.
11. Zakovorotny V.L., Gubanova A.A., Lukyanov A.D. "Parametric self-excitement of a dynamic end-milling machine", *Russian Engineering Research, Russian Engineering Research*, 2016, no. 36 (12), pp.1033-1039.
12. Tsypkin A.G., Tsypkin G.G. "Mathematical formulas. Algebra. Geometry. Mathematical analysis" ("Matematicheskie formuly. Algebra. Geometriya. Matematicheskiy analiz"), a reference book, Moscow: Nauka, 1985, 128 p.

Submitted 02.09.2021; revised 22.10.2021

#### Information about the authors

**Aleksandr M. Kozlov**, Dr. Sc. (Technical), Professor, Lipetsk State Technical University (30 Moskovskaya str., Lipetsk 398055, Russia), e-mail: kam-48@yandex.ru; tel.: +7-905-044-90-10

**Gennadiy E. Malyutin**, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Bunin Yelets State University (28.1 Kommunarov str., Yelets 399770, Russia), e-mail: malgena@rambler.ru; tel.: +7-950-805-48-60

**Evgeniy A. Malyavin**, MA, Lipetsk State Technical University (30 Moskovskaya str., Lipetsk 398055, Russia), e-mail: zheni-ok19@rambler.ru, tel.: +7-951-307-04-20

**Andrey A. Kozlov**, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Lipetsk State Technical University (30 Moskovskaya str., Lipetsk 398055, Russia), e-mail: soy4astnik@mail.ru; tel.: +7-904-218-85-44

## СПОСОБ ВЕКТОРНОГО ЧАСТНОГО УПРАВЛЕНИЯ АСИНХРОННЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ

С.В. Аникин<sup>1</sup>, В.Л. Бурковский<sup>2</sup>, А.К. Муконин<sup>2</sup>, Д.А. Тонн<sup>2</sup>, В.А. Трубецкой<sup>2</sup>

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

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

**Аннотация:** анализируется проблематика векторного частотного управления асинхронным электроприводом, широко применяемым в качестве исполнительного элемента в рамках современных средств построения обрабатывающих комплексов, разрабатываемых в машиностроительной отрасли. Предлагается вариант частотно-регулируемого асинхронного электропривода, управляемыми величинами которого являются полярные координаты вектора тока в обмотке статора. В данном варианте применяется закон управления, согласно которому угол между векторами тока в обмотке статора и потокоцеплением обмотки ротора не меняется. Управление скоростью вращения электропривода и электромагнитным моментом реализуется заданием модуля тока обмотки статора. При этом формирование угла поворота вектора тока обмотки статора, зависящего от модуля величины потокоцепления роторной обмотки и значения скольжения асинхронного двигателя, дает возможность сохранять постоянным угол между векторами тока обмотки статора и потокоцеплением обмотки ротора, что, в свою очередь, реализует направленное формирование переходных процессов в асинхронном двигателе. Рассматриваемый вариант частотно-регулируемого асинхронного электропривода может найти применение в производственных механизмах, в которых быстродействие не является определяющим критерием функционирования привода, а важно плавное регулирование электромагнитного момента и возможность его ограничения во всех режимах работы. Данный способ управления характеризуется тем, что электромагнитный момент определяется исключительно модулем тока обмотки статора, а контур регулирования скольжения используется для реализации закона поддержания постоянства угла между током обмотки статора и потокоцеплением обмотки ротора

**Ключевые слова:** исполнительный орган электропривода, обрабатывающий комплекс, асинхронный электропривод, асинхронный двигатель, управление, вектор тока обмотки статора, потокоцепление обмотки ротора, закон управления

### Введение

В качестве исполнительного элемента в современных обрабатывающих комплексах, разрабатываемых в машиностроении, широко используется асинхронный электропривод. Наличие как минимум двух каналов управления таким электроприводом позволяет реализовать разные законы регулирования электромагнитного момента Мэм с учетом критериев функционирования в зависимости от требований, предъявляемых к электроприводу и условий его функционирования.

С целью упрощения системы управления асинхронным частотно-регулируемым электроприводом используются режимы стабилизации одного из параметров асинхронного двигателя. В частности, к таким режимам относятся режим работы с поддержанием постоянства частоты скольжения тока статора  $\omega_{2i}$  [1] или потокоцепления ротора [2].

Рассмотрим возможность реализации варианта частотно-регулируемого асинхронного электропривода, в котором поддерживается постоянным угол  $\alpha_{i\psi} = \psi$ , измеряемый между векторами тока обмотки статора и потокоцепления обмотки ротора. Данный вариант позволяет осуществлять направленное формирование переходных процессов [3].

### Математическая модель асинхронного двигателя

При построении системы управления частотно-регулируемым асинхронным электроприводом, в которой реализован закон управления, согласно которому величина угла  $\alpha_{i\psi} = const$  постоянна, применяется математическая модель асинхронного двигателя в системе координат, которая вращается с частотой равной частоте вращения вектора тока обмотки статора. Тогда, используя векторную форму записи, имеем математическую модель асинхронного двигателя, которая имеет следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} R_r \vec{I}_r + \frac{d\vec{\psi}_r}{dt} + j(\omega_i - \omega) \vec{\psi}_r &= 0; \\ L_m \vec{I}_s + L_r \vec{I}_r &= \vec{\psi}_r; \\ -\frac{3}{2} Z_p K_r (\vec{\psi}_r \cdot \vec{I}_s) &= M_{эм}. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $R_r$  – активное сопротивление обмотки ротора;

$\omega$  – частоты вращения ротора асинхронного двигателя;

$\omega_i$  – частоты вращения вектора тока обмотки статора;

$\vec{I}_s$  – вектор тока обмотки статора;

$\vec{I}_r$  – вектор тока обмотки ротора;

$\vec{\psi}_r$  – вектор потокосцепления обмотки ротора;

$Z_p$  – число пар полюсов асинхронного двигателя;

$T_r = \frac{L_r}{R_r}$  – электромагнитная постоянная роторной цепи;

$K_r = \frac{L_m}{L_r}$  – коэффициент электромагнитной связи ротора.

Данная математическая модель асинхронного двигателя представляет собой инструмент, позволяющий синтезировать и реализовать систему управления частотно-регулируемым асинхронным электроприводом. Для реализации поставленной задачи применяем систему координат 0,1,2, в которой ось 1 совмещена с вектором тока обмотки статора  $\vec{I}_s$ . В качестве управляемых величин используются полярные координаты вектора тока статора. Система уравнений, описывающих асинхронный двигатель, как объект частотного управления, имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} I_s L_m &= \psi_r \cos \varphi + \dot{\psi}_r \cos \varphi T_r + \\ &+ \omega_{2i} T_r \psi_r \sin \varphi; \\ \omega_{2i} T_r \dot{\psi}_r \cos \varphi &= \dot{\psi}_r \sin \varphi T_r + \psi_r \sin \varphi \cdot \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Векторная диаграмма асинхронного двигателя в системе координат 0,1,2 приведена на рис. 1.

На основе системы уравнений (2) и векторной диаграммы, приведённой на рис. 1, составим структурную схему асинхронного двигателя, введя в структуру оператор  $tg\varphi_{(s)}$ , характеризующий угол между векторами  $\vec{I}_s$  и  $\vec{\psi}_r$ :

$$tg\varphi_{(s)} = \frac{\omega_{2i(s)} T_r}{1 + T_r S}. \quad (3)$$

В операторной форме записи имеем:

$$I_{s(s)} L_m - \omega_{2i(s)} T_r = \psi_{r(s)} (1 + T_r S); \quad (4)$$

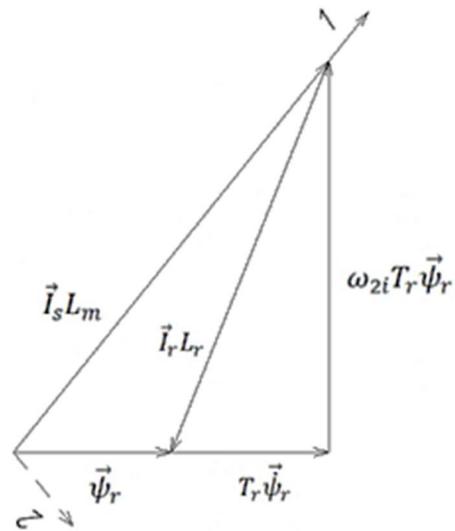


Рис. 1. Векторная диаграмма АД в системе координат 0,1,2

Структурная схема асинхронного двигателя показана на рис. 2.

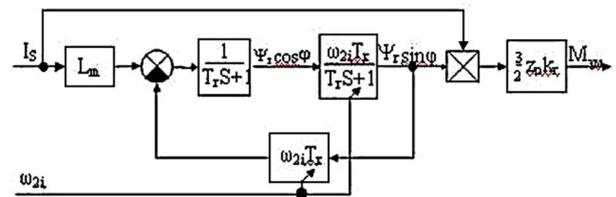


Рис. 2. Структурная схема асинхронного двигателя, реализованная в системе координат 0,1,2

Анализ приведённой структуры асинхронного двигателя показывает, что такая электрическая машина при частотном управлении представляет собой объект с параметрической обратной связью [4].

Модель можно использовать в качестве инструмента синтеза системы управления электроприводом на базе асинхронных двигателей.

### Система векторного частотного управления

При реализации закона частотного управления с стабилизацией величины угла  $\varphi$  между векторами тока обмотки статора  $\vec{I}_s$  и потокосцеплением обмотки ротора  $\vec{\psi}_r$  получим:

$$tg\varphi_{(s)} = \frac{\omega_{2i(s)} T_r}{1 + T_r S} = k, \quad (5)$$

где  $k$  – тангенс угла  $\varphi$ .

Из векторной диаграммы (рис. 1) получим:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\omega_{2i} T_r \psi_r}{\varphi_n + T_r \dot{\psi}_r} &= k; \\ \omega_{2i} &= \frac{k(\varphi_n + T_r \dot{\psi}_r)}{T_r \psi_r} = k \left( \frac{1}{T_r} + \frac{\dot{\psi}_r}{\psi_r} \right); \\ \omega_{2i} &= \omega_s + \omega_d. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где  $\omega_s$  – статическая составляющая частоты скольжения;

$\omega_d$  – динамическая составляющая частоты скольжения.

Для систем векторного частотного управления угол поворота вектора тока статора получен путём интегрирования уравнения из (6):

$$\alpha_i = \alpha + \omega_s t + \ln \psi_r. \quad (7)$$

Для реализации управления с поддержанием постоянства угла  $\varphi$  необходимо наличие датчика положения и информации о потокосцеплении ротора. Кроме того, необходимо использовать блоки обратного и прямого преобразования координат: БОПК и БППК.

На рис. 3 приведён вариант структуры системы электропривода, для которого применяется закон частотного управления, характеризующийся постоянством угла между вектором тока обмотки статора и потокосцеплением обмотки ротора.

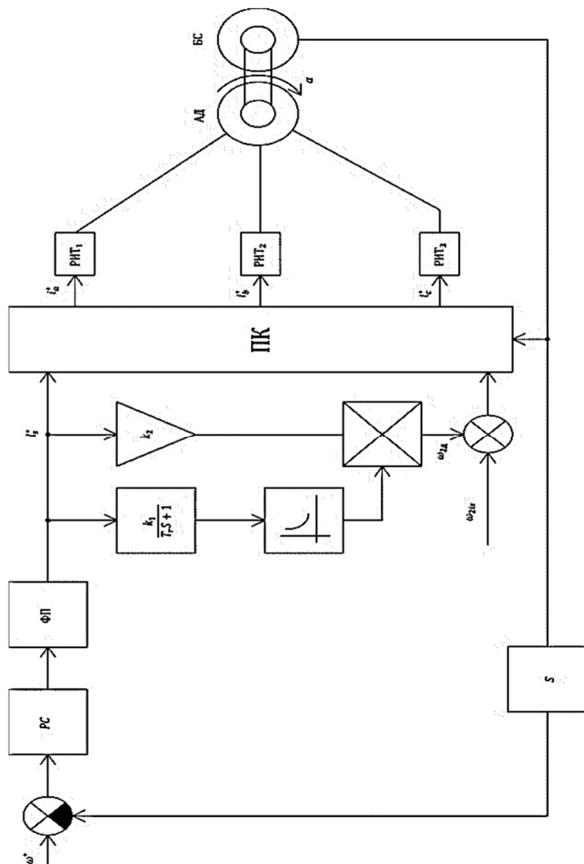


Рис. 3. Функциональная схема электропривода с частотно-токовым управлением с  $\alpha_{i\psi} = const$

Угол  $\varphi$  остается неизменным вследствие реализации динамической составляющей  $\omega_{2d}$  в функции тока обмотки статора и потокосцепления обмотки ротора. Тангенс угла  $\varphi$  обозначим постоянной  $k$ . Из векторной диаграммы при  $k = const$  см. (рис. 1) потокосцепление определяется из соотношения:

$$\psi_r(s) = I_{s(s)} \cdot \frac{1}{\sqrt{1+k^2}} \cdot \frac{1}{T_r s + 1}. \quad (8)$$

Функциональная схема электропривода приведена на рис. 3.

В структуре электропривода используются следующие элементы:

регулируемые источники тока РИТа, РИТв, РИТс – в фазах a, b, c;

ПК – преобразователь координат, на входы которого подаются сигналы заданного модуля вектора тока статора, динамическая и статическая составляющие скольжения и угол поворота вала двигателя [5];

БС – бесконтактный сельсин.

Реализация аналогичного ПК приведена в [6]. Недостатком такого варианта электропривода является параметрическая настройка динамической составляющей скольжения в связи с отсутствием информации о  $\vec{\psi}_r$ .

Этого недостатка лишён вариант электропривода, приведённый на рис. 4.

Для измерения  $\vec{\psi}_r$  используют датчики Холла. В блоке ДП осуществляется расчёт проекций вектора  $\vec{\psi}_r$  на оси системы координат 0,1,2, связанной с вектором тока статора. В функциональном преобразователе ФП2 осуществляется определение  $tg\varphi$  по составляющим  $\psi_{r1}$  и  $\psi_{r2}$ . Это значение сравнивается с заданным значением  $tg\varphi^*$  и разность обрабатывается с помощью регулирования динамической составляющей  $\omega_{2d}$  с использованием регулятора  $P_{СК}$ .

Структурная схема асинхронного двигателя, реализованная в системе координат 0,1,2, функциональные схемы электропривода с частотно-токовым управлением с  $\alpha_{i\psi} = const$  и с управлением по вектору тока статора  $\alpha_{i\psi} = const$  были апробированы и реализованы в среде MATLAB [7, 8]. С помощью математического моделирования была показана адекватность данных математических моделей и схем.



Информация об авторах

**Аникин Сергей Викторович** – младший научный сотрудник, 34 ОНИ НИЦ (ППО и УА 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, 54 "А"), e-mail: anikin72@mail.ru

**Бурковский Виктор Леонидович** – д-р техн. наук, профессор кафедры электропривода, автоматики и управления в технических системах, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: bvl@vorstu.ru, тел. 8(473)243-77-20

**Муконин Александр Константинович** – канд. техн. наук, доцент кафедры электропривода, автоматики и управления в технических системах, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: mukonin\_ak@mail.ru, тел. 8(473)243-77-20

**Тонн Дмитрий Александрович** – канд. техн. наук, доцент кафедры электропривода, автоматики и управления в технических системах, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: tonnda@mail.ru, тел. 8(473)243-77-20

**Трубейской Виктор Александрович** – канд. техн. наук, доцент кафедры электропривода, автоматики и управления в технических системах, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: viktortrubetsckoi@yandex.ru, тел. 8(473)243-77-20

METHOD OF VECTOR PRIVATE CONTROL OF ASYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE

S.V. Anikin<sup>1</sup>, V.L. Burkovskiy<sup>2</sup>, A.K. Mukonin<sup>2</sup>, D.A. Tonn<sup>2</sup>, V.A. Trubetskoj<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 analyzes the problems of vector frequency control of asynchronous electric drive, widely used as an executive element in the framework of modern means of constructing processing complexes developed in the machine-building industry. Here we propose a variant of a frequency-controlled asynchronous electric drive, in which the polar coordinates of the current vector in the stator winding are the controlled quantities. In this variant, the control law is applied, according to which the angle between the current vectors in the stator winding and the flow coupling of the rotor winding does not change. The control of the speed of rotation of the electric drive and the electromagnetic torque is realized by setting the current module of the stator winding. At the same time, the formation of the angle of rotation of the current vector of the stator winding, depending on the modulus of the magnitude of the flow coupling of the rotor coil and the sliding value of the asynchronous motor, makes it possible to keep the angle between the current vectors of the stator winding and the flow coupling of the rotor winding constant, which in turn implements the directional formation of transients in the asynchronous motor. The considered variant of a frequency-controlled asynchronous electric drive can be used in production mechanisms in which speed is not a determining criterion for the operation of the drive, but smooth regulation of the electromagnetic torque and the possibility of its limitation in all operating modes is important. This control method is characterized by the fact that the electromagnetic moment is determined exclusively by the current module of the stator winding, and the slip control circuit is used to implement the law of maintaining the constancy of the angle between the current of the stator winding by the flow coupling of the rotor winding

**Key words:** electric drive executive, processing complex, asynchronous electric drive, asynchronous motor, control, current vector of the stator winding, flow coupling of the rotor winding, control law

References

1. Kurnyshev B.S. “Vector orientation of asynchronous motor variables without information about flux linkages”, *Bulletin of Ivanovo State Power Engineering University (Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta)*, 2013, no. 1, pp. 51-55.
2. Dubov A.A. Trubetskoj V.A. Tonn D.A. “Analysis of the parameters of asynchronous electric drives with controlled coordinates of the stator vector”, *Proc. of All Russia Student Scientific Technical Conf.: Applied Problems of Electromechanics, Power Engineering, Electronics (tr. Vseros. stud. nauch.-tehn. conf.: Prikladnye zadachi elektromekhaniki, energetiki, elektroniki)*, Voronezh, 2019, pp. 90-93.
3. Trubetskoj V.A., Mukonin A.K., Tonn D.A., Khort V.R. “Asynchronous frequency-controlled electric drive for industrial work”, *Proc. of Int. Scientific Technical Conf.: New Technologies in Scientific Research, Design, Management, Production (tr. Mezhdunar. nauch.-tehn. conf.: Novye tekhnologii v nauchnykh issledovaniyakh, proyektirovanii, upravlenii, proizvodstve)*, Voronezh, 2019, pp. 317-320.
4. Chernousov V.I., Trubetskoj V. A., Mukonin A.K., Sazonova T.A., Tonn D.A. “Asynchronous frequency-current electric drive of special purpose”, *Proc. of II of the Int. Scientific and Practical Conf.: Alternative and Intellectual Energy (Al'ternativnaya i intellektual'naya energetika: tr. II Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.)*, Voronezh, 2020, pp. 30-31.
5. Trubetskoj V.A., Efremov D.A., Shcheblykina N.I. “Frequency-regulating asynchronous electric drive for industrial work”, *Proc. of Scientific and Technical Conf.: Automation and Robotization of Technological Processes (tr. nauch.-tehn. conf.:*

*Avtomatizatsiya i robotizatsiya tekhnologicheskikh protsessov*), Voronezh, 2001, pp. 10-13.

6. Firago B.I., Vasil'ev D.S. "On the question of vector control of asynchronous motors", *Energetika. News of Higher Educational Institutions and Energy Associations of the CIS (Energetika. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy i energeticheskikh ob"edineniy SNG)*, 2015, no. 5, pp. 5-16.

7. Dadenkov D.A., Solodkiy E.M., Shachkov A.M. "Modeling of the vector control system of an asynchronous motor in the MATLAB/SIMULINK package", *Bulletin of Perm National Research Polytechnic University (Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta)*, 2014, no. 11, pp. 117-128.

8. Denisov V.A., Tret'yakova M.N., Borodin O.A. "Mathematical modeling of asynchronous electric drives with vector control", *Electrical and Information Complexes and Systems (Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy)*, 2016, vol. 12, no. 1, pp. 5-12.

Submitted 01.09.2021; revised 19.10.2021

#### Information about the authors

**Sergey V. Anikin**, Junior Researcher of the 34th Research Institute of the SIC (PPO and UA of the Air Force) Military Scientific Educational Center of Military-Air Forces "N.E. Zhukovsky and Ju.A. Gagarin Military-Air Academy" (54A Starykh Bolshevikov str., Voronezh 394064, Russia), e-mail: anikin72@mail.ru

**Viktor L. Burkovskiy**, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str, Voronezh 394006, Russia), e-mail: bvl@vorstu.ru, tel. 8(473)243-77-20

**Aleksandr K. Mukonin**, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str, Voronezh 394006, Russia), e-mail: mukonin\_ak@mail.ru, tel. 8(473)243-77-20

**Dmitriy A. Tonn**, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str, Voronezh 394006, Russia), e-mail: tonnda@mail.ru, tel. 8(473)243-77-20

**Victor A. Trubetskoy**, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str, Voronezh 394006, Russia), e-mail: viktortrubetskoi@yandex.ru, tel. 8(473)243-77-20

## ТЕЧЕНИЕ РАБОЧИХ СРЕД ЧЕРЕЗ КАНАЛЫ В КОРПУСЕ ЭЛЕКТРОДА-ИНСТРУМЕНТА

В.П. Смоленцев, Н.С. Поташникова, И.Г. Стародубцев

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** рассмотрен механизм течения жидких и газожидкостных рабочих сред через профильный инструмент для комбинированных методов обработки. Приведены типовые детали, для которых применимы электроды-инструменты с регулируемой подачей рабочей среды в зону обработки, обеспечивающей массовыйнос продуктов обработки из межэлектродного зазора. За счет применения аддитивных технологий решена проблема изготовления инструмента с внутренними каналами расчетного переменного сечения, обеспечивающими стабильную подачу жидкой (газожидкостной) среды и массовыйнос продуктов обработки. Предложены новые (на уровне изобретений) способ и электрод-инструмент с управляемой подачей по внутренним каналам рабочей среды, параметры которой рассчитаны с учетом специфики чистовой электроабразивной обработки по схеме копирования профиля детали. Расчетные зависимости для описания механизма течения рабочих сред и методы их использования позволили проектировать электроды-инструменты с профильными каналами, обеспечивающими применение технологических режимов для чистовой обработки инструментом с регулируемой подачей сред и выполнением критерия массовыноса продуктов обработки. Приведенные результаты расчета параметров течения рабочих сред через каналы в инструменте позволили расширить область эффективного использования аддитивных технологий и создать новые (на уровне изобретений) инструменты для электроабразивной обработки по методу копирования и высокопроизводительного одновременного профилирования нескольких поверхностей. Доказана возможность использования энергетической модели для расчета потенциальной составляющей энергии от реализации мощности, затрачиваемой на подкачку рабочей среды, и кинетической энергии от вращения инструмента для получения в зоне обработки требуемой скорости течения жидких (газожидкостных) сред

**Ключевые слова:** рабочая среда, течение, каналы, электрод, аддитивные технологии, расчет, электроабразивная обработка

### Введение

С повышением точности изготовления деталей возрастают требования к стабилизации подачи жидких и газожидкостных сред в рабочую зону при комбинированных методах обработки. Для регулирования подачи рабочих сред требуется создать в электроде-инструменте закрытые каналы, часть которых выполняется в форме гладких отверстий, другие приходится формировать из стандартных профилей типа трубок и другими методами. В случае изготовления электроабразивных кругов требуется рассчитать и с использованием аддитивных технологий выполнять в корпусе электрода сложнопрофильные каналы переменного сечения. В статье приведена методология расчета гидродинамических параметров и элементов конструкции электрода-инструмента, изготовленного по запатентованному способу.

### Типовые объекты обработки электродами с управляемой подачей рабочей среды

Для прошивания отверстий в металлических заготовках преимущественно используют трубчатые электроды-инструменты, в которых каналами служат центральные отверстия, а регулирование расхода сред возможно за счет изменения давления на входе жидкости в отверстие. В большинстве случаев в качестве заготовок применяют стандартные трубки из меди или латуни, в которых наружный диаметр механически уточняют с учетом размеров отверстий в заготовках детали и боковых межэлектродных зазоров. Такие трубки имеют отверстия от нескольких десятков микрон [1] до десятков миллиметров. Они используются для электроэрозионной, электрохимической и комбинированной эрозионно-химической обработки, в том числе с механическими постоянными и импульсными воздействиями различной частоты. Объектами комбинированной обработки преимущественно являются детали из труднообрабатываемых материалов с отверстиями малого сечения с различным расположением и профилем отверстий. К ним относятся форсунки для подачи компонентов топлива и других сред (рис. 1).



а)



б)



в)

Рис. 1. Форсунки для подачи топлива ракетных двигателей

- а) из нержавеющей стали с радиальными отверстиями;
- б) из жаропрочного сплава с тангенциальными каналами;
- в) из бронзы с переменным сечением по длине каналов (разрез и общий вид детали)

В форсунке на рис. 1,а отверстия выполняются эрозионно-химическим методом, в том числе с воздействием ультразвуковых продольных колебаний электрода-инструмента или детали. При этом требуется достичь высокой точности не только для отверстий, но и их расположения, что должно обеспечивать при проливке форсунок получение требуемых гидравлических характеристик. Здесь отверстия имеют круглое сечение, что позволяет в качестве инструмента применять стандартные медные и латунные трубки с подгонкой наружного диаметра под размер в детали. Аналогично возможно изготовить и рассчитать гидродинами-

ческие параметры для электродов при прошивке тангенциальных каналов (рис. 1,б), где следует учитывать поворот потока на входе инструмента в заготовку. Более сложно (даже при использовании комбинированной обработки) выполнить каналы (рис. 1,в) с переменным профилем, сечение которых близко к форме сопла Лавала. Их рассчитывают с учетом параметров течения рабочей среды, схемы комбинированной обработки и технологических режимов, рекомендованных в [2] для применяемого материала детали. Здесь для инструмента могут использоваться аддитивные технологии [3], с помощью которых можно создать в электроде каналы нужных сечений и обеспечить оптимальный гидравлический режим подачи рабочей среды при любом комбинированном процессе изготовления каналов в инструменте [4]. По [3] аддитивная обработка может снижать прочностные характеристики и показатели шероховатости материалов, но применительно к электродам-инструментам такие факторы могут не учитываться.

Трубчатые электроды-инструменты находят применение в авиакосмической отрасли машиностроения при изготовлении межлопаточных каналов и охлаждающих систем двигателей. На рис. 2 показаны охлаждаемые лопатки авиационных двигателей с каналами различного сечения.



а)



б)

Рис. 2. Охлаждаемые лопатки авиационных двигателей  
а) центральный канал в турбинной лопатке;  
б) система отверстий малого сечения в сопловой лопатке

Если профиль сечения канала (рис. 2,а) имеет некруглое сечение, то пустотелый электрод выполняют либо путем обжатия медной или латунной трубки с длиной наружного диаметра, равной периметру отверстия, или гибкой из листа. Здесь соединение концов в сечении не обязательно, т.к. потери рабочей среды при прошивке не могут оказать существенного влияния на результаты расчета параметров течения и геометрию каналов инструмента.

Для изготовления многоэлектродных инструментов при групповой прошивке отверстий (рис. 2,б), расположенных с минимальной перемычкой, целесообразно использовать аддитивные технологии для изготовления их рабочей части. Такой способ позволяет рассчитать профиль каналов с учетом их кривизны, особенно на кромках с переменным радиусом сопряжения поверхностей.

В двигателях и гидравлических системах летательных аппаратов широко используются вибростойкие цельные фильтры со стенками толщиной до 2-3 мм, где отверстия могут выполняться комбинированными методами групповой обработкой цельными электродами с системой подачи рабочей среды через внутренние каналы [1] (рис. 3).



Рис. 3. Цельный фильтр для тонкой очистки топлив ракетных двигателей

Попытки выполнить инструмент для групповой прошивки фильтров (рис. 3) путем сборки из трубок или пайки из фрагментов оказались чрезмерно трудоемкими. Проведенные исследования показали перспективность применения для таких деталей электродов, полученных по аддитивной технологии, что позволяет сделать отверстия многогранными, за счет чего увеличить плотность их размещения, фильтрующую способность и при одинаковой пропускной способности снизить массу изделия.

### Механизм массовыноса продуктов обработки при использовании электродов с каналами

Показанные выше и аналогичные изделия изготавливаются с использованием комбинированных методов обработки [4;5;6] электродами-инструментами с внутренними каналами для подачи рабочей среды, где удаление продуктов обработки путем массовыноса [4] определяет производительность, себестоимость операций, технологические показатели процесса. Такие операции становятся все более востребованы при чистовой обработке полузакрытых каналов с использованием электроабразивного инструмента [7] при неуправляемой подаче жидкости поливом. Для повышения технологических показателей комбинированной обработки требуется создать систему управляемой подачи рабочей среды и конструкции новых инструментов [8] для интенсивного выполнения чистовых операций.

Критерием массовыноса является представленное в [4] неравенство

$$\frac{dm_1}{d\tau} \geq \frac{dm_2}{d\tau}, \quad (1)$$

где  $m_1$  - масса продуктов обработки (газообразных, коллоидных, твердых), которая может быть удалена из зоны обработки потоком жидкой (газожидкостной) среды из межэлектродного зазора за время  $\tau$ ;  $m_2$  - масса продуктов обработки, образующихся за время  $\tau$  в зоне удаления припуска.

При использовании инструмента с профильными каналами для подвода рабочей среды справедливость критерия массовыноса оценивают параметрами течения среды, обычно путем регулирования ее расхода и управлением давлением на входе потока в зону обработки, в том числе для пульсирующего течения [5].

Известны [6] попытки подачи рабочих сред через корпус пористых абразивных кругов, но в этом случае не удалось обеспечить стабильную подачу среды через поры, которые располагаются произвольно по радиусу инструмента и не дают возможности управлять процессом массовыноса при электроабразивной обработке [7]. Проведенные исследования [3] в области использования аддитивных технологий открыли возможность создания нового вида инструмента [8] с каналами, обеспечивающими массовынос и стабильность процесса, возможность одновременной чистовой обработки не-

скольких смежных поверхностей в случае сложнопрофильных каналов в детали с ограниченным доступом инструмента в зону удаления припуска.

### Влияние параметров течения рабочей среды на качество поверхности обрабатываемого участка детали

При комбинированной обработке с механическим и химическим воздействием [3; 4; 7] нарушение течения рабочей среды может вызвать ухудшение качества поверхностного слоя и образование местных дефектов, вызывающих брак деталей (рис. 4).



Рис. 4. Выступы и впадины на образце из сплава ВД17 после эрозионно-химической обработки

За счет местного торможения потока рабочей среды в месте закрепления образца в зажиме сьем материала стал нестабильным, что вызвало образование местных погрешностей величиной до 0,5 мм (рис. 4). Это следует рассматривать как недопустимую макропогрешность, поэтому требуется перерасчет параметров электрода, корректировка режимов обработки и формы каналов в инструменте.

### Методология проектирования каналов для подачи газожидкостных сред

В процессе комбинированной обработки происходит местный нагрев локальной зоны действия импульсов с большим подводом тепла, вызывающим переход в газообразное состояние части рабочей среды [2; 4]. В случае наличия анодной составляющей процесса комбинированной обработки происходят химические реакции, вызывающие поступление в рабочую среду газообразных продуктов (кислорода, водорода, хлора, воздуха и его компонентов), которые могут составлять по [9] до 10-12% по объему. Это следует учитывать при расчете геометрии каналов в инструменте и рассматривать поток как газожидкостную среду, где применимы закономерности газовой динамики

[10]. Целью расчетов по предлагаемой методологии является получение в зоне обработки электроабразивным методом скорости течения рабочей среды в диапазоне 25-30 м/с [7] путем формирования требуемой геометрии каналов и параметров течения рабочей среды через корпус инструмента, изготовленный с использованием аддитивных технологий.

По [10] для расчета геометрии каналов с продольным сечением, близким к форме сопла Лавалья, можно использовать энергетическую модель, приведенную в [11] и используемую по законам подобия в технических системах [12]. Тогда повод потенциальной энергии на входе в канал может оцениваться как подпор среды перед входом в инструмент, создаваемый насосом подкачки с мощностью  $N_p$ .

Расчет давления, создаваемого насосом на входе в канал ( $P_{вх}$ ), с учетом тепловых явлений в рабочей среде в [10] предлагается проводить путем использования в расчетных зависимостях безразмерных показателей температуры торможения в потоке ( $\theta$ ) и на входе в канал ( $\theta_{вх}$ ).

$$P_{в} = P_n \frac{\left(1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda^2\right)^{\frac{1}{k-1}} \lambda}{\left(1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda^2\right)^{\frac{1}{k-1}} \lambda_{вх}}, \quad (2)$$

где  $P_n$  - давление на периферии по длине канала;  $k$  - соотношение теплоемкостей при постоянном давлении ( $C_p$ ) и постоянном давлении ( $C_v$ ) в канале ( $k = \frac{C_p}{C_v}$ );  $\lambda$  - состояние среды в критическом сечении канала (приведенная скорость).  $\lambda = \frac{W_2}{W_{кр}}$ , где  $W_{кр}$  - скорость среды в критическом сечении канала;  $\lambda_{вх}$  - приведенная скорость потока ( $W_1$ ) на входе в канал.

Кинетическая энергия создается за счет центробежных сил от вращения электроабразивного круга с требуемой окружной скоростью на периферии инструмента. Приращение кинетической энергии ( $E_k$ ) для ускорения потока за счет центробежных сил можно оценить по формуле (3) [10]:

$$dE_k = \frac{W_2^2 - W_1^2}{2} dG, \quad (3)$$

где  $W_2$ ,  $W_1$  - скорость потока на периферии инструмента и на входе в канал;  $G$  - расход рабочей среды.

Для обеспечения на выходе из канала с профилем сопла Лавалья требуемой скорости

потока необходимо рассчитать площадь его сечения на периферии инструмента ( $F_1$ ). По [10]

$$F_1 = F_{kp} \frac{1}{\lambda} \left[ \frac{\frac{2}{k+1}}{1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda^2} \right]^{\frac{1}{k-1}}, \quad (4)$$

где  $F_{kp}$  – площадь критического сечения канала в форме сопла Лавала.

Скорость течения  $W_2$  можно найти по расходу  $G_{kp}$  рабочей среды, протекающей через критическое сечение канала при давлении  $P_{kp}$

$$G_{kp} = P_{kp} W_{kp} F_{kp} \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{2(k-1)}}. \quad (5)$$

Расход среды ( $G$ ) на выходе из канала можно определить через  $G_{kp}$  по методу подобия [12] с использованием графика на рис. 5 [10], где  $P_o$  - давление на выходе из канала (давление окружающей среды).

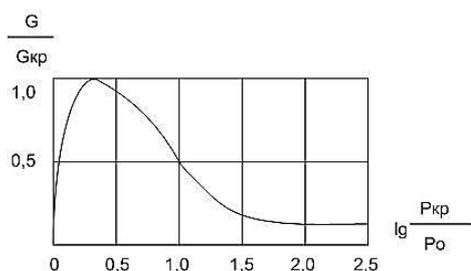


Рис. 5. К расчету расхода рабочей среды ( $G$ )

По величине расхода рабочей среды и площади сечения можно установить скорость потока на периферии канала.

### Проектирование каналов в инструменте при течении через него жидкости

При использовании гидравлической системы с промежуточным баком для слива отработавшей рабочей среды при достаточном его объеме газовая составляющая может стать пренебрежимо малой. Тогда расчет параметров течения и геометрии каналов необходимо выполнять с учетом свойств только жидкости. Для каналов диаметром  $d$  средняя скорость течения жидкости  $W_{cp}$  по [10] составит

$$W_{cp} = \frac{64\mu}{\rho\zeta d}, \quad (6)$$

где  $\mu$  - коэффициент динамической вязкости жидкости (рабочей среды);  $\rho$  - плотность;  $\zeta$  – коэффициент сопротивления течению жидкости в канале.

Коэффициент сопротивления ( $\zeta$ ) может быть определен из справочных материалов или через касательные напряжения на стенках канала ( $\tau_w$ ) [10]

$$\zeta = \frac{8\tau_w}{\rho * W_{cp}^2}. \quad (7)$$

Зависимости (6), (7) дают возможность по известной величине  $\zeta$  найти  $W_{cp}$  для диаметра  $d$  круглого канала в инструменте. Используя метод подобия [12], величину  $\zeta$  можно приближенно найти по графику на рис. 6 [10] через число Рейнольдса ( $Re = \frac{\rho W_{cp} d}{\mu}$ ).

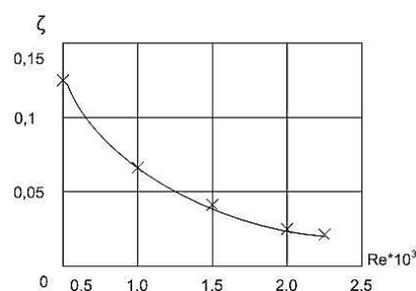


Рис. 6. Величина коэффициента сопротивления от  $Re$

Для ламинарного потока в канале (даже переменного сечения) при использовании рис. 6 можно назначать граничное значение  $Re = 2300$ .

Аналогичные расчеты по представленной методике могут быть выполнены для каналов некруглого сечения при замене в расчетных зависимостях диаметра круглого сечения на гидравлический диаметр (отношение учетверенной площади сечения к периметру сечения канала). По нему с использованием графиков типа приведенного на рис. 6 устанавливают коэффициент сопротивления и рассчитывают скорость потока жидкости в канале.

### Применение аддитивных технологий для изготовления каналов в электродах

Приведенные закономерности по массовыносу и расчету течения рабочих сред по каналам в электроде позволили проектировать инструменты для комбинированной чистовой обработки, в том числе малоизносные электроабразивные круги нового типа по патенту [8], для изготовления которых применяются аддитивные технологии [3]. На рис. 7 приведен процесс изготовления инструмента с каналами переменного сечения, обеспечивающими подачу в рабочую зону жидкой и газожидкостной среды с возможностью обеспечения массовыноса

за счет управления параметрами течения сред в межэлектродном зазоре.

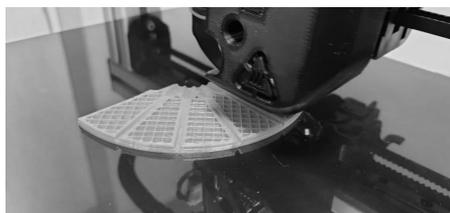


Рис. 7. Изготовление корпуса электрода для электроабразивной обработки с радиальными каналами переменного сечения

### Заключение

1. Расчетные зависимости для описания механизма течения рабочих сред и методы их использования, приведенные в статье, позволили проектировать электроды-инструменты с профильными каналами, обеспечивающими применение технологических режимов для чистой обработки инструментом с регулируемой подачей сред и выполнением критерия массовыноса продуктов обработки.

2. Приведенные результаты расчета параметров течения рабочих сред через каналы в инструменте позволили расширить область эффективного использования аддитивных технологий и создать новые (на уровне изобретений) инструменты для электроабразивной обработки по методу копирования и высокопроизводительного одновременного профилирования нескольких поверхностей.

3. Доказана возможность использования энергетической модели для расчета потенциальной составляющей энергии от реализации мощности, затрачиваемой на подкачку рабочей среды, и кинетической энергии от вращения инструмента для получения в зоне обработки

требуемой скорости течения жидких (газожидкостных) сред.

### Литература

1. Бойко А.Ф. Эффективная технология и оборудование для электроэрозионной прошивки прецизионных микроотверстий. Белгород: Изд-во БГТУ, 2010. 314 с.
2. Смоленцев Е.В. Проектирование электрических и комбинированных методов обработки. М.: Машиностроение, 2005. 511 с.
3. Поташникова Н.С., Смоленцев В.П., Поташников М.Г. Аддитивная технология создания инструмента для электроабразивной обработки // Упрочняющие технологии и покрытия. 2021. Т. 17. № 3 (195). С. 138 – 144.
4. Теория электрических и физико-химических методов обработки. В 2 ч. Ч. I: Обработка материалов с применением инструмента: учеб. пособие / В.П. Смоленцев, А.И. Болдырев, Е.В. Смоленцев и др. Воронеж: ВГТУ, 2008. 208 с.
5. Газизуллин К.М. Электрохимическая размерная обработка крупногабаритных деталей в пульсирующих рабочих средах. Воронеж: Воронежский государственный университет, 2002. 243 с.
6. Справочник технолога /под ред. А.Г. Сулова. М.: «Инновационное машиностроение», 2019. 800 с.
7. Комбинированная электроалмазная обработка инструментальных сталей / А.С. Янушкин, В.Ю. Попов, Е.В. Васильев, А.Ю. Попов. Братск: БрГУ, 2009. 228 с.
8. Пат. №2740682 РФ. Способ электроабразивной обработки и металлоабразивный инструмент для осуществления способа / В.П. Смоленцев, Н.С. Поташникова, Е.В. Паничев, С.С. Юхневич, заявитель и патентообладатель ВГТУ. Заявка 2020109285 от 2.03.2020. Опубл. 19.01.2021. Бюл. № 2.
9. Либов Л.Я., Влазнев Е.И., Сомонов В.И. Установки подачи электролита при электрохимической обработке. М.: Машиностроение, 1981. 120 с.
10. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика. М.: Изд-во «Наука», 1976. 886 с.
11. Энергетическая модель формирования вибрационных механохимических покрытий / А.П. Бабичев, В.А. Лебедев, В.В. Иванов, Г.А. Проконей // Упрочняющие технологии и покрытия. 2011. № 5. С. 6-12.
12. Безъязычный В.Ф. Метод подобия в технологии машиностроения. М.: Машиностроение, 2012. 320 с.

Поступила 03.09.2021; принята к публикации 19.10.2021

### Информация об авторах

**Смоленцев Владислав Павлович** - д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры технологии машиностроения, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 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, 84), e-mail: natser\_01@mail.ru

**Стародубцев Игорь Геннадиевич** - аспирант кафедры технологии машиностроения, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: VMZ056@yandex.ru

## FLOW OF WORKING MEDIA THROUGH THE CHANNELS IN THE BODY OF THE ELECTRODE-TOOL

V.P. Smolentsev, N.S. Potashnikova, I.G. Starodubtsev

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

**Abstract:** we considered the mechanism of flow of liquid and gas-liquid working media through a profile tool for combined processing methods. We present typical parts for which electrodes-tools are applicable with an adjustable supply of the working medium to the processing zone, which ensures the mass removal of processing products from the interelectrode gap. Through the use of additive technologies, we solved the problem of making a tool with internal channels of a calculated variable cross-section, providing a stable supply of a liquid (gas-liquid) medium and mass removal of processing products. We propose a new (at the level of inventions) method and electrode-tool with a controlled feed through the internal channels of the working medium, the parameters of which are calculated taking into account the specifics of finishing electro-abrasive machining according to the pattern of copying the profile of the part. Calculated dependencies for describing the mechanism of flow of working media and methods of their use made it possible to design electrodes-tools with profile channels that ensure the use of technological modes for finishing with a tool with controlled supply of media and fulfillment of the criterion of mass removal of processing products. The presented results of calculating the parameters of the flow of working media through channels in the tool made it possible to expand the area of effective use of additive technologies and create new (at the level of inventions) tools for electro-abrasive processing using the copying method and high-performance simultaneous profiling of several surfaces. The possibility of using the energy model for calculating the potential component of energy from the implementation of the power spent on pumping the working medium and the kinetic energy from the rotation of the tool has been proved to obtain the required flow rate of liquid (gas-liquid) media in the processing zone

**Key words:** working medium, current, channels, electrode, additive technologies, calculation, electroabrasive processing

### References

1. Boyko A.D. "Effective technology and equipment for electroerosive firmware of precision micro-holes" ("Effektivnaya tekhnologiya i oborudovaniye dlya elektroerozionnoy proshivki pretsizionnykh mikrootverstiy"), Belgorod: BSTU, 2010, 314 p.
2. Smolentsev E.V. "Design of electric and combined processing methods" ("Proektirovanie elektricheskikh i kombinirovannykh metodov obrabotki"), Moscow: Mashinostroenie, 2005, 511 p.
3. Potashnikova N.S., Smolentsev V.P., Potashnikov M.G. "Additive technology for creating tools for electroabrasive processing", *Strengthening Technologies and Coatings (Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya)*, 2021, vol. 17, no. 3 (195), pp. 138-144
4. Smolentsev V.P., Boldyrev A.I., Smolentsev E.V. et al. "Theory of electrical and physico-chemical processing methods" ("Teoriya elektricheskikh i fiziko-khimicheskikh metodov obrabotki"), textbook, V. P. Smolentsev, Voronezh: VSTU, 2008, 208 p.
5. Gazizullin K.M. "Electrochemical dimensional processing of large-sized parts in pulsating working media" ("Elektrokhimicheskaya razmernaya obrabotka krupnogabaritnykh detaley v pul'siruyushchikh rabochikh sredakh"), Voronezh State University, 2002, 243 p.
6. Suslov A.G. ed. "Technologist's reference book" ("Spravochnik tekhnologa"), Moscow: Innovative mechanical engineering, 2019, 800 p.
7. Yanushkin A.S., Popov V.Yu., Vasil'ev E.V., Popov A.Yu. "Combined electro-diamond processing of tool steels" ("Kombinirovannaya elektroalmaznaya obrabotka instrumental'nykh staley"), Bratsk: BrSU, 2009, 228 p.
8. Smolentsev V.P., Potashnikova N.S., Panichev E.V., Yukhevich S.S. "A method of electroabrasive processing and a metalabrasive tool for implementing the method" ("Sposob elektroabrazivnoy obrabotki i metalloabrazivnyy instrument dlya osushchestvleniya sposoba"), patent no. 2740682 of the Russian Federation, VSTU, 2.03.20., pub. 19. 0121, bull. no. 2.
9. Libov L.Ya., Vlaznev E.I., Somonov V.I. "Electrolyte supply installations for electrochemical processing" ("Ustanovki podachi elektrolita pri elektrokhimicheskoy obrabotke"), Moscow: Mashinostroenie, 1981, 120 p.
10. Abramovich G.N. "Applied gas dynamics" ("Prikladnaya gazovaya dinamika"), Moscow: Nauka, 1976, 886 p.
11. Babichev A.P., Lebedev V.A., Ivanov V.V., Prokokey G.A. "Energy model of the formation of vibrational mechanochemical coatings", *Strengthening Technologies and Coatings (Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya)*, 2011, no. 5, pp. 6-12.
12. Bez'yazychnyy V.F. "Similarity method in mechanical engineering technology" ("Metod podobiya v tekhnologii mashinostroyeniya"), Moscow: Mashinostroenie, 2012, 320 p.

Submitted 03.09.2021; revised 19.10.2021

### Information about the authors

**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

**Igor' G. Starodubtsev**, graduate student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: VMZ056@yandex.ru

## АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ МИКРОРЕЛЬЕФА, ОБРАЗУЮЩЕГОСЯ В РЕЗУЛЬТАТЕ БЕСЦЕНТРОВОГО ШЛИФОВАНИЯ ПОЛНОЙ СФЕРЫ

О.П. Решетникова, Б.М. Изнаиров, А.Н. Васин, Н.В. Белоусова, Г.А. Семочкин

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.,  
г. Саратов, Россия

**Аннотация:** при технологической подготовке операций чистовой и отделочной обработки деталей абразивными инструментами очень важными задачами являются прогнозирование ее результатов в зависимости от назначенных режимов и назначение режимов в зависимости от требуемого качества обработанных поверхностей. Имеющиеся многочисленные справочные материалы такого характера получены в лабораторных условиях, носят дискретный характер, не учитывают специфическую топографию поверхностей абразивных инструментов и множества других условий и поэтому недостаточно достоверны. На их основе возможно планировать технологический процесс только предварительно, а затем неизбежно требуется уточнять его параметры экспериментальным путем, что приводит к значительному удорожанию процесса подготовки производства. Наличие достоверной аналитической методики позволяеткратно снизить эти затраты, и поэтому она настоятельно необходима не только и даже не столько при выполнении научных исследований, сколько в реальном производстве. В статье аналитически определены параметры микрорельефа, образующегося в результате бесцентрового шлифования полной сферы. Уточнено влияние процесса выхаживания на формирование шероховатости сферы. Приведена методика расчета среднеарифметического отклонения микропрофиля сферической поверхности

**Ключевые слова:** полые шарики, микрорельеф, бесцентровое шлифование, сфера, режимы обработки, степень влияния

**Благодарности:** статья подготовлена при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых - кандидатов наук № МК-2395.2020.8

### Введение

В условиях серийного производства подшипников и шарико-винтовых передач изготовление шариков высокой точности – задача сложная и достаточно трудоемкая. На современных предприятиях подшипникового производства для производства шариков применяют специальное оборудование и сложные трудозатратные технологии, чаще всего использующиеся в массовом производстве [1, 2].

При необходимости обработки деталей с высокой точностью на шлифовальных операциях очень важной задачей является прогнозирование получаемого результата еще на этапе технологической подготовки производства в зависимости от назначенных режимов, а также назначение режимов обработки в зависимости от требуемого качества обработанных поверхностей. В имеющихся справочных материалах, таких как [3, 4, 5], такие зависимости получены экспериментальным путем и имеют дискретный характер, не учитывают специ-

ческую топографию поверхностей абразивных инструментов и множества других условий и поэтому недостаточно достоверны. На их основе возможно планировать технологический процесс только предварительно, а затем неизбежно требуется уточнять его параметры экспериментальным путем, что приводит к значительному удорожанию процесса подготовки производства. Наличие достоверной аналитической методики позволяеткратно снизить эти затраты, и она необходима не только и даже не столько при выполнении научных исследований, сколько в реальном производстве.

Аналитические методики определения параметров микрорельефа поверхностей, обработанных различными методами абразивной обработки, известны достаточно давно [6, 7]. Достоверность результатов, полученных с их использованием, многократно экспериментально проверена и не вызывает сомнений.

В серийном производстве наиболее эффективным методом обработки шариков являются методы бесцентрового шлифования [8, 9, 10].

Процесс образования микрорельефа при бесцентровом шлифовании сферических дета-

лей, в отличие от круглого и плоского шлифования, очень специфичен. Основные его отличия заключаются в следующем:

- снимаемый за один рабочий ход слой материала в сечении имеет форму кругового сегмента и изменяется по толщине от нуля до значения глубины резания;

- процесс формирования микрорельефа носит ярко выраженный стохастический характер, т.к., во-первых, между подвижными рабочими органами станка и сферической заготовкой нет кинематических связей, и закон ее движения в зоне обработки имеет случайный характер, а, во-вторых, параметры рабочих поверхностей абразивных кругов, определенным образом переносящиеся на обработанную поверхность, являются случайными функциями;

- в отличие от плоского и круглого центрового шлифования, в результате которых в различных сечениях обработанной поверхности шероховатость имеет разные по величине параметры, в результате бесцентрового шлифования сферы во всех ее сечениях параметры шероховатости одинаковые.

### Определение микрорельефа сферической поверхности при бесцентровом шлифовании

Особенность процесса образования формы и микрорельефа сферической поверхности заключается в том, что обработанная поверхность представляет собой суперпозицию (рис. 1), условно говоря, кольцевых лысок, образующихся при срезании слоя материала шлифовальным кругом с прямолинейной образующей (см. рис. 2). Из всей ширины лыски  $AB$  только отрезок  $ab$  участвует в формировании сферы. Остальная часть срезаемого слоя удаляется в стружку. Номинально, при отсутствии у обрабатываемого материала свойства упругости и при нулевом радиусе заострения вершин абразивных зерен участок  $ab$  вырождается в точку. При таких обстоятельствах потребовалось бы бесконечно большое число рабочих ходов шлифовального круга, чтобы сформировать математически точную сферу. Но в реальности участок  $ab$  не равен нулю, т.к. имеет место упругий отскок обрабатываемой поверхности, и на ней возникает обработанная ленточка, образующей которой является микроскопическая хорда. Это приводит к тому, что окончательно сфера формируется как суперпозиция указанных ленточек за конечное число рабо-

чих ходов и ограниченное операционное время. Степень приближения реальной формы к математически точной сфере зависит от множества факторов как технологических, так и от механических свойств обрабатываемого материала, характеристики абразивных кругов и, по-видимому, от их сложных сочетаний. Это же положение относится и к процессу образования микрорельефа обработанной сферической поверхности. В настоящее время отсутствует информация по аналитическому определению параметров микрорельефа, образующегося в результате бесцентрового шлифования полной сферы. Поэтому выполнение такого расчета является актуальной задачей.

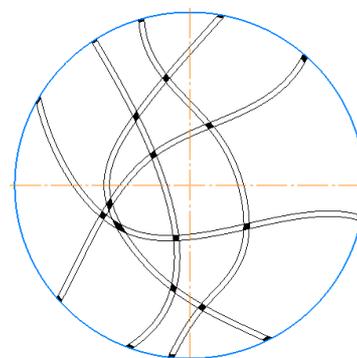


Рис. 1. Суперпозиция следов бесцентрового шлифования в форме сферической поверхности

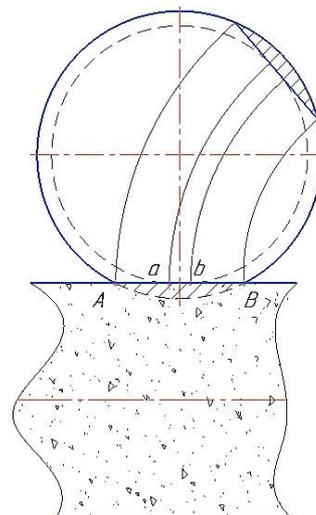


Рис. 2. Схема съема припуска при бесцентровом шлифовании сферы

В результате суперпозиции множества кольцевых лысок образуется ограниченная фигура, приближающаяся по форме к номинальной сферической поверхности (рис. 3).

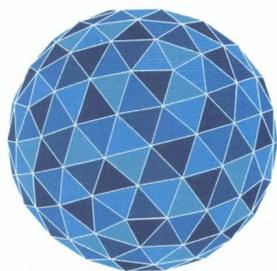


Рис. 3. Пример формы сферической заготовки, обработанной бесцентровым шлифованием

Выше было сказано, что в сечении форма снимаемого слоя материала представляет собой круговой сегмент. Но за формирование шероховатого слоя «отвечают» только абразивные зерна, контактирующие с заготовкой на длине хорды  $ab$  (рис. 2). На этом участке глубина резания  $t$  превышает максимальную высоту микронеровностей поверхности  $R_{\max}$  исходной заготовки:  $t > R_{\max}$ .

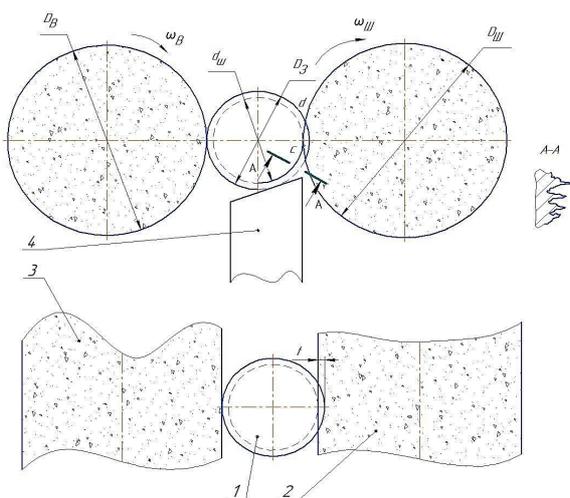


Рис. 4. Расчетная схема определения параметров шероховатости обработанной поверхности шара при бесцентровом шлифовании: 1 – обрабатываемый шар, 2 – шлифовальный круг, 3 – ведущий круг, 4 – опорный нож  
 ( $D_3$  и  $d_{ш}$  – диаметр заготовки и диаметр шарика после обработки соответственно;  $D_в$  – диаметр ведущего круга;  $D_{ш}$  – диаметр шлифовального круга;  $\omega_{ш}$  – угловая скорость шлифовального круга;  $\omega_в$  – угловая скорость ведущего круга;  $t$  – глубина резания)

Для этого случая в работе [6] предложена методика теоретического исследования. В соответствии с этой методикой, величина среднего арифметического отклонения микропрофиля для случая бесцентрового шлифования

сферической поверхности может быть определена следующим образом:

$$Ra = M_2 \cdot \left( \frac{H_0^k}{n \cdot Z_0 \cdot L} \right)^{\frac{1}{k+m}}, \quad (1)$$

где  $L$  – длина дуги контакта  $cd$  (рис. 4) шлифовального круга с сечением А-А (рис. 4);  $n$  и  $m$  – коэффициент и показатель формы абразивных зерен;  $Z_0$  – число выступающих зерен на единице поверхности шлифовального круга;  $H_0$  и  $k$  – коэффициент и показатель степени, характеризующие плотность расположения абразивных зерен по глубине шлифовального круга, связанные с характеристикой абразивного инструмента;

$$M_2 = 2 \cdot \Gamma\left(\frac{k+m+1}{k+m}\right) \cdot \left\{ \frac{1}{k+m+1} \cdot \left[ \Gamma\left(\frac{k+m+1}{k+m}\right) \right]^{k+m} - \frac{1}{2 \cdot (2k+2m+1)} \cdot \left[ \Gamma\left(\frac{k+m+1}{k+m}\right) \right]^{2k+m} \right\} \cdot M_1,$$

где  $M_1$  – коэффициент, представляющий собой сочетание гамма-функций от соотношений  $m$  и  $k$ :

$$M_1 = \frac{1}{\left[ \frac{\Gamma(m+k+1)}{k\Gamma(m+1)\Gamma(k)} \right]^{k+m+1}}$$

Длину дуги контакта  $cd$  (рис. 4) шлифовального круга с сечением А-А определим при помощи схемы на рис. 5:

$$L = \frac{D_{ш}}{2} \cdot \alpha, \quad (2)$$

где  $D_{ш}$  – диаметр шлифовального круга;  $\alpha$  – угол, стягиваемый дугой контакта  $cd$ .

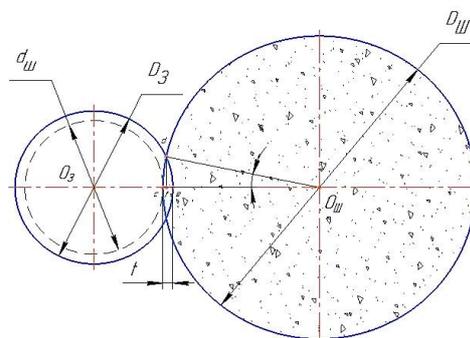


Рис. 5. Схема для определения величины дуги контакта шлифовального круга с сечением А-А

Для нахождения величины угла  $\alpha$  рассмотрим схему на рис. 5. Из  $\Delta O_{ш}df$ :

$$df = \sqrt{\left(\frac{D_{III}}{2}\right)^2 - \left(\frac{D_{III}}{2} - cf\right)^2} \quad (3)$$

В свою очередь, из  $\Delta O_3df$ :

$$df = \sqrt{\left(\frac{D_3}{2}\right)^2 - \left(\frac{D_3}{2} - ef\right)^2} \quad (4)$$

Приравняем (3) и (4) и произведем преобразования:

$$D_{III} \cdot cf - (cf)^2 = D_3 \cdot ef - (ef)^2$$

Величины отрезков  $cf$  и  $ef$  меньше единицы и, возведенные в квадрат, представляют собой величины второго порядка малости, от которых можно освободиться. Тогда:

$$D_{III} \cdot cf = D_3 \cdot ef \quad (5)$$

Из рис. 5 видно, что  $ef = t - cf$ . Подставим это соотношение в (5) и решим уравнение относительно  $cf$ . В результате решения и преобразований получим:

$$cf = \frac{D_3 \cdot t}{D_{III} + D_3} \quad (6)$$

С учетом (6) угол  $\alpha$  равен:

$$\alpha = \arccos\left(1 - \frac{D_3 \cdot t}{D_{III}(D_{III} + D_3)}\right) \quad (7)$$

Подставив (7) в (2), получим:

$$L = \frac{D_{III}}{2} \cdot \arccos\left(1 - \frac{D_3 \cdot t}{D_{III}(D_{III} + D_3)}\right) \quad (8)$$

С учетом рекомендаций [6, 7], после преобразований (1), получаем:

$$Ra = 0,196 \cdot \left(\frac{d_0^{2,89} \cdot \cos(\beta)}{L \cdot Z_0}\right)^{0,257} \quad (9)$$

где  $d_0$  – величина абразивных зерен (зернистость);  $\beta$  – угол между вектором скорости вращения шлифовального круга и вектором скорости формообразующего вращения сферической заготовки;  $Z_0$  – количество абразивных зерен на единице рабочей поверхности шлифовального круга.

В случае бесцентрового шлифования сферической заготовки микрорельеф единицы площади обработанной сферы является суперпозицией микрорельефов, как минимум, двух, но, как правило, большего числа лысок.

Среднеарифметическая высота микронеровностей поверхностей каждой из этих лысок описывается зависимостью (9). При их физическом пересечении в процессе шлифования, а также в процессе, так называемого, выхажива-

ния выступы микрорельефа как бы «дробятся». Процесс «дробления» продолжается на протяжении всего времени обработки, включая выхаживание.

Результаты компьютерного эксперимента по определению величины среднего арифметического отклонения микропрофиля сферической поверхности в зависимости от параметров рабочей зоны приведены в таблице.

Величина среднего арифметического отклонения профиля в зависимости от диаметра шлифовального круга

Диаметр шлифовального круга $D_{III}$ , мм	$Ra$ , мкм
300	1,057
350	1,016
400	0,982

Как видно из таблицы, с увеличением диаметра шлифовального круга высота микронеровностей уменьшается.

#### Влияние процесса выхаживания на формирование микрорельефа сферической поверхности

Когда мы говорим о выхаживании при бесцентровом шлифовании сферических деталей, необходимо учитывать его специфику и условность применения этого термина. Уже начиная со второго оборота заготовки имеет место пересечение (частичное наложение) одной лыски на другую, и фигура их пересечения, собственно говоря, и является результатом начала выхаживания. Такой процесс выхаживания уместно было бы назвать «дискретное выхаживание». Дискретное выхаживание никогда не переходит в сплошное (как это происходит при круглом центровом и бесцентровом шлифовании цилиндрических поверхностей) в силу технологических особенностей бесцентрового шлифования сферы. Даже когда процесс обработки всей сферической поверхности, вследствие достижения заданных результатов, завершен, выполняемое по традиции для закрепления результатов выхаживание является дискретным и должно применяться с учетом его специфики.

Это обстоятельство для уточнения методики расчета высоты микропрофиля можно учесть следующим образом.

Минимально необходимое число проходов шлифовального круга для обработки всей сферической поверхности радиусом

$R_{cf} = D/2$  или, другими словами, минимальное количество кольцевых лысок, суммарная ширина которых достаточна для полного покрытия всей сферы, может быть определено с использованием теоремы Тота [11].

Из практики производства известно, что при шлифовании с увеличением числа проходов шлифовального круга высота микронеровностей уменьшается. Использование в конце цикла обработки процесса выхаживания еще больше способствует снижению и стабилизации величины шероховатости. Однако при этом высота шероховатости не снижается до нуля, а асимптотически приближается к некоторой минимальной величине, характерной для конкретных параметров режима обработки и параметров рабочей зоны.

Это обстоятельство в первом приближении можно описать гиперболической зависимостью:

$$R_{av} = R_a \cdot n_{\min} / n + R_{\min}, \quad (10)$$

где  $R_{av}$  – среднеарифметическая величина шероховатости поверхности сферы после многопроходной обработки с выхаживанием;  $R_a$  – среднеарифметическая величина шероховатости поверхности единичной лыски после однопроходной обработки с глубиной резания  $t > R_{\max}$ ;  $n$  – общее количество оборотов сферической заготовки за один цикл обработки;  $n_{\min}$  – минимальное количество кольцевых лысок, суммарная ширина которых достаточна для полного покрытия всей сферы радиуса  $R_{cf}$ ;  $R_{\min}$  – минимально возможная для данных условий обработки высота шероховатости.

С достаточной для практики точностью для чистового шлифования можно принять  $R_{\min} = 0,16$  мкм.

Минимальное количество кольцевых лысок  $n_{\min}$ , суммарная ширина которых достаточна для полного покрытия всей сферы радиуса  $R_{cf}$ , определим по теореме Тота [11] следующим образом:

$$n_{\min} = S_{\Sigma} / l_{ab}$$

или

$$n_{\min} = \pi \cdot R_{cf} / l_{ab}, \quad (11)$$

где  $l_{ab}$  – длина хорды  $ab$  (рис. 2), являющейся образующей единичной кольцевой лыски;  $R_{cf}$

– радиус сферы,  $S_{\Sigma}$  – суммарная площадь полюсов, которыми можно покрыть сферу.

Величина  $l_{ab}$  зависит от свойств обрабатываемого материала, в значительной степени, от его упругости и от характеристики круга, в частности, от его зернистости. Чем более упругий обрабатываемый материал и чем больше величина зерна (а следовательно, и радиус округления его вершин), тем больше величина  $ab$  при прочих постоянных условиях.

Было бы неверным считать, что  $n_{\min}$ , определяемое по (11), достаточно для обработки всей сферической поверхности, поскольку всегда имеют место многочисленные перекрытия следов обработки. Поэтому уместно ввести дополнительный коэффициент, учитывающий это обстоятельство. Тогда выражение (11) трансформируется:

$$n'_{\min} = K_O \cdot \pi \cdot R_{cf} / l_{ab}, \quad (12)$$

где  $K_O$  – коэффициент, учитывающий частичное перекрытие следов обработки.

### Пример

Если в соответствии с рекомендациями [6, 7] принять  $k = 2,75$ ;  $m = 1,14$ ;  $n = 6,42 \cdot d_0^{-0,14}$ ;  $H_0 = 1,288 \cdot d_0$  и  $D_{III} = 300$  мм;  $D_3 = 26,4$  мм;  $t = 0,3$  мм;  $d_0 = 40$ ,  $\beta = 15^\circ$ , для шлифовального круга зернистости 40 полуоткрытой структуры  $Z_0 = 62$ .

Тогда, в соответствии с (9),

$$Ra = 0,196 \cdot \left( \frac{d_0^{2,89} \cdot \cos(\beta)}{L \cdot Z_0} \right)^{0,257} = 0,883 \text{ мкм}$$

Таким образом, если поверхность сферы будет полностью обработана с указанными условиями, то среднеарифметическое отклонение профиля будет равно примерно  $Ra = 0,9$  мкм. В процессе следующего за этим выхаживания высота микрорельефа будет уменьшаться:

при  $n'_{\min} / n = 0,5$   $R_{av} = 0,56$  мкм;

при  $n'_{\min} / n = 0,45$   $R_{av} = 0,52$  мкм;

при  $n'_{\min} / n = 0,4$   $R_{av} = 0,48$  мкм.

Выявим зависимость получаемой шероховатости сферической поверхности от зернистости шлифовального круга (рис. 6). Как видно из рис. 6, с увеличением зернистости шли-

фовального круга высота микронеровностей поверхности сферы увеличивается.

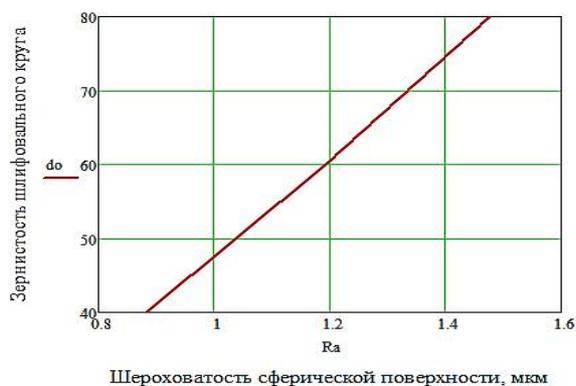


Рис. 6. Зависимость получаемой шероховатости сферической поверхности  $Ra$  от зернистости шлифовального круга  $d_0$

### Заключение

Определена теоретическая зависимость величины среднего арифметического отклонения высоты микронеровностей профиля от характеристики шлифовального круга и параметров рабочей зоны для случая бесцентрового шлифования полной сферической поверхности.

Математически определено влияние процесса выхаживания на формирование шероховатости сферической поверхности. Показано, что использование в конце цикла обработки сферической поверхности процесса выхаживания способствует снижению ее шероховатости на 40-60% и дальнейшей ее стабилизации.

Поступила 15.07.2021; принята к публикации 19.10.2021

### Информация об авторах

**Решетникова Ольга Павловна** – канд. техн. наук, доцент кафедры «Технология и системы управления в машиностроении», Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А. (410054, Россия, г. Саратов, ул. Политехническая, д. 77), e-mail: olgareshetnikova1@yandex.ru, тел. 7-961-645-18-44

**Изнаиров Борис Михайлович** – канд. техн. наук, доцент кафедры «Технология и системы управления в машиностроении», Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А. (410054, Россия, г. Саратов, ул. Политехническая, д. 77), e-mail: bageev1@mail.ru, тел.+7-962-622-81-74

**Васин Алексей Николаевич** – д-р техн. наук, профессор кафедры «Технология и системы управления в машиностроении», Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А. (410054, Россия, г. Саратов, ул. Политехническая, д. 77), e-mail: vasin@sstu.ru, тел.+7-8452-99-87-90

**Белоусова Наталия Валерьевна** – аспирант кафедры «Технология и системы управления в машиностроении», Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А. (410054, Россия, г. Саратов, ул. Политехническая, д. 77), e-mail: tusichka18061990@mail.ru, тел.+7-917-304-83-15

**Семочкин Геннадий Анатольевич** – аспирант кафедры «Технология и системы управления в машиностроении», Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А. (410054, Россия, г. Саратов, ул. Политехническая, д. 77), e-mail: gena-79@inbox.ru, тел.+7-905-327-42-12

### Литература

1. Олендер Л.А. Технология и оборудование шарикового производства. Минск: Выш. шк., 1974. 334 с.
2. Щетникович К.Г. Влияние профиля кольцевой канавки на формообразование сферической поверхности шариков при доводке // Вестник машиностроения. 2010. №2. С. 25-29.
3. Справочник шлифовщика/ Л.М. Кожуро, А.А. Панов, Э.Н. Ремизовский, П.С. Чистосердов. Минск: Вышэйш. шк., 1981. 288 с.
4. Абразивная и алмазная обработка материалов: справочник / под ред. А.Н. Резникова. М.: Машиностроение, 1977. 391 с.
5. Бесцентровое шлифование/ под ред. З.И. Кремня. 3-е изд., перераб. и доп. Л.: Машиностроение. Ленинград. отд-ние, 1986. 92с.
6. Королев А.В. Исследование процессов образования поверхностей инструмента и детали при абразивной обработке: монография. Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1975. 191 с.
7. Изнаиров Б.М. Исследование метода чистовой обработки сферических поверхностей колец шарнирных подшипников абразивными брусками микроточением: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08. Саратов, 1982. 145 с.
8. Определение рациональных параметров рабочей зоны при бесцентровом шлифовании / О.П. Решетникова и др. // Научные технологии в машиностроении. 2020. № 5 (107). С. 23-28.
9. Бочкарев А.П. Совершенствование метода обработки полых тел сферической формы // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2011. № 58. С. 17-20.
10. Васин А.Н., Изнаиров Б.М., Бочкарев А.П. Математическая модель процесса формообразования при бесцентровом шлифовании пустотелых шаров // СТИИ. 2013. № 1. С. 28-32.
11. Jiang Z., & Polyanskii A. Proof of lászló fejes Tóth's zone conjecture. Geometric and Functional Analysis. 2017. 27(6). P. 1367-1377. DOI:10.1007/s00039-017-0427-6

## ANALYTICAL DETERMINATION OF THE MICRORELIEF PARAMETERS FORMED AS A RESULT OF CENTERLESS GRINDING OF THE FULL SPHERE

O.P. Reshetnikova, B.M. Iznairov, A.N. Vasin, N.V. Belousova, G.A. Semochkin

Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, Russia

**Abstract:** in the technological preparation of the operations of finishing processing of parts with abrasive tools, it is very important to predict its results depending on the assigned modes and the purpose of modes depending on the required quality of the processed surfaces. The available numerous reference materials of this nature were obtained in laboratory conditions, are discrete in nature, do not take into account the specific topography of the surfaces of abrasive tools and many other conditions, and therefore are not reliable enough. On their basis, it is possible to plan the technological process only in advance, and then inevitably it is necessary to refine its parameters experimentally, which leads to a significant increase in the cost of the production preparation process. The availability of a reliable analytical method allows you to multiply these costs, and therefore it is urgently needed not only and even not so much when performing scientific research, but in real production. In the article, we analytically determine the parameters of the microrelief formed as a result of centerless grinding of a full sphere. We determined the influence of the nursing process on the formation of the sphere roughness. We present a method for calculating the arithmetic mean deviation of the micro-profile of a spherical surface

**Key words:** hollow balls, microrelief, centerless grinding, sphere, processing modes, degree of influence

**Acknowledgements:** the article was prepared with the financial support of the grant of the President of the Russian Federation for governmental support of young Russian scientists (PhD) Grant No. MK-2395.2020.8

### References

1. Olender L. A. "Technology and equipment of ball production" ("Tekhnologiya i oborudovanie sharikovogo proizvodstva"), Minsk: Vysh. shk., 1974, 334 p.
2. Shchetnikov K.G. "The influence of the ring groove profile on the shaping of the spherical surface of balls during finishing", *Mechanical Engineering Bulletin (Vestnik mashinostroeniya)*, 2010, no. 2, pp. 25-29
3. Kozhuro L.M., Panov A.A., Remizovskiy E.N., Chistoserdov P.S. "Handbook of the grinder" ("Spravochnik shlifovshchika"), Minsk: Vysh. shk., 1981, 288 p.
4. Reznikov A.N. ed. "Abrasive and diamond processing of materials: handbook" ("Abrazivnaya i almaznaya obrabotka materialov: spravochnik"), Moscow: Mashinostroenie, 1977, 391 p.
5. Flint Z.I. ed. "Centerless grinding" ("Bestsentrovoye shlifovanie"), Leningrad: Mashinostroenie, 1986, 92 p.
6. Korolev A.V. "Investigation of the processes of formation of tool surfaces and parts in abrasive processing" ("Issledovanie protsessov obrazovaniya poverkhnostey instrumenta i detal' pri abrazivnoy obrabotke"), monograph, Saratov State University, 1975, 191 p.
7. Iznairov B.M. "Investigation of the method of finishing the spherical surfaces of the rings of articulated bearings with abrasive bars by microthreading" ("Issledovanie metoda chistovoy obrabotki sfericheskikh poverkhnostey kolets sharnirnykh podshipnikov abrazivnymi bruskami mikrotocheniem"), cand. of technical sciences dis., Saratov, 1982, 145 p.
8. Reshetnikova O.P. et al. "Determination of rational parameters of the working area when centerless grinding", *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering (Naukovyemkie tekhnologii v mashinostroenii)*, 2020, no. 5 (107), pp. 23-28.
9. Bochkarev A.P. "Improvement of the method of processing of hollow bodies of spherical shape", *Bulletin of Saratov State Technical University (Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2011, no. 58, pp. 17-20
10. Vasin A.N., Iznairov B.M., Bochkarev A.P. "Mathematical model of the forming process in the centerless grinding of hollow balls", *STIN*, 2013, no. 1, pp. 28-32
11. Jiang Z., Polyansky A. "Proof of the Laszlo fejes Toth zone hypothesis", *Geometric and Functional Analysis*, 2017, no. 27(6), pp. 1367-1377. doi: 10.1007/s00039-017-0427-6

Submitted 15.07.2021; revised 19.10.2021

### Information about the authors

**Ol'ga P. Reshetnikova**, Cand. Sc. (Technical), Yuri Gagarin State Technical University of Saratov (77 Polytechnicheskaya st., Saratov 410054, Russia), e-mail: olgareshetnikova1@yandex.ru, tel.: +7-961-645-18-44  
**Boris M. Iznairov**, Cand. Sc. (Technical), Yuri Gagarin State Technical University of Saratov (77 Polytechnicheskaya st., Saratov 410054, Russia), e-mail: bageev1@mail.ru, tel.: +7-962-622-81-74  
**Aleksey N. Vasin**, Dr. Sc. (Technical), Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov (77 Polytechnicheskaya st., Saratov 410054, Russia), e-mail: vasin@sstu.ru, tel.: +7-8452-99-87-90  
**Natal'ya V. Belousova**, graduate student, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov (77 Polytechnicheskaya st., Saratov 410054, Russia), e-mail: tusichka18061990@mail.ru, tel.: +7-917-304-83-15  
**Gennadiy A. Semochkin**, graduate student, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov (77 Polytechnicheskaya st., Saratov 410054, Russia), e-mail: gena-79@inbox.ru, tel.: +7-905-327-42-12

## ВЛИЯНИЕ МАТЕРИАЛОВ ТРУБОПРОВОДОВ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ СТЕНДОВ НА ИХ ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

А.В. Саврико, С.Н. Лымич, К.В. Кружаев, В.С. Левин, А.В. Москвичев

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** приведено исследование зависимости газодинамических характеристик стенда от применяемого материала трубопровода. Основополагающими факторами, влияющими на работоспособность стенда, являются выходные параметры – давление и расход рабочего тела, которые напрямую зависят от потерь давления на трение, создаваемого элементами стенда. Для оценки степени влияния материалов на потери стенда выбраны два вида труб: полипропиленовые и металлические. Аналитические расчёты потери давления рассматриваемых трубопроводов из различного материала показали, что трубопроводы из полипропилена предпочтительнее. Однако при проведении эксперимента получены противоположные данные, которые показали, что в полипропиленовых магистралях возможно присутствие значительного количества диафрагм: в местах пайки труб, образовавшихся в процессе изготовления. Именно этот факт способствует существенному повышению значений сопротивлений в полипропиленовых трубопроводах на 20 % по сравнению со стальными трубами, где диафрагмы отсутствуют. В результате проведения исследования был введен коэффициент, учитывающий влияние диафрагм полипропиленового трубопровода при аналитическом расчете на сопротивление. Для сохранения более точных снимаемых значений с газодинамических стендов целесообразнее использовать трубопроводы из металла, в которых рассчитать потери возможно с отклонениями до 3 %

**Ключевые слова:** газодинамический стенд, потери давления, сопротивление, полипропиленовые трубы, металлические трубы, эксперимент

### Введение

При проектировании и разработке газодинамических стендов основополагающими факторами, влияющими на работоспособность системы, являются выходные параметры – давление и расход рабочего тела. Это связано с тем, что от значений данных параметров напрямую зависит производительность газодинамического стенда [1].

Важно отметить, что наибольшее влияние на вышеуказанные факторы оказывает тип и диаметр трубопровода, поэтому выбор его материала и аналитический расчет сопротивлений в нем становятся важным шагом в расчете газодинамического стенда [2].

При проведении аналитического расчета потерь давления в трубопроводе применяется классический расчет, который не учитывает все факторы, влияющие на потери давления, появляющиеся при изготовлении трубопровода [3].

В данной работе рассмотрен наиболее полный расчет, который не учитывает большинство факторов, возникающих при изготовлении газодинамических стендов.

Для подтверждения полученных аналитическим путём данных был проведён эксперимент, после чего был сформулирован вывод, основанный на двух методиках исследования.

### Постановка задачи

В качестве рабочего тела был выбран воздух. Это обусловлено двумя факторами:

– Легкодоступность. Эксплуатация в качестве рабочего тела – воздуха не требует специальных навыков и сложной аппаратуры, что позволяет быстро и качественно проводить эксперименты без значительных трудозатрат.

– Универсальность. ГОСТ 33257-2015 "Арматура трубопроводная" [4].

После выбора рабочего тела для газодинамического стенда следует выбор диаметра и материала трубопровода.

В данной работе будет рассмотрено два получивших наибольшее распространение материала трубопровода: полипропилен и нержавеющая сталь. Причем для различных материалов принят одинаковый диаметр трубопровода.

В табл. 1 представлены основные физические свойства используемых материалов трубопровода. При анализе физических свойств материалов трубопроводов из табл. 1 затруднительно сделать однозначный вывод о том, какой материал предпочтительнее для применения в газодинамическом стенде. Необходимо уточнить, что сравнение представленных материалов возможно производить только для давлений до 2 МПа, где выбор между этими двумя материалами не является однозначным. Использование полипропилена при небольших

величинах давления является экономически оправданным из-за простоты изготовления и меньшей стоимости, по сравнению с аналогичными конструкциями из металла, также необходимо отметить устойчивость к коррозии.

Таблица 1

Физические свойства материалов трубопровода

Свойства	Полипропилен	Нержавеющая сталь
Химическая стойкость	+	+
Механическая прочность, Н/мм <sup>2</sup>	35	549
Плотность, г/см <sup>3</sup>	0,860	7,9
Термоустойчивость, °С	от минус 15 до плюс 120	от минус 196 до плюс 600
Диапазон диаметров, мм	от 10 до 125	от 5 до 325

Этапы решения поставленной задачи представлены на рис. 1 в виде блок-схемы выполнения исследования.

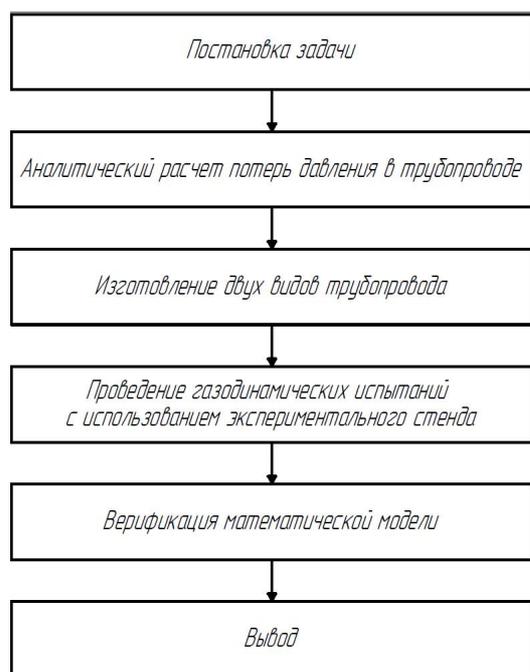


Рис. 1. Блок-схема выполнения исследования

### Методы исследования

#### Аналитическая методика расчета сопротивлений

Потери полного давления или сопротивление в трубопроводах включают в себя потери на трение или сопротивление трения и местные потери или местное сопротивление.

Сопротивление трения определяется силой трения движущегося потока на внутреннюю

поверхность канала, материал которой имеет определенную шероховатость.

Основные значения эквивалентной абсолютной шероховатости представлены в табл. 2 [3].

Таблица 2

Эквивалентная абсолютная шероховатость  $k_s$

Материал и вид труб	$k_s$ , мм
Трубы из стекла	0,002
Стальные сварные трубы	0,1
Полипропиленовые трубы	0,007

Потери давления на трение по длине определяются по формуле (1):

$$\Delta p_{\text{л}} = \lambda \frac{l}{d_3} \rho \frac{v^2}{2}, \quad (1)$$

где  $\lambda$  – безразмерный коэффициент трения;  $\rho$  – плотность рабочего тела,  $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ ;  $l$  – длина участка трубы, м;  $v$  – средняя скорость течения,  $\frac{\text{м}}{\text{с}}$ ;  $d_3$  – эквивалентный диаметр, мм.

Плотность рабочего тела находится по формуле (2):

$$\rho_{\text{г}} = \frac{p_{\text{вх}}}{R_{\text{г}} \cdot T_{\text{г}}}, \quad (2)$$

где  $p_{\text{вх}}$  – давление на входе, Па;  $R_{\text{г}}$  – газовая постоянная для воздуха,  $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ ;  $T_{\text{г}}$  – температура окружающей среды, К.

Живое сечение в данных магистральных будем считать плоским и равным площади поперечного сечения потока.

Определяется живое сечение в данных магистральных по формуле (3):

$$\omega = \left(\frac{d}{2}\right)^2 \cdot \pi, \quad (3)$$

где  $d$  – диаметр магистрали, мм.

Объемный расход газа находится из (4):

$$Q = \frac{m}{\rho}, \quad (4)$$

где  $m$  – массовый расход газа,  $\frac{\text{кг}}{\text{с}}$ ;  $\rho$  – плотность,  $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ .

Средняя скорость потока  $v$  определяется частным от деления расхода на площадь живого сечения (5):

$$v = \frac{Q}{\omega}. \quad (5)$$

Число Рейнольдса для потока газа можно определить по формуле (6):

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu}, \quad (6)$$

где  $\nu$  – кинематическая вязкость газа,  $\frac{m^2}{c}$ .

Коэффициент трения  $\lambda$  учитывает влияние вязкости газа и состояния стенок трубопровода для определения сопротивлений.

Для выбора формулы коэффициента трения  $\lambda$  требуется воспользоваться табл. 3, где представлены формулы нахождения в зависимости от характера движения и числа Рейнольдса [5].

Таблица 3

Определение коэффициента сопротивления  $\lambda$  трения в зависимости от характера потока

Режим движения	Число Рейнольдса	Определение $\lambda$
Ламинарный	$Re < 2300$	$\lambda = \frac{64}{Re}$
Переходный	$2300 < Re < 4000$	Проектирование трубопроводов не рекомендуется
Турбулентный	$4000 < Re < 10 \frac{d}{\Delta_3}$	$\lambda_T = \frac{0,3164}{Re^{0,25}}$
	$10 \frac{d}{\Delta_3} < Re < 560 \frac{d}{\Delta_3}$	$\lambda_T = 0,11 \left( \frac{\Delta_3}{d} + \frac{68}{Re} \right)^{0,25}$
	$Re > 560 \frac{d}{\Delta_3}$	$\lambda_T = 0,11 \left( \frac{\Delta_3}{d} \right)^{0,25}$

Эквивалентная равномерно-зернистая абсолютная шероховатость выбирается в соответствии с табл. 2 для новой и чистой, тщательно уложенной бесшовной полиэтиленовой трубы, для стеклянной трубы устройства измерения объёмного расхода ПОЛЯР.АП-018.00.00.00 и для стальных сварных труб.

Необходимо выполнить расчёт потерь на местные сопротивления, а именно, на повороты и используемую арматуру. Ориентировочная конфигурация трубопроводов определяется при выборе длины участков трубопроводов.

Движение рабочего тела в каналах при наличии местных потерь давления является неравномерным. Потери давления в местных сопротивлениях вычисляются по формуле Вейсбаха, преобразованной к следующему виду (7):

$$\Delta p_M = \frac{\xi \rho v^2}{2}, \quad (7)$$

где  $\xi$  – безразмерный коэффициент местного сопротивления;  $v$  – средняя скорость потока в

выбранном сечении,  $\frac{m}{c}$ ;  $\rho$  – плотность рабочего тела,  $\frac{kg}{m^3}$ .

Значения коэффициентов местных сопротивлений  $\xi$  зависят от числа Рейнольдса и относительной шероховатости и определяются коэффициентом трения  $\lambda$ .

Формула (8) для нахождения коэффициентов местных сопротивлений  $\xi$  диафрагмы для полипропиленовых трубопроводов.

$$\xi_{\text{диафр}} = \left( \frac{1}{n_{\text{диафр}} \cdot \varepsilon} - 1 \right)^2, \quad (8)$$

где  $\varepsilon = 0,57 + \frac{0,043}{1,1-n}$  – коэффициент сжатия струи;  $n_{\text{диафр}} = \frac{\omega_0}{\omega}$  – отношение площади отверстия диафрагмы  $\omega_0$  к площади сечения трубы  $\omega$ .

Коэффициент местного сопротивления при резком повороте трубы круглого сечения определяется по формуле (9):

$$\xi_\alpha = \xi_{90} \cdot (1 - \cos \alpha), \quad (9)$$

где  $\xi_{90}$  – значение коэффициента сопротивления для угла  $90^\circ$ ; для нашего расчета  $\xi_{90} = 2$ .

Коэффициент местного сопротивления внезапного расширения трубопровода определяется по формуле (10):

$$\xi_{\text{вн.р.1}} = (1 - n)^2, \quad (10)$$

где  $n = \frac{\omega_2}{\omega_1}$  – отношение площади сечения трубопровода после расширения  $\omega_2$  к площади сечения трубопровода до расширения  $\omega_1$ .

Коэффициент местного сопротивления внезапного сужения трубопровода определяется по формуле (11):

$$\xi_{\text{вн.с.}} = \left( \frac{1}{\varepsilon} - 1 \right)^2, \quad (11)$$

где  $\varepsilon = 0,57 + \frac{0,043}{1,1-n}$  – коэффициент сжатия струи;  $n = \frac{\omega_2}{\omega_1}$  – отношение площади сечения трубопровода до сужения  $\omega_1$  к площади сечения трубопровода после сужения  $\omega_2$ .

Проведенный аналитический расчет с помощью приведенной выше методики представлен в виде графической зависимости между объемным расходом рабочего тела и потерей давления в системе в целом для двух рассматриваемых типов трубопроводов (рис. 2).

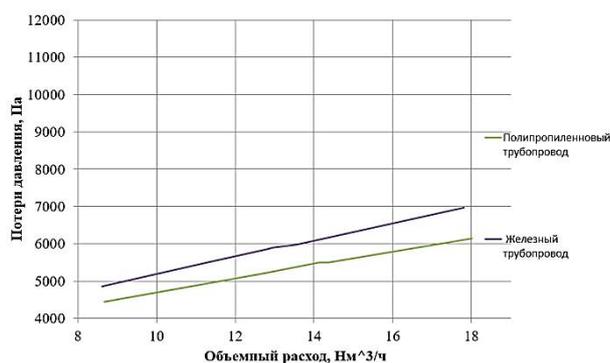


Рис. 2. Графическая зависимость между сопротивлениями, рассчитанными аналитическим путем для двух рассматриваемых типов трубопроводов

В результате проведенного аналитического расчета сопротивлений было установлено, что потери давления в стенде со стальным трубопроводом на 9% выше, чем с полипропиленовыми трубами.

### Эксперимент

Для верификации расчета потерь проектируемого изделия перед запуском его в массовое производство требуется проводить ряд испытаний, подтверждающих работоспособность изделия.

Проведение исследовательских испытаний играет важную роль в проектировании наукоемкой техники. Ведь характеристики, снимаемые в результате эксперимента, позволяют утверждать о работоспособности исследуемого изделия.

Объектом исследования в данной работе являются трубопроводы, выполненные из полипропилена и металла (нержавеющая сталь 12X18H10T), входящие в состав газодинамического стенда.

В результате аналитических расчетов было выявлено, что потери давления в стенде с металлическим трубопроводом превышают потери давления стенда с полипропиленовым трубопроводом. Это связано с тем, что величина потерь на трение по длине трубопровода зависит от коэффициента трения, который учитывает влияние на поток такого параметра, как эквивалентная равномерно-зернистая абсолютная шероховатость. В свою очередь, значение данного параметра у металла в 14 раз выше, чем у полипропилена, что наглядно подтверждает теоретическую разницу в рассматриваемых экспериментах.

В рамках представленного в данной статье исследования был использован стенд для проведения газодинамических испытаний ВГТУ.ФЦП-001.000.00 с полипропиленовым трубопроводом (рис. 3), находящимся на кафедре "Ракетные двигатели" ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет».

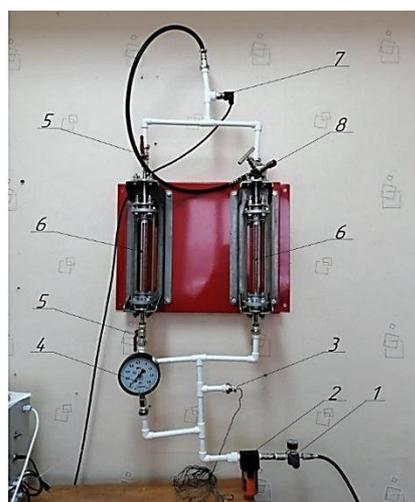


Рис. 3. Экспериментальный стенд для проведения газодинамических испытаний ВГТУ.ФЦП-001.000.00 с полипропиленовым трубопроводом:  
 1 – Регулятор давления N1204-R00;  
 2 – Фильтр-масловлагодотделитель WDK-7840;  
 3 – Термопреобразователь сопротивления ДТС054-РТ100.А3.60/10;  
 4 – Манометр МТИф с корректором 0-10 кгс/см²;  
 5 – Кран шаровый;  
 6 – Устройства измерения объемного расхода ПОЛЯР.АП-018.00.00.00;  
 7 – Датчик давления ПД100И-ДИ0,6-171-0,25;  
 8 – Сильфонный клапан DINAMIKA 16нж68нж

На рис. 4 представлен стенд для проведения газодинамических испытаний ВГТУ.ФЦП-001.000.00 с металлическим трубопроводом.

Экспериментальный стенд для проведения газодинамических испытаний ВГТУ.ФЦП-001.000.00 предназначен для проведения испытаний изделий с измерением величины давления и расхода при использовании в качестве рабочего тела воздуха, комплексной верификации математических моделей в рамках стендовых испытаний, обеспечения заданных величин давлений и расхода рабочего тела и технологических компонентов, необходимых для работы изделия, получения параметров, недоступных в условиях натурных экспериментов.

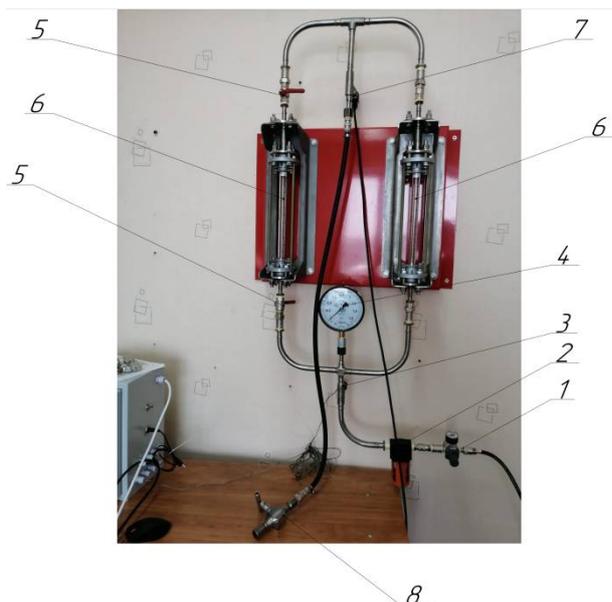


Рис. 4. Экспериментальный стенд для проведения газодинамических испытаний ВГТУ.ФЦП-001.000.00 с металлическим трубопроводом:

- 1 – Регулятор давления N1204-R00;
- 2 – Фильтр-масловлагоотделитель WDK-7840;
- 3 – Термопреобразователь сопротивления ДТС054-РТ100.АЗ.60/10;
- 4 – Манометр МТИф с корректором 0-10 кгс/см<sup>2</sup>;
- 5 – Кран шаровый;
- 6 – Устройства измерения объема расхода ПОЛЯР.АП-018.00.00.00;
- 7 – Датчик давления ПД100И-ДИ0,6-171-0,25;
- 8 – Сильфонный клапан DINAMIKA 16нж68нж

Система подачи рабочего тела представлена на пневматической принципиальной схеме экспериментального стенда для проведения газодинамических испытаний ВГТУ.ФЦП-001.000.00 (рис. 5).

Принцип работы экспериментального стенда для проведения газодинамических испытаний ВГТУ.ФЦП-001.00.00 заключается в следующем: в качестве рабочего тела выступает воздух, который накачивается компрессором КМ в бустер инфлятор взрывной БВН1. Для регулирования давления поступающего воздуха после бустера установлен воздушный редуктор КРД1 и фильтр-масловлагоотделитель ФОБ1. На входе в трубопровод установлен манометр МН1, предназначенный для контроля давления на входе в стенд. После манометра установлен термопреобразователь ДТТ1 для фиксации показаний температуры рабочего тела. Далее трубопровод разделяется на две линии, на обеих линиях установлены устройства объемного расхода РХМ1 и РХМ2. На линии РХМ2 установлены два крана шаровых КРП1 и КРП2 на входе и на выходе из устройства объемного

расхода. Далее магистрали соединяются в одну, и для фиксирования показаний давления на выходе магистрали установлен преобразователь давления ДТД1. Для фиксирования показаний давления, поступающего в испытуемое изделие, установлен датчик ДТД2.

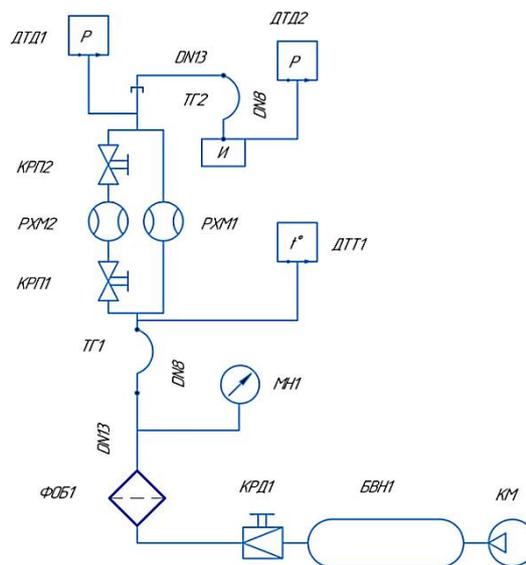


Рис. 5. Пневматическая принципиальная схема экспериментального стенда для проведения газодинамических испытаний:

- ДТД1, ДТД2 – Датчик давления;
- ТГ1, ТГ2 – Шланг воздушный с фитингами;
- КРП1, КРП2 – Кран шаровой для воды;
- РХМ1, РХМ2 – Устройство объемного расхода;
- ДТТ1 – Термопреобразователь сопротивления;
- ФОБ1 – Фильтр-масловлагоотделитель;
- КРД1 – Регулятор давления; МН1 – Манометр;
- БВН1 – Бустер инфлятор; КМ – Компрессор.

Основные технические характеристики экспериментального стенда для проведения газодинамических испытаний ВГТУ.ФЦП-001.000.00 представлены в табл. 4.

В результате работы было проведено два исследовательских испытания: с полипропиленовым и металлическим трубопроводом. В качестве испытываемого изделия выступали трубопроводы, а для создания сопротивления на выходе из них был использован сильфонный клапан DINAMIKA 16нж68нж с большим диапазоном регулирования сечения.

Таблица 4  
Технические характеристики стенда

Наименование параметра	Значение параметра
Тип устройства	Устройство пневматическое
Исполнение блока по ГОСТ 14254-2015	IP31
Климатическое исполнение блока по ГОСТ 15150-69	УХЛ4.2
Рабочее тело	воздух
Максимальное давление рабочего тела на входе в испытуемое изделие, МПа (кгс/см <sup>2</sup> )	0,6 (6)
Максимальное давление на входе в стенд, МПа (кгс/см <sup>2</sup> )	0,8 (8)
Номинальное напряжение питания, В	220
Потребляемая мощность, Вт	1500
Температура окружающей среды, °С	от + 10 до + 40

Первым этапом испытаний является испытание газодинамических систем (или опрессовка) трубопроводов на герметичность. Для этого на газодинамический стенд подаётся давление порядка 0,2 МПа, при этом закрывается выход из стенда и далее каждое соединение трубопровода промазывается мыльным раствором. Если на обработанных поверхностях трубопровода не возникает появление пузырей, то этот этап считается завершённым успешно и можно переходить к выполнению следующего этапа, иначе соединение, на котором обнаружено появление пузырей, разбирается, уплотняется заново, и действия первого этапа повторяются вновь.

Вторым этапом испытаний является установка сифонного клапана ДИНАМИКА 16нж68нж. Подключение к стенду для проведения газодинамических испытаний происходит с помощью быстроразъёмного соединения, следовательно, проверка герметичности (опрессовка) для проведения дальнейших испытаний не требуется.

Третьим этапом будет проведение испытаний. Для получения значений потерь давления на стенд подаётся давление равное 4 бара. Далее открывается сифонный клапан ДИНАМИКА 16нж68нж на 1 оборот, фиксируем показания, продолжаем данный порядок действий до полного его открытия. После полного открытия сифонного клапана расход рабочего тела регулируется с помощью редуктора путём понижения давления.

Для снятий показаний потерь давления был использован датчик давления, установлен-

ный на выходе из трубопровода, и манометр, установленный на входе в трубопровод. Показания манометра и преобразователя давления фиксируются программой (датчик давления) и визуально (манометр), соответственно. Для контроля расхода рабочего тела на стенде последовательно установлены два устройства измерения объёмного расхода.

Заключительным этапом проведения испытаний является обработка полученных экспериментальных данных и сравнение их со значениями аналитического расчёта. Также в ходе данного этапа были построены два графика: значения потерь давления, полученных экспериментальным путем, используя металлические и полипропиленовые трубы (рис. 6).

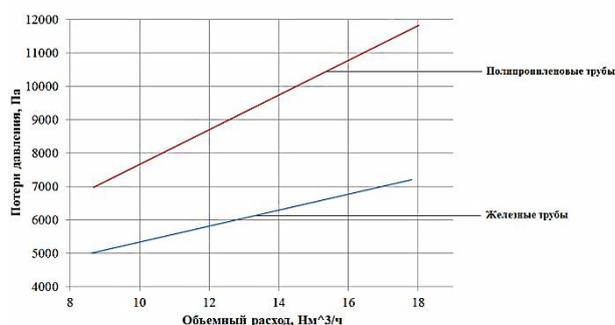


Рис. 6. Потери давления в трубопроводах, полученные экспериментальным путем

Как видно из рис. 6, значения перепада давления представляют собой линейную зависимость, расположенную под углом, так что при увеличении объёмного расхода увеличивается разность потерь давления между полипропиленовыми и металлическими трубами.

Следующим шагом анализа полученных экспериментальных и аналитических данных является дополнение предыдущего графика (рис. 6) значениями потерь давления, рассчитанными аналитическим путем (рис. 7).

Отклонения аналитического расчёта при различных значениях объёмного расхода от значений, полученных в результате проведенных газодинамических испытаний трубопроводов, составили менее 5% для металлического трубопровода. Данное значение подтверждает сходимость аналитического подхода и эксперимента, что, в свою очередь, позволяет сделать вывод о правильности расчёта и корректного проведения эксперимента.

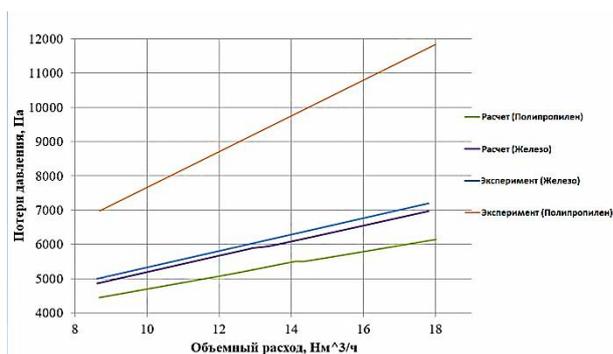


Рис. 7. Сравнение данных, полученных аналитическим и экспериментальным методом для двух видов трубопроводов

При проведении верификации аналитических и экспериментальных данных для газодинамического стенда с полипропиленовым трубопроводом было замечено существенное отклонение, составляющее около 40%. Это возможно вследствие присутствия значительного количества диафрагм в местах пайки полипропиленовых трубопроводов, которые возможно учесть только приблизительно, так как диаметр и количество данных сопротивлений может изменяться.

Для учета сопротивления введен коэффициент:

$$k_d = 1,7 .$$

Использование данного коэффициента требует дальнейших исследований его зависимости от типа полипропиленовых труб и условий их спайки.

### Заключение

Если при выборе материала трубопровода учитывать только шероховатость материала, то трубы из полипропилена, имея значительно меньшую шероховатость, являются наиболее выгодными по сравнению с использованием металлических труб.

Однако при расчете реального трубопровода в полипропиленовых магистралях будет присутствовать значительное количество диафрагм: в местах пайки труб, при резких расширениях, поворотах и сужениях. Именно этот

факт способствует значительному повышению значений сопротивлений в полипропиленовых трубопроводах на 20 % по сравнению со стальными трубами, где диафрагмы отсутствуют.

Необходимо уточнить, что сравнение представленных материалов возможно производить только для давлений до 2 МПа, где выбор между этими двумя материалами не является однозначным. Использование полипропилена при небольших величинах давления является экономически оправданным из-за простоты изготовления и меньшей стоимости, по сравнению с аналогичными конструкциями из металла. Также необходимо отметить устойчивость полипропилена к коррозии, однако в результате проектирования реального трубопровода возможны ошибки в определении сопротивлений, которые возможно исключить наверняка только при использовании трубопроводов большего диаметра, чем необходимо, а в некоторых конструкциях данное решение невозможно.

Подводя итог исследования, можно сделать вывод, что для сохранения более точных снимаемых значений с газодинамических стендов целесообразнее использовать трубопроводы из металла, в которых рассчитать потери возможно с отклонениями до 3 %.

### Литература

1. Демьяненко Ю.В., Барбарош К.О., Кружаев К.В. Оптимизация проведения испытаний газовых расходомеров с целью повышения точности измерения расхода газа // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2013. Т. 9. № 6.2. С. 15-21.
2. Демьяненко Ю.В., Кружаев К.В. Повышение точности определения массы газа при испытании расходомеров с целью получения достоверных характеристик узлов и агрегатов ЖРД // Альтернативная энергетика и экология. 2014. № 3 (143). С. 10-14.
3. Примеры расчетов по гидравлике / под ред. А.Д. Альтшуля. М.: Стройиздат, 1976. С. 55-82.
4. ГОСТ 33257-2015 «Арматура трубопроводная. Методы контроля и испытаний». URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200122471> (дата обращения: 09.03.2021).
5. Таблица определения коэффициента гидравлического сопротивления трения в зависимости от характера потока. URL: <https://tehtab.ru/Guide/GuideTricks/PressureLoss/LambdaHydraulik/> (дата обращения: 09.03.2021).

Поступила 15.07.2021; принята к публикации 19.10.2021

### Информация об авторах

**Саврико Анастасия Витальевна** – студент кафедры "Ракетные двигатели", Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: rd-vgtu@mail.ru, тел. (473)234-64-84, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8117-1797>

**Лымич Сергей Николаевич** – студент кафедры "Ракетные двигатели", Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: rd-vgtu@mail.ru, тел. (473)234-64-84, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0541-3037>

**Кружаев Константин Владимирович** – канд. техн. наук, доцент кафедры "Ракетные двигатели", Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: rd-vgtu@mail.ru, тел. (473)234-64-84, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3640-5221>

**Левин Василий Сергеевич** – аспирант кафедры "Ракетные двигатели", Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: rd-vgtu@mail.ru, тел. (473)234-64-84, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6659-5874>

**Москвичев Александр Викторович** – канд. техн. наук, доцент кафедры "Ракетные двигатели", Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: rd-vgtu@mail.ru, тел. (473)234-64-84, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5468-4095>

## INFLUENCE OF GAS-DYNAMIC TESTING RIG PIPELINES MATERIAL ON THEIR DYNAMIC CHARACTERISTICS

A.V. Savriko, S.N. Lymich, K.V. Kruzhaev, V.S. Levin, A.V. Moskvichev

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

**Abstract:** here we give the study of the dependence of the gas-dynamic characteristics of the stand on the pipeline material used. The fundamental factors affecting the performance of the stand are the output parameters—the pressure and flow rate of the working fluid, which directly depend on the friction pressure losses created by the elements of the stand. To assess the degree of influence of materials on the losses of the stand, we selected two types of pipes: polypropylene and metal. Analytical calculations of the pressure loss of the considered pipelines made of various materials have shown that pipelines made of polypropylene are preferable. However, during the experiment, we obtained the opposite data, which showed that a significant number of diaphragms may be present in polypropylene pipelines: in the places of soldering of pipes formed during the manufacturing process. This fact contributes to a significant increase in the resistance values in polypropylene pipelines by 20 % compared to steel pipes, where there are no diaphragms. As a result of the study, we introduced a coefficient that takes into account the influence of polypropylene pipeline diaphragms in the analytical calculation of resistance. To preserve more accurate values taken from gas-dynamic stands, it is more expedient to use metal pipelines in which it is possible to calculate losses with deviations of up to 3 %

**Key words:** gas-dynamic stand, pressure loss, resistance, polypropylene pipelines, metal pipelines, experiment

### References

1. Dem'yanenko Yu.V., Barbarosh K.O., Kruzhaev K.V. "Optimization of testing gas flow meters in order to improve the accuracy of measuring gas flow rate", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2013, vol. 9, no. 6-2, pp.15-21.
2. Dem'yanenko Yu.V., Kruzhaev K.V. "Improving the accuracy of determining the mass of gas when testing flow meters in order to obtain reliable characteristics of units and assemblies of liquid-propellant rocket engines", *Alternative Energy and Ecology (Alternativnaya energetika i ekologiya)*, Sarov, 2014, no. 3(143), pp. 10-14.
3. Altshul A.D. ed. "Examples of calculations for hydraulics" ("Primery raschetov po gidravlike"), Moscow: Stroyizdat, 1976.
4. GOST 33257-2015 "Pipeline fittings. Control and test methods "
5. "Table for determining the coefficient of hydraulic friction resistance depending on the nature of the flow", available at: <https://tehtab.ru/Guide/ GuideTricks/PressureLoss/ LambdaHydraulik/> (date of access: 03.09.2021).

Submitted 15.07.2021; revised 19.10.2021

### Information about the authors

**Konstantin V. Kruzhaev**, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: rd-vgtu@mail.ru, tel.: +7 (473) 234-64-84, ORCID: 0000-0003-3640-5221

**Vasiliy S. Levin**, graduate student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: rd-vgtu@mail.ru, ORCID: 0000-0002-6659-5874

**Anastasiya V. Savriko**, student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: rd-vgtu@mail.ru, ORCID: 0000-0002-8117-1797

**Sergey N. Lymich**, student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: rd-vgtu@mail.ru, ORCID: 0000-0002-0541-3037

**Aleksandr V. Moskvichev**, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: rd-vgtu@mail.ru, ORCID: 0000-0002-5468-4095

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТРУБОПРОВОДОВ МЕТОДОМ ПОВЕРХНОСТНОГО НАКЛЕПА

О.В. Уразов<sup>1</sup>, А.Д. Данилов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Филиал АО «Концерн Росэнергоатом» «Нововоронежская атомная станция», г. Нововоронеж, Россия

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

**Аннотация:** представлены результаты экспериментальных исследований процесса восстановления поврежденных поверхностей трубопроводов различных диаметров методом поверхностного наклепа, реализующего явление поверхностного пластического деформирования, приводящее к изменению распределения напряжений по толщине, выполнено обоснование оптимальных режимов его проведения. При этом было осуществлено численное моделирование процесса накатки, определены оптимальные значения следующих параметров: глубины и силы ППД, скорости ППД, подачи ролика, формы рабочей поверхности используемого ролика. При анализе были учтены следующие физико-механические характеристики: глубина наклепа, величина остаточных напряжений, глубина распределения остаточных напряжений, время обкатки, нагрузка на ролик. Доказано очевидное преимущество роликов большего радиуса профиля – они позволяют обеспечить необходимое изменение шероховатости обрабатываемой поверхности при обкатке с большей подачей, что приводит к снижению времени технологического процесса. При этом в принятом диапазоне параметров режимов обкатки (нагрузка 2500÷3000Н, глубина вдавливания 0.04÷0.06мм) величины компонентов остаточных напряжений оказались практически идентичными для исследованных режимов всех рассмотренных роликов. Полученные результаты были положены в основу технологии восстановительного ремонта трубопроводов различного диаметра без остановки производственного процесса на Нововоронежской АЭС и создана промышленная установка с числовым программным управлением для реализации данной технологии

**Ключевые слова:** поверхностный наклеп, роликовая обкатка, поверхностное пластическое деформирование, остаточное напряжение

### Введение

Опыт эксплуатации производственных и энергетических объектов показывает, что абсолютно на всех типах эксплуатируемого оборудования имеются проблемные критические элементы (сварные соединения (СС), узлы, зоны), подверженные образованию и ускоренному развитию эксплуатационных повреждений. В таких случаях возникает необходимость проведения компенсирующих мероприятий, приводящих к восстановлению служебных свойств до приемлемого уровня в целях обеспечения эксплуатационной надежности благодаря повышению прочности деталей машин и конструкций в течение всего срока службы или хотя бы до срока планируемой замены оборудования. Наиболее сложными в плане проведения ремонтных работ являются регулярные случаи повреждения сварных соединений трубопроводов под действием циклических растягивающих напряжений. Задача проведения восстановительного ремонта без остановки технологического процесса в таких случаях является затруднительной [1-4].

На Нововоронежской атомной электростанции была разработана методика и спроектировано оборудование для восстановления поврежденных поверхностей трубопроводов различных диаметров методом поверхностного наклепа, реализующим явление *поверхностного пластического деформирования (ППД)*, приводящее к изменению распределения напряжений по толщине. Серьезный интерес в разработанной технологии представляет обоснование оптимальных режимов проведения ППД, чему и посвящена данная статья.

### Блок-схема исследования

С целью выбора оптимального режима роликовой обкатки было проведено численное моделирование процесса накатки. Находились оптимальные значения следующих параметров:

- глубины и силы ППД;
- скорости ППД;
- подачи ролика;
- формы рабочей поверхности используемого ролика.

При этом учитывались следующие характеристики:

- глубины наклепа;

- величины остаточных напряжений;
- глубины распределения остаточных напряжений;
- время обкатки;

- нагрузка на ролик.

Блок-схема, описывающая проведенные расчеты по определению параметров режима роликовой обкатки, представлена на рис. 1.



Рис. 1. Блок-схема проведенных расчетных исследований

### Выбор оптимальной силы обкатки

Ширина заходной впадины от одного прохода инструмента может быть оценена по формуле

$$2a = 4 \cdot \sqrt{\frac{P}{HB}}$$

где  $P$  – нагрузка на индентор,  $HB$  – твердость обрабатываемого материала.

Эта формула согласуется с результатами численного моделирования процесса вдавливания ролика в накатываемый материал по схеме, представленной на рис. 2.

Диаграммы вдавливания роликов различных размеров в координатах сила  $P$  – глубина вдавливания  $U_1$  представлены на рис. 3. Диаграммы вдавливания, приведенные к координатам сила  $P$  – ширина заходной впадины  $2a$ , представлены на рис. 4. На последнем графике отмечен интервал нагрузок  $\sim 2500 \div 3000$ Н, после которого для всех рассматриваемых размеров ролика диаграммы выполаживаются, из чего следует, что увеличение нагрузки выше этих значений становится малоэффективным.

В дальнейшем нагрузка  $\sim 2500 \div 3000$ Н будет использоваться как базовая.

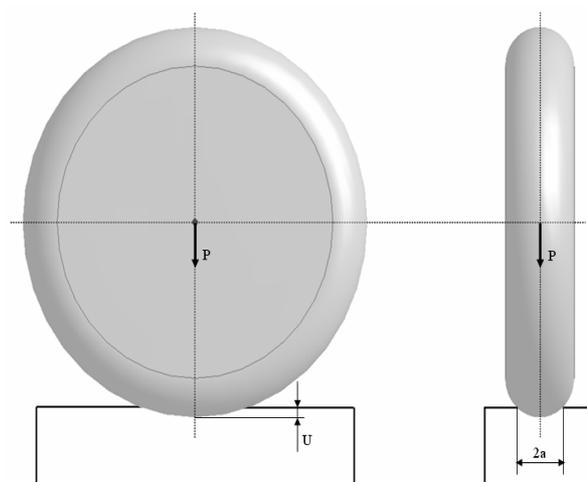


Рис. 2. Схема статического расчета вдавливания ролика

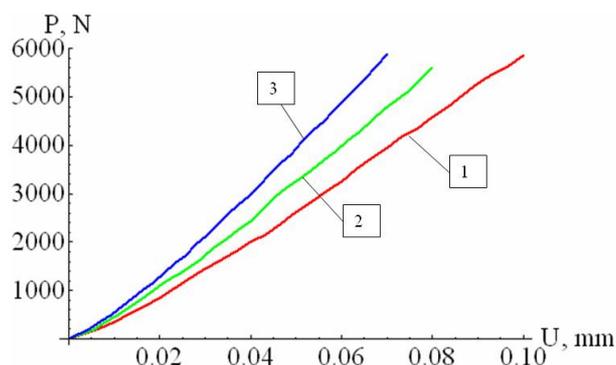


Рис. 3. Расчетные диаграммы вдавливания ролика для радиуса профиля 1.6 мм (1), 2.5 мм (2) и 4 мм (3)

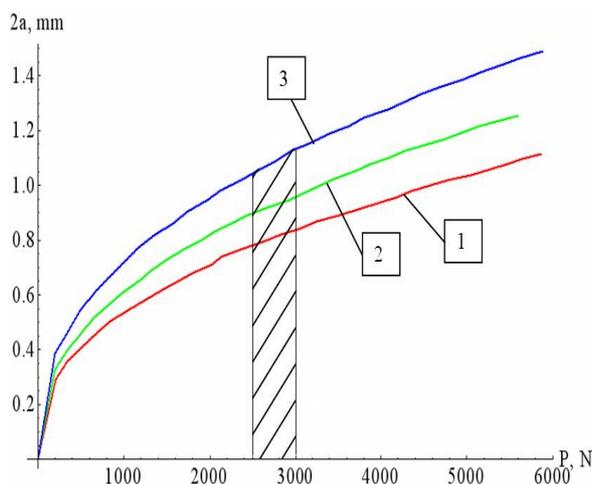


Рис. 4. Перестроенные диаграммы вдавливания ролика для радиуса профиля 1.6 мм (1), 2.5 мм (2) и 4 мм (3) с выделенным диапазоном базовой нагрузки

Глубины вдавливания для каждого из рассматриваемых роликов при выбранных нагрузках (2500÷3000Н) представлены в табл. 1. Эти значения будут в дальнейшем приняты в качестве базовых.

Таблица 1

Расчетные значения глубины и ширины заходной впадины при вдавливании роликов в накатываемый материал

R <sub>гр</sub> , мм	Глубина обработки U <sub>1</sub> , мм	Ширины заходной впадины 2a, мм
1.6	0.05	0.75
2.5	0.044	0.85
4.0	0.035	1.0

### Оценка влияния скорости обкатки

Скорость деформации при прокатке роликом определяется изменением степени деформации ε в единицу времени t:

$$\dot{\epsilon} = \frac{d\epsilon}{dt}$$

Так как относительная деформация ε – величина безразмерная, то равномерная скорость деформации будет иметь размерность 1/с. От скорости деформации следует отличать скорость деформирования – скорость перемещения деформирующего инструмента, имеющую размерность м/с. При одной и той же скорости деформирования скорости деформации могут быть различными. В нашем случае, если исключить проскальзывание ролика, то можно принять, что эти скорости равны в выбранном диапазоне квазистатического деформирования поверхностного слоя от 0.0001 до 10000 мм/мин.

Влияние скорости в нашем случае ограничивается тепловыми явлениями, допустимым биением инструмента, жесткостью и точностью применяемого оборудования. Увеличение скорости сопровождается увеличением вклада вибраций и динамических нагрузок в структурные превращения стали, что может привести к снижению эффективности процедуры упрочнения. Также с увеличением скорости обкатывания помимо роста температуры в зоне обработки наблюдается некоторое снижение степени пластического деформирования, что связано с инерционностью материала [7]. С учетом сказанного, выбираем скорость обкатывания V=1000 мм/мин.

Таким образом, для трубы Ø426x40мм время одного оборота ролика равно:

$$t_{об} = \frac{l}{V} = \frac{\pi \cdot D}{V} = \frac{\pi \cdot 426 \text{ мм}}{1000 \text{ мм/мин}} = 1.34 \text{ мин}$$

### Оценка влияния подачи ролика

Подача ролика S выбирается исходя из требуемого параметра итоговой шероховатости поверхности после обкатки и ширины заходной впадины 2a.

В справочной литературе [7] рекомендованы следующие правила:

- для уменьшения Ra на 0.8 мкм  $2a/S \geq 1.5$ ,
- для уменьшения Ra на 1.1-1.4 мкм  $2a/S \geq 3$ ,
- для уменьшения Ra на 1.4-1.6 мкм  $2a/S \geq 9$ .

Основываясь на этих рекомендациях было принято решение придерживаться соотношения  $2a/S=5$ .

Значения ширин заходной впадины 2a для исследуемых роликов при нагрузках 2500÷3000Н представлены в табл. 2.

Таблица 2

Значения подачи роликов

R <sub>гр</sub> , мм	2a, мм	S, мм
1.6	0.75	2a/5= 0.15
2.5	0.85	2a/5= 0.17
4.0	1.0	2a/5= 0.2

Количество циклов нагружения каждой точки поверхности рассчитывается по формуле

$$N = \frac{2ak}{S}$$

где S – подача, k – число проходов.

Таблица 3

Расчетные значения максимальных нагрузок на ролик для различных режимов накатки

№ режима	Радиус профиля ролика $R_{\text{ПР}}$ , мм	Подача $S$ , мм	Глубина вдавливания $U_1$ , мм	Расчетное усилие			Остаточное смещение $U_{\text{ост}}$ , мм
				$F_x$ , Н	$F_y$ , Н	$F_z$ , Н	
1	2.5	0.1	0.044	108	40	2475	0.0244-0.0382
2	2.5	0.15	0.044	100	40	2004	0.022-0.038
3	2.5	0.2	0.044	97	40	2380	0.0197-0.0381
4	4	0.1	0.035	75	35	2255	0.0195-0.0293
5	4	0.2	0.035	70	35	2255	0.0154-0.0296
6	4	0.3	0.035	60	32	2200	0.015-0.0295

Таблица 4

Расчетные значения максимальных нагрузок на ролики различной формы

№ режима	Радиус профиля ролика $R_{\text{ПР}}$ , мм	Подача $S$ , мм	Глубина вдавливания $U_1$ , мм	Расчетное усилие			Остаточное смещение $U_{\text{ост}}$ , мм
				$F_x$ , Н	$F_y$ , Н	$F_z$ , Н	
1	1.6	0.1	0.050	145	45	2730	0.043
2	2.5	0.15	0.044	110	45	2805	0.037
3	4	0.2	0.035	70	40	2600	0.028

Разрушение поверхностного слоя может происходить не только при силе, превосходящей критическую, но и при небольшой нагрузке, если  $N$  слишком велико. В этом случае разрушение поверхности носит периодический характер. Допустимое  $N$  в большой мере зависит от марки обрабатываемого материала. С учетом этого, а также исходя из соображений оптимизации времени процесса число проходов  $k$  выбрано равным 1.

Уменьшение подачи  $S$  приводит, с одной стороны, к увеличению времени накатки, а с другой – снижению шероховатости. Величина подачи связана с параметром шероховатости  $R_z$  по формуле

$$R_z = R_{\text{ПР}} - \frac{\sqrt{4 R_{\text{ПР}}^2 - S^2}}{2}$$

где  $R_{\text{ПР}}$  - радиус профиля ролика.

По полученным результатам отчетливо заметно увеличение разницы между остаточными смещениями поверхностного слоя в начале и в конце прохода с ростом подачи  $S$ , а также возникновение волнистости на поверхности материала при больших значениях подачи  $S$ .

Вывод – выбираем средние значения рассмотренных диапазонов подачи  $S$ , приводящие к компромиссному решению между параметрами получаемой поверхности и временем обкатки:

$$S = 0.15 \text{ мм при } R_{\text{ПР}} = 2.5 \text{ мм}$$

$$S = 0.2 \text{ мм при } R_{\text{ПР}} = 4.0 \text{ мм}$$

Анализ значений времени обкатки показал их достаточно значительными, что говорит о преимуществах использования роликов максимальных размеров ( $R_{\text{ПР}} = 4.0$  мм), позволяющих работать при больших значениях подачи  $S$ .

Следует отметить, что в процессе ППД глубину обработки нужно увеличивать постепенно до выбранного максимального значения, т.к. подобный подход обеспечивает плавное распределение остаточных напряжений по длине трубы. В случае обработки с одной глубиной по всей длине трубы на границе обрабатываемой поверхности может возникнуть высокий градиент остаточных напряжений, а также значительные растягивающие напряжения в верхней точке наплыва перед роликом, что негативно скажется на усталостных свойствах материала.

### Оценка влияния геометрических размеров ролика

Для сравнительного анализа влияния размеров роликов было произведено моделирование процесса обкатки с постоянной в три прохода с одним рабочим проходом и с глубиной обкатки  $U_1$  (табл. 4).

Анализ распределения остаточных напряжений по глубине показал схожесть полученных результатов для различных роликов, что говорит о равной эффективности обработки каждым из них. В данном случае при выборе оптимального размера ролика необходимо использовать другие параметры сравнения.

В качестве параметра сравнения можно использовать время обработки. В таком случае предпочтительными становятся ролики большего радиуса ( $R_{\text{ПР}}=2.5 / 4.0$  мм), для которых, исходя из большей ширины заходной впадины  $a$ , можно использовать большую подачу  $S$  при сохранении выбранных пределов изменения шероховатости, что приведет к существенному уменьшению времени процесса обкатки. Например, время обработки идентичной площади образца при использовании роликов с  $R_{\text{ПР}}= 1.6$  мм и  $R_{\text{ПР}}= 4.0$  мм при идентичных нагрузках и различных подачах отличается в 1.3 раза. Помимо этого, ролик с  $R_{\text{ПР}}= 4.0$ мм характеризуется меньшими значениями нагрузок в направлениях  $X$  и  $Y$ , которые могут вносить дополнительные погрешности, вызванные жесткостью конструкций оборудования.

### Оценка влияния глубин обработки

Для определения оптимальных глубин обработки было произведено моделирование процесса обкатки для рассматриваемых роликов ( $R_{\text{ПР}}= 1.6/2.5/4.0$  мм). Описание рассматриваемых режимов представлено в табл. 5.

Таблица 5  
Рассмотренные глубины обработки

Ролик	Глубина обработки, мм		
	Режим 1 $U_1$	Режим 2 $U_2$	Режим 3 $U_3$
$R_{\text{ПР}}=1.6$	0.05	0.045	0.055
$R_{\text{ПР}}=2.5$	0.044	0.04	0.05
$R_{\text{ПР}}=4.0$	0.035	0.0315	0.0385

Здесь:  $U_1$  – базовая глубина статического вдавливания ролика;  $U_2 \approx 0.9 U_1$ ;  $U_3 \approx 1.1 U_1$ .

Первый режим характеризуется глубиной обработки  $U_1$ , соответствующей нагрузке 2500÷3000Н. Он был рассмотрен в предыдущем разделе.

Второй режим характеризуется пониженной глубиной обработки  $U_2$ , с целью снижения нагрузок на ролик и конструкцию в целом.

Третий режим характеризуется повышенной глубиной обработки  $U_3$ , с целью достижения больших величин и глубин остаточных напряжений при тех же значениях максимальных нагрузок, что и при обработке с глубиной  $U_1$ . Это осуществляется путем ступенчатого вдавливания (выбранная глубина вдавливания

достигается при движении ролика по поверхности образца).

Максимальные нагрузки на ролик для рассмотренных режимов представлены в табл. 6.

Таблица 6

### Максимальные нагрузки на ролик

Ролик	Режим	$F_x$ , Н	$F_y$ , Н	$F_z$ , Н
$R_{\text{ПР}}=1.6$	1	145	45	2730
	2	125	35	2425
	3	150	55	2780
$R_{\text{ПР}}=2.5$	1	110	45	2805
	2	95	35	2500
	3	115	55	3010
$R_{\text{ПР}}=4.0$	1	70	40	2600
	2	60	30	2300
	3	70	45	2600

По полученным результатам анализа рассмотренных глубин обкатки можно сделать следующие выводы:

1. В принятом диапазоне параметров режимов обкатки (Нагрузка 2500÷3000Н, глубина вдавливания 0.04÷0.06мм) величины компонентов остаточных напряжений оказались практически идентичными для всех рассмотренных режимов для всех рассмотренных роликов.

2. Глубина распределения остаточных напряжений, которая слабо колеблется в пределах 1÷1.5мм, а также величины максимальных нагрузок на ролик. Таким образом, в рамках выбранного диапазона выбор глубины вдавливания не является существенным.



Рис. 5. Установка для поверхностного упрочнения зоны повреждения сварных соединений  $\varnothing 426 \times 40$

### Заключение

В результате проведенных экспериментальных исследований процесса восстановления поврежденных поверхностей трубопрово-

дов различных диаметров методом поверхностного наклепа, реализующего явление *поверхностного пластического деформирования*, приводящее к изменению распределения напряжений по толщине, было проведено обоснование оптимальных режимов проведения ППД.

Для этого было выполнено численное моделирование процесса накатки, при этом определены оптимальные значения следующих параметров: глубины и силы ППД; скорости ППД; подачи ролика; формы рабочей поверхности используемого ролика.

При этом были учтены следующие характеристики: глубина наклепа; величина остаточных напряжений; глубина распределения остаточных напряжений; время обкатки; нагрузка на ролик.

Полученные результаты были положены в основу технологии восстановительного ремонта трубопроводов различного диаметра без остановки производственного процесса на Нововоронежской АЭС и создана промышленная установка с числовым программным управлением для реализации данной технологии (рис. 5).

В соответствии с экспертной оценкой экономический эффект в случае применения технологии восстановления поврежденных поверхностей методом поверхностного наклепа соединительного (дыхательного) трубопровода между главным циркуляционным трубопроводом и компенсатором давления составляет 825 440,44 рублей в год. Кроме этого сокращается срок простоя энергоблока ежегодно на 14 суток, что позволяет за счет дополнительно

произведенной электроэнергии увеличить выручку предприятия более чем на 400 млн. рублей ежегодно.

#### Литература

1. Поваров В.П., Бакиров М.Б., Данилов А.Д. Автоматизированная система многопараметрического мониторинга параметров состояния энергетических установок АЭС. Воронеж: Научная книга, 2017. 276 с.
2. Поваров В.П., Бакиров М.Б., Данилов А.Д. Обработка данных в системе непрерывного мониторинга эксплуатационной повреждаемости критических элементов энергетических установок // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2018. Т. 14. № 1. С. 64-72.
3. Intellectual decision-making system in the context of potentially dangerous nuclear power facilities / A. Danilov, V. Burkovsky, S. Podvalny, K. Gusev, V. Povarov // MATEC Web of Conferences. 13. Sep. "13th International Scientific-Technical Conference on Electromechanics and Robotics "Zavalishin's Readings". 2018. P. 2009.
4. Data support system for controlling decentralised nuclear power industry facilities through uninterrupted condition monitoring / V. Povarov, A. Danilov, V. Burkovsky, K. Gusev // MATEC Web of Conferences. 13. Sep. "13th International Scientific-Technical Conference on Electromechanics and Robotics "Zavalishin's Readings". 2018. P. 2012.
5. Расчетно-экспериментальная оценка влияния термической стратификации на эксплуатационную нагруженность дыхательного трубопровода энергоблока № 5 Нововоронежской АЭС / В.П. Поваров, О.В. Уразов, М.Б. Бакиров, В.И. Левчук // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. 2017. № 1. С. 5-16.
6. Restoration of metal properties of circulation pump blades by the method of surface ultrasonic impact treatment / V.P. Povarov, O.V. Urazov, M.B. Bakirov, S.S. Pakhomov, I.A. Belunik // Thermal Engineering. 2017. Т. 64. № 10. С. 762-769.
7. Адашкин А.М., Седов Ю.Е., Онегина А.К. Материаловедение в машиностроении. М.: Издательство Юрайт, 2020. Ч. 1. 258 с.

Поступила 06.09.2021; принята к публикации 19.10.2021

#### Информация об авторах

**Уразов Олег Владимирович** – заместитель директора, филиал АО «Концерн Росэнергоатом», «Нововоронежская атомная станция» (396072, Россия, Воронежская обл., г. Нововоронеж, Промышленная зона Южная, 1), e-mail: urazovov@nvnpp1.rosenergoatom.ru

**Данилов Александр Дмитриевич** – д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), e-mail: danilov-ad@yandex.ru

### INVESTIGATION OF THE PROCESS OF RESTORATION OF DAMAGED PIPELINE SURFACES BY THE METHOD OF SURFACE RIVETING

O.V. Urazov<sup>1</sup>, A.D. Danilov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Branch of JSC "Concern Rosenergoatom" "Novovoronezh Nuclear Power Plant",  
Novovoronezh, Russia

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

**Abstract:** here we present the results of experimental studies of the process of restoration of damaged surfaces of pipelines of various diameters by the method of surface work hardening, which implements the phenomenon of surface plastic deformation, leading to a change in the distribution of stresses along the thickness. At the same time, we carried out a numerical simulation of the knurling process, we determined the optimal values of the following parameters: the depth and strength of the SPD, the speed of the SPD, the feed of the roller, the shape of the working surface of the roller used. The analysis took into account the following physical and mechanical characteristics: work hardening depth, residual stress value, residual stress distribution depth, running time, roller load. We proved the obvious advantage of rollers with a larger profile radius - they allow one to provide the necessary change in the roughness of the machined surface during rolling with a higher feed, which leads to a decrease in the time of the technological process. In this case, in the accepted range of parameters of the running modes (load 2500-3000N, indentation depth 0.04-0.06 mm), the values of the residual stress components turned out to be almost identical for the considered modes for all the considered rollers. We used the results as the basis for the technology of restorative repair of pipelines of various diameters without stopping the production process at the Novovoronezh NPP and an industrial unit with numerical control was created to implement this technology

**Key words:** surface riveting, roller running-in, surface plastic deformation, residual stress

### References

1. Povarov V.P., Bakirov M.B., Danilov A.D. "Automated system of multiparametric monitoring of parameters of the state of NPP power plants" ("Avtomatizirovannaya sistema mnogoparametricheskogo monitoringa parametrov sostoyaniya energeticheskikh ustanovok AES"), Voronezh: Nauchnaya kniga, 2017, 276 p.
2. Povarov V.P., Bakirov M.B., Danilov A.D. "Data processing in the system of continuous monitoring of operational damage of critical elements of power plants", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2018, vol. 14, no. 1, pp. 64-72.
3. Danilov A., Burkovsky V., Podvalny S., Gusev K., Povarov V. "Intellectual decision-making system in the context of potentially dangerous nuclear power facilities", *MATEC Web of Conferences: 13th International Scientific-Technical Conference on Electromechanics and Robotics, Zavalishin's Readings 2018*, pp. 2009.
4. Povarov V., Danilov A., Burkovsky V., Gusev K. "Data support system for controlling decentralised nuclear power industry facilities through uninterruptible condition monitoring", *MATEC Web of Conferences: 13th International Scientific-Technical Conference on Electromechanics and Robotics, Zavalishin's Readings 2018*, pp. 2012.
5. Povarov V.P., Urazov O.V., Bakirov M.B., Levchuk V.I. "Computational and experimental assessment of the effect of thermal stratification on the operational load of the breathing pipeline of the Novovoronezh NPP Unit No. 5", *News of Higher Educational Institutions. Nuclear Power Engineering (Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Yadernaya energetika)*, 2017, no. 1, pp. 5-16.
6. Povarov V.P., Urazov O.V., Bakirov M. B., Pakhomov S.S., Belunik I.A. "Restoration of metal properties of circulation pump blades by the method of surface ultrasonic impact treatment", *Thermal Engineering*, 2017, vol. 64, no. 10, pp. 762-769.
7. Adaskin A.M., Sedov Yu.E., Onegina A.K. "Materials science in mechanical engineering" ("Materialovedenie v mashinostroenii"), Moscow: Yurayt, 2020, 258 p.

Submitted 06.09.2021; revised 19.10.2021

### Information about the authors

**Oleg V. Urazov**, Deputy Director, branch of JSC "Concern Rosenergoatom" Novovoronezh Nuclear Power Plant (1 Yuzhnaya Industrial Zone, Novovoronezh 396072, Voronezh region, Russia), e-mail: urazovov@nvnpp1.rosenergoatom.ru

**Aleksandr D. Danilov**, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 324006, Russia), e-mail: danilov-ad@yandex.ru