
ДОКЛАДЫ БГУИР

Выходит два раза в квартал

Научный журнал издается с января 2003 года

*Журнал зарегистрирован в Министерстве информации Республики Беларусь,
свидетельство о регистрации № 1087 от 23.01.2010 г.*

Входит в Перечень научных изданий Республики Беларусь
для опубликования результатов диссертационных исследований,
включен в базу данных Российского индекса научного цитирования (РИНЦ)

Главный редактор

Вадим Анатольевич Богуш

Ректор Белорусского государственного университета
информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь

Редакционная коллегия:

Л.М. Лыньков (зам. главного редактора),
А.Н. Осипов (зам. главного редактора),
Т.В. Борботько (ответственный секретарь),
М.П. Батура, В.Е. Борисенко, А.Л. Гурский, С.Е. Карпович,
В.К. Конопелько, А.П. Кузнецов, А.А. Кураев, В.А. Лабунов,
В.В. Муравьев, Писецкий Ю.В., Сигов А.С., М.М. Татур

Редакционный совет:

И.И. Абрамов, В.Е. Агабеков, И.С. Азаров, В.В. Баранов, А.И. Белоус,
И.В. Боднар, С.В. Бордусов, С.В. Гапоненко, Н.В. Гапоненко, В.В. Голенков,
В.Ф. Голиков, Л.И. Гурский, А.П. Достанко, В.А. Емельянов, А.А. Иванов,
В.М. Колешко, Ф.Ф. Комаров, Ф.П. Коршунов, В.А. Куренев, В.И. Курмашев,
Н.И. Листопад, В.Е. Матюшков, Ф.И. Пантелеенко, В.А. Пилипенко, С.Л. Прищеп,
А.М. Русецкий, Н.К. Толочко, А.А. Хмыль, В.Ю. Цветков,
В.В. Цегельник, Г.П. Яблонский, В.Н. Ярмолик

Адрес редакции: ул. П. Бровки, 6, к. 326, г. Минск, 220013, Беларусь

Телефон редакции: +375-17-293-88-41

Web-сайт: www.doklady.bsuir.by; e-mail: doklady@bsuir.by

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОНИКА, РАДИОФИЗИКА, РАДИОТЕХНИКА, ИНФОРМАТИКА

Ключеня В.В. Проектирование процессора вычисления дискретного косинусного преобразования для систем сжатия изображения по схеме losless-to-lossy	5
Щербаков С.С., Полещук М.М. Ускорение гранично-элементных расчетов для замкнутой области с использованием нелинейных функций формы и технологии CUDA	14
Нгуен Т.Д., Занько А.И., Голосов Д.А., Завадский С.М., Мельников С.Н., Колос В.В., То Т.К. Влияние отжига на структурно-фазовые и электрофизические свойства пленок оксида ванадия	22

Ковалевич Д.А. Способ автоматического согласования антенны и выходных каскадов передатчика	31
Емельянов В.А., Шершнев Е.Б., Соколов С.И. Двухлучевая лазерная очистка кварцевого сырья	40
Кожевников М.М., Чумаков О.А., Илюшин И.Э., Юркина А.А. Методика оптимизации положения робота-манипулятора в технологическом процессе лазерной резки	49
Ланин В.Л., Фам В.Т., Лаппо А.И. Формирование отверстий в кремниевой подложке 3D-электронного модуля лазерным излучением.....	58
Шалькевич П.К., Кундас С.П. Верификация численных методов и математической модели, разработанных для моделирования миграции радионуклидов в природных дисперсных средах.....	66
Архипенков Д.В. Анализ программ для расчета системных характеристик сверхширокополосных радиоприемных трактов.....	75
Гусинский А.В., Касперович М.М., Богуш В.А. Повышение точности и метрологическое обеспечение измерителей мощности в диапазоне частот от 37,5 до 178,6 ГГц.....	81
Оспанов Р.М., Сейткулов Е.Н., Ергалиева Б.Б., Сисенов Н.М. Пример внутренней функции для схемы Sponge, построенной на основе обобщенной методологии проектирования AES	89
Утин Л.Л., Павловский А.В., Ольховик А.А., Макатерчик А.В. Анализ результатов опытной эксплуатации комплекса охраны протяженных периметров ВМ 8018.....	96
Penialosa Ovalies D.I., Voiprav O.V., Tumilovich M.V., Lynkou L.M. Electromagnetic radiation shielding composite coatings based on powdered alumina and iron oxide	104

Корректурa и верстка Л.В. КОНДАКОВА

Компьютерный дизайн О.В. БОЙПРАВ, Т.В. МИРОНЕНКО

Подписано в печать 26.05.2021. Формат 60×84 ¼. Бумага офсетная. Отпечатано на ризографе.

Усл. печ. л. 13,25. Уч.-изд. л. 11,5. Тираж 100 экз. Заказ 66.

Индекс для индивидуальной подписки 00787.

Индекс для ведомственной подписки 007872.

Издатель: учреждение образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники». Свидетельство о государственной регистрации средства массовой информации № 1087 от 23.01.2010.

Отпечатано в БГУИР. ЛП № 02330/264 от 14.04.2014. 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6.

© УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», 2021

DOKLADY BGUIR

Published twice quarterly

The journal has been published since January, 2003

The journal was registered on January 23, 2010 by the Ministry of Information of the Republic of Belarus in the State Registry of Mass Media, reg. No. 1087.

The journal included in the List of Scientific Editions for Publication of the Results of Dissertation Researches in the Republic of Belarus and in the Database of Russian Science Citation Index (RSCI)

Editor-In-Chief

Vadim Anatol'evich Bogush

Rector of the Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus

Address of editorial office: P. Brovka str., 6, rm 326, Minsk, 220013, Belarus

Phone number of editorial office: +375-17-293-88-41

Web-site: www.doklady.bsuir.by; e-mail: doklady@bsuir.by

CONTENTS

ELECTRONICS, RADIOPHYSICS, RADIOENGINEERING, INFORMATICS

Kliuchenia V.V. Design of a discrete cosine transformation processor for image compression systems on a lossless-to-lossy circuit	5
Sherbakov S.S., Polestchuk M.M. Acceleration of boundary element calculations for closed domain using nonlinear form functions and CUDA technology	14
Nguen T.D., Zanko A.I., Golosov D.A., Zavadski S.M., Melnikov S.N., Kolos V.V., To T.Q. Influence of annealing on structure, phase and electrophysical properties of vanadium oxide films.....	22
Kovalevich D.A. Method for automatic antenna matching with transmitter output stage.....	31
Emelyanov V.A., Shershnev E.B., Sokolov S.I. Two-beam laser purification of quartz raw material	40
Kazheunikau M.M., Chumakou O.A., Iliushin I.E., Jurkina A.A. Method of optimization of the robot-manipulator position in the technological process of laser cutting	49
Lanin V.L., Pham V.T., Lappo A.I. Through-silicon-via formation of 3D electronic modules by laser radiation.....	58
Shalkevich P.K., Kundas S.P. Verification of numerical methods and mathematical model developed for simulation of radionuclides migration in natural disperse environments	66
Arkhipenkov D.V. Analysis of programs for calculation of the system characteristics of ultra-wide range receiving paths.....	75

Gusinsky A.V., Kasperovich M.M., Bogush V.A. Improving the accuracy and metrological support of power meters in the frequency range from 37.5 to 178.6 GHz	81
Ospanov R.M., Seitkulov Ye.N., Yergaliyeva B.B., Sisenov N.M. Example of internal function for Sponge scheme built on the basis of the generalized AES design methodology ..	89
Utin L.L., Pavlovsky A.V., Olkhovik A.A., Makatserchyk A.V. Analysis results of experimental operation of the protection complex of long perimeters VM 8018.....	96
Penialosa Ovalies D.I., Boiprav O.V., Tumilovich M.V., Lynkou L.M. Electromagnetic radiation shielding composite coatings based on powdered alumina and iron oxide	104



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2021-19-3-5-13>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 004.031.6; 004.627

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОРА ВЫЧИСЛЕНИЯ ДИСКРЕТНОГО КОСИНУСНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ДЛЯ СИСТЕМ СЖАТИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ ПО СХЕМЕ LOSLESS-TO-LOSSY

В.В. КЛЮЧЕНЯ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(Минск, Республика Беларусь)*

Поступила в редакцию 23 июля 2020

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2021

Аннотация. На сегодняшний день широко распространены мобильные мультимедийные системы, которые используют стандарты H.261/3/4/5, MPEG-1/2/4 и JPEG для кодирования/декодирования видео, аудио и изображений [1–4]. Ядром этих стандартов является дискретное косинусное преобразование (ДКП) I, II, III ... VIII типов [ДКП]. Широкая поддержка в огромном количестве мультимедийных приложений формата JPEG схемотехническими и программными решениями и необходимость кодирования изображений по схеме L2L обуславливает актуальность проблемы создания декоррелирующего преобразования на основе ДКП и методов быстрого прототипирования процессоров вычисления целочисленного ДКП на программируемых системах на кристалле ПЛИС/FPGA. При этом во внимание принимаются такие характеристики, как структурная регулярность, модульность, высокий вычислительный параллелизм, малая латентность и потребляемая мощность. Прямое и обратное преобразования должны осуществляться по схеме обработки «целое к целому» с сохранением перфективной реконструкции исходного изображения (коэффициенты представляются целыми или двоичными рациональными числами; число операций умножения минимально, по возможности они исключаются из алгоритма). Известные целочисленные ДКП (BinDCT, IntDCT) не дают полного обратимого бит в бит преобразования. Для кодирования изображения по схеме L2L требуется, чтобы декоррелирующее преобразование было обратимым и реализовано в целочисленной арифметике, т. е. преобразование соответствовало бы схеме обработки «целое-в-целое» при минимальном числе операций округления, влияющих на компактность энергии в эквивалентных субполосах преобразования. В данной статье показано, как на основе целочисленного прямого и обратного ДКП создать новую универсальную архитектуру декоррелирующего преобразования на ПЛИС типа FPGA для систем трансформационного кодирования изображений, которые работают по принципу lossless-to-lossy (L2L), и получить лучшие экспериментальные результаты по объективным и субъективным показателям по сравнению с аналогичными системами сжатия.

Ключевые слова: ДКП, дискретное косинусное преобразование, L2L, lossless-to-lossy, архитектура, FPGA (Field-Programmable Gate Array), блочная лестничная структурная параметризация, БЛСП.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Ключеня В.В. Проектирование процессора вычисления дискретного косинусного преобразования для систем сжатия изображения по схеме losless-to-lossy. Доклады БГУИР. 2021; 19(3): 5-13.

DESIGN OF A DISCRETE COSINE TRANSFORMATION PROCESSOR FOR IMAGE COMPRESSION SYSTEMS ON A LOSSLESS-TO-LOSSY CIRCUIT

VITALY V. KLIUCHENIA

Belarusian State University Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 23 July 2020

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2021

Abstract. Today, mobile multimedia systems that use the H.261 / 3/4/5, MPEG-1/2/4 and JPEG standards for encoding / decoding video, audio and images are widely spread [1–4]. The core of these standards is the discrete cosine transform (DCT) of I, II, III ... VIII types [DCT]. Wide support in a huge number of multimedia applications of the JPEG format by circuitry and software solutions and the need for image coding according to the L2L scheme determines the relevance of the problem of creating a decorrelated transformation based on DCT and methods for rapid prototyping of processors for computing an integer DCT on programmable systems on a FPGA chip. At the same time, such characteristics as structural regularity, modularity, high computational parallelism, low latency and power consumption are taken into account. Direct and inverse transformation should be carried out according to the “whole-to-whole” processing scheme with preservation of the perfective reconstruction of the original image (the coefficients are represented by integer or binary rational numbers; the number of multiplication operations is minimal, if possible, they are excluded from the algorithm). The well-known integer DCTs (BinDCT, IntDCT) do not give a complete reversible bit to bit conversion. To encode an image according to the L2L scheme, the decorrelated transform must be reversible and implemented in integer arithmetic, i. e. the conversion would follow an “integer-to-integer” processing scheme with a minimum number of rounding operations affecting the compactness of energy in equivalent conversion subbands. This article shows how, on the basis of integer forward and inverse DCTs, to create a new universal architecture of decorrelated transform on FPGAs for transformational image coding systems that operate on the principle of “lossless-to-lossy” (L2L), and to obtain the best experimental results for objective and subjective performance compared to comparable compression systems.

Keywords: DCT, discrete cosine transform, L2L, lossless-to-lossy, architecture, FPGA (Field-Programmable Gate Array), block staircase structural parameterization, BLSP.

Conflict of interests. The author declares no conflict of interests.

For citation. Kliuchenia V.V. Design of a discrete cosine transformation processor for image compression systems on a lossless-to-lossy circuit. Doklady BGUIR. 2021; 19(3): 5-13.

Введение

В настоящее время особый интерес представляют схемы компрессии изображений, работающие по принципу L2L (lossless-to-lossy), осуществляющие сжатие и восстановление цифровых изображений как без потерь (режим lossless – декоррелирующее преобразование обратимо и реализуется в целочисленной арифметике), так и с контролируемым внесением артефактов (режим lossy). Кодирование по принципу L2L унифицирует схемы сжатия цифровых изображений в режимах lossy и lossless, когда требуется высокое качество и степень компрессии. Это обеспечивает возможность широкого применения схем кодирования изображений в соответствии с мультимедийными приложениями. Например, в стандартах JPEG [1], JPEG-LS [2] и JPEG2000 [3] режимы lossless и lossy не имеют между собой совместимости, так как декоррелирующие преобразования оптимизированы для работы в своем режиме. В стандарте JPEG XR [4] поддерживается схема L2L, однако эффективность кодирования недостаточная, особенно для изображений, у которых много высокочастотных компонент.

Выбор декоррелирующего преобразования для кодирования изображения по схеме L2L: lossless-to-lossy

В системах трансформационного кодирования изображений используется двумерное разделимое дискретное косинусное преобразование, где обработка сначала идет по строкам, а потом – по столбцам. Для блока изображения размера $M \times M$ пикселей процесс математически описывается выражением

$$\mathbf{y} = (\mathbf{C}(\mathbf{C}\mathbf{x})^T)^T = \mathbf{C}\mathbf{x}\mathbf{C}^T, \quad (1)$$

где \mathbf{x} – блок исходного изображения; \mathbf{y} – результат обработки; \mathbf{C} – матрица прямого преобразования ДКП; \mathbf{C}^T – транспонированная матрица или матрица обратного преобразования ДКП (ОДКП) $\mathbf{D} = \mathbf{C}^{-1} = \mathbf{C}^T$. Как правило, выбирается дискретное косинусное преобразование II типа или ДКП-II размера N :

$$[\mathbf{C}]_{m,n} = \sqrt{\frac{2}{M}}c_m \cos(m(n+1/2)\pi/M); [\mathbf{D}]_{m,n} = \sqrt{\frac{2}{M}}c_n \cos(n(m+1/2)\pi/M), \quad (2)$$

где $0 \leq m, n \leq M-1$; $[\mathbf{C}]_{m,n}$ – матрица прямого ДКП II типа; $[\mathbf{D}]_{m,n}$ – матрица ДКП III типа, являющаяся обратной для ДКП II типа; m – количество столбцов; n – количество строк; $M = 2^n$ ($n \in \mathbb{N}$); $c_m = 1/\sqrt{2}$ для $m=0$ и $c_m = 1$ при $m \neq 0$; $c_n = 1/\sqrt{2}$ для $n=0$ и $c_n = 1$ при $n \neq 0$.

Системы трансформационного кодирования изображений на основе ДКП являются системами сжатия с потерями данных. В статье [5] предлагается новый класс блочной лестничной структурной параметризации (БЛСП) для трансформационных преобразований, которая позволяет строить преобразователи в формате фиксированной запятой со свойством перфективного или полного восстановления данных, у которых коэффициент компрессии выше, чем на основе базовых лестничных структур [6] за счет уменьшения узлов округления путем объединения многих операций округления. Так, векторы \mathbf{x}_i и \mathbf{x}_j входных данных размера $M \times 1$ преобразуются в векторы \mathbf{y}_i и \mathbf{y}_j выходных данных на основе преобразования формата $M \times M$, невырожденные матрицы которого \mathbf{T} и \mathbf{T}^{-1} :

$$\begin{bmatrix} \mathbf{y}_i \\ \mathbf{y}_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{T} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{T}^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_i \\ \mathbf{x}_j \end{bmatrix}. \quad (3)$$

БЛСП трансформационного преобразования представляется как

$$\begin{bmatrix} \mathbf{T} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{T}^{-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{I} \\ -\mathbf{I} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{0} \\ \mathbf{T} & \mathbf{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{I} & -\mathbf{T}^{-1} \\ \mathbf{0} & \mathbf{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{0} \\ \mathbf{T} & \mathbf{I} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где $\mathbf{0}$ – нулевая матрица и \mathbf{I} – единичная матрица размера $M \times M$. В качестве матриц трансформационного преобразования \mathbf{T} и \mathbf{T}^{-1} могут выступать матрицы любых декоррелирующих преобразований. Операции округления производятся после умножения на матрицу преобразования \mathbf{T} , и число их уменьшается с M^2 до M .

Перфективное целочисленное двумерное трансформационное преобразование ДКП на основе блочной лестничной структурной параметризации ДКП-ОДКП определяется следующими разложениями:

– прямое преобразование (рис. 1, а)

$$\begin{bmatrix} \mathbf{C}_{2D} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{D}_{2D} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{I} \\ -\mathbf{I} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{0} \\ \mathbf{C}_{2D} & \mathbf{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{I} & -\mathbf{D}_{2D} \\ \mathbf{0} & \mathbf{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{0} \\ \mathbf{C}_{2D} & \mathbf{I} \end{bmatrix}; \quad (5)$$

– обратное преобразование (рис. 1, б)

$$\begin{bmatrix} \mathbf{C}_{2D} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{D}_{2D} \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} \mathbf{D}_{2D} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{C}_{2D} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{0} \\ -\mathbf{C}_{2D} & \mathbf{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{I} & -\mathbf{D}_{2D} \\ \mathbf{0} & \mathbf{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{0} \\ -\mathbf{C}_{2D} & \mathbf{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{0} & -\mathbf{I} \\ \mathbf{I} & \mathbf{0} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

где \mathbf{C}_{2D} и \mathbf{D}_{2D} – матрицы прямого и обратного двумерного целочисленного ДКП.

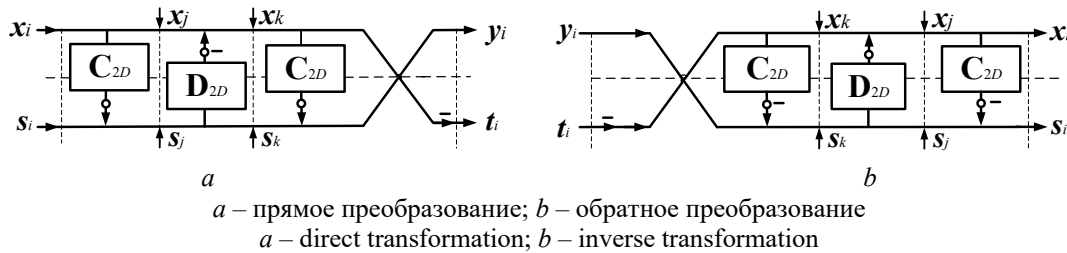


Рис. 1. Схема вычисления двумерного трансформационного преобразования ДКП на основе БЛСП: ДКП-ОДКП (кружок обозначает операцию округления)
Fig. 1. The calculation scheme of the two-dimensional transformation of DCT based on BLSP: DCT-IDCT (circle indicates rounding operation)

Анализ амплитудно-частотных и импульсных характеристик восьмиточечного прямого и обратного ДКП (см. рис. 2) показывает, что прямое ДКП является равнополосным максимально децимированным банком фильтров [7] с линейной фазочастотной характеристикой (импульсные характеристики обладают свойством симметрии), постоянная составляющая локализована первым фильтром банка. Все фильтры ОДКП имеют постоянную составляющую, т. е. происходит утечка энергии нулевой частоты в высокочастотные составляющие (эффект DC leakages). Это приводит к потере свойства регулярности первого рода банком фильтров ДКП-ОДКП, и в реконструированном изображении в системе преобразования ДКП-ОДКП на основе БЛСП будет проявляться артефакт «шахматной доски».

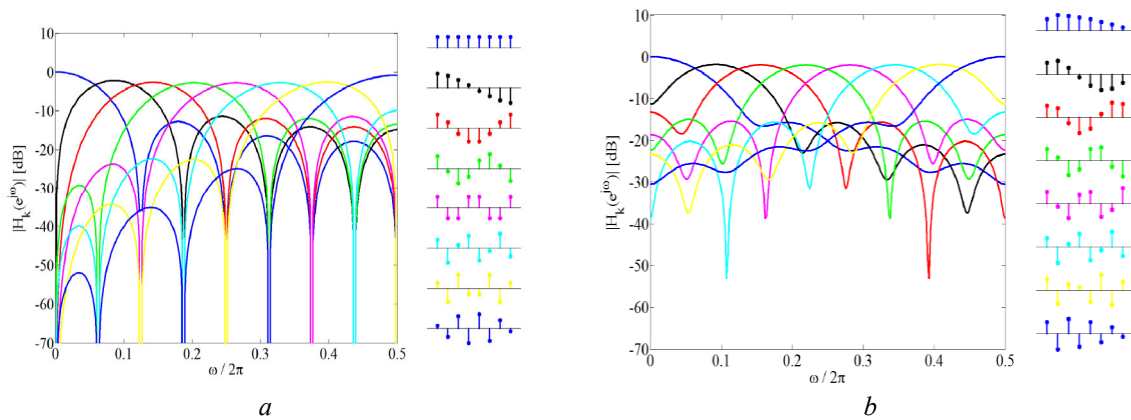


Рис. 2. Амплитудно-частотные и импульсные характеристики 8-точечного прямого (а) и обратного ДКП (b)
Fig. 2. The amplitude-frequency and impulse characteristics of the 8-point direct DCT (a) and invers DCT (b)

Обратимое «целое к целому» декоррелирующее преобразование ДКП-ОДКП

Японские исследователи Сузуки и Икехара предложили совершенное 2D целочисленное декоррелирующее преобразование на основе БЛСП: ДКП-ОДКП с включенным дополнительным модулем ОДКП обработки ошибки округления (SIB-блоком) при вычислении преобразования каждого $M \times M$ блока изображения, в котором отсутствует артефакт «шахматной доски» в реконструированном изображении [5, 6, 8]: $s_i = \mathbf{D}_{2D} s_{i-1}$ для $i=1,2,\dots,n-1$, s_0 является нулевой матрицей. Формулы для прямого и обратного преобразований для всех n -блоков изображения имеют следующий вид:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{y}_0 \\ \vdots \\ \mathbf{y}_{n-1} \\ \mathbf{s}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{2D} & \cdots & \cdots & \mathbf{0} \\ \vdots & \ddots & & \vdots \\ \vdots & & \mathbf{C}_{2D} & \vdots \\ \mathbf{0} & \cdots & \cdots & \mathbf{D}_{2D}^n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_0 \\ \vdots \\ \mathbf{x}_{n-1} \\ \mathbf{s}_0 \end{bmatrix}; \begin{bmatrix} \mathbf{x}_0 \\ \vdots \\ \mathbf{x}_{n-1} \\ \mathbf{s}_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{2D} & \cdots & \cdots & \mathbf{0} \\ \vdots & \ddots & & \vdots \\ \vdots & & \mathbf{C}_{2D} & \vdots \\ \mathbf{0} & \cdots & \cdots & \mathbf{D}_{2D}^n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{y}_0 \\ \vdots \\ \mathbf{y}_{n-1} \\ \mathbf{s}_n \end{bmatrix}, \quad (7)$$

где $\mathbf{C}_{2D}\mathbf{x}_i \triangleq (\mathbf{C}(\mathbf{C}\mathbf{x}_i)^T)^T = \mathbf{C}\mathbf{x}_i\mathbf{C}^T$ и $\mathbf{D}_{2D}\mathbf{x}_i \triangleq (\mathbf{D}(\mathbf{D}\mathbf{x}_i)^T)^T = \mathbf{D}\mathbf{x}_i\mathbf{D}^T$, $\mathbf{s}_n \neq \mathbf{0}$ из-за ошибки целочисленного округления в каждой лестничной ступени.

Например, при выполнении прямого одномерного трансформационного преобразования (7) для нулевого блока \mathbf{x}_0 исходного изображения входной вектор $[\mathbf{x}_0 \ \mathbf{s}_0]^T$ проходит три ступени обработки согласно БЛСП прямого преобразования (5) для формирования результата обработки $[\mathbf{y}_0 \ \mathbf{s}_1]^T$:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{0} \\ \mathbf{C} & \mathbf{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_0 \\ \mathbf{s}_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_0 \\ \text{round}[\mathbf{C}\mathbf{x}_0] + \mathbf{s}_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_{0j} \\ \mathbf{s}_{0j} \end{bmatrix}, \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I} & -\mathbf{D} \\ \mathbf{0} & \mathbf{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_{0j} \\ \mathbf{s}_{0j} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_{0j} - \text{round}[\mathbf{D}\mathbf{s}_{0j}] \\ \mathbf{s}_{0j} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_{0k} \\ \mathbf{s}_{0k} \end{bmatrix}, \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{I} \\ -\mathbf{I} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{0} \\ \mathbf{C} & \mathbf{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_{0k} \\ \mathbf{s}_{0k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{I} \\ -\mathbf{I} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_{0k} \\ \text{round}[\mathbf{C}\mathbf{x}_{0k}] + \mathbf{s}_{0k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{round}[\mathbf{C}\mathbf{x}_{0k}] + \mathbf{s}_{0k} \\ -\mathbf{x}_{0k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{y}_0 \\ \mathbf{s}_1 \end{bmatrix}. \quad (10)$$

С другой стороны, вектор $[\mathbf{y}_0 \ \mathbf{s}_1]^T$, принимая во внимание (8)–(10), определится следующим образом:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \mathbf{y}_0 \\ \mathbf{s}_1 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \text{round}[\mathbf{C}[\mathbf{x}_0 - \text{round}[\mathbf{D}[\text{round}[\mathbf{C}\mathbf{x}_0]]]]] + \text{round}[\mathbf{C}\mathbf{x}_0] + \mathbf{s}_0 \\ -\mathbf{x}_0 + \text{round}[\mathbf{D}[\text{round}[\mathbf{C}\mathbf{x}_0] + \mathbf{s}_0]] \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} \text{round}[\mathbf{C}[\mathbf{x}_0 - \text{round}[\mathbf{D}[\text{round}[\mathbf{C}\mathbf{x}_0] + \mathbf{s}_0]]]] + \text{round}[\mathbf{C}\mathbf{x}_0] + \mathbf{s}_0 \\ -\mathbf{x}_0 + \text{round}[\mathbf{D}[\text{round}[\mathbf{C}\mathbf{x}_0] + \text{round}[\mathbf{D}\mathbf{s}_0]]] \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} 2\text{round}[\mathbf{C}\mathbf{x}_0] - \text{round}[\mathbf{C}[\text{round}[\mathbf{D}[\text{round}[\mathbf{C}\mathbf{x}_0]]]]] \\ -\mathbf{x}_0 + \mathbf{x}'_0 \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (11)$$

где $\text{round}[\]$ – оператор округления; $-\mathbf{x}_0 + \mathbf{x}'_0 = \mathbf{e}_0$ – ошибка округления после обработки 0-го сегментного блока. Для $\mathbf{s}_0 = \mathbf{0}$, $\mathbf{x}'_0 = \text{round}[\mathbf{D}[\text{round}[\mathbf{C}\mathbf{x}_0]]] \neq \mathbf{x}_0$, так как при целочисленном преобразовании теряется свойство ортогональности преобразования ДКП и $\text{round}[\mathbf{D}[\text{round}[\mathbf{C}]]] \approx \mathbf{I}$.

Результат реконструкции нулевого блока \mathbf{x}_0 исходного изображения определяется на основе выполнения обратного преобразования согласно БЛСП (6) для вектора $[\mathbf{y}_0 \ \mathbf{s}_1]^T$, при этом оператор округления не меняется:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{0} \\ -\mathbf{C} & \mathbf{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{0} & -\mathbf{I} \\ \mathbf{I} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{y}_0 \\ \mathbf{s}_1 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{0} \\ -\mathbf{C} & \mathbf{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\mathbf{s}_1 \\ \mathbf{y}_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\mathbf{s}_1 \\ \text{round}[\mathbf{C}\mathbf{s}_1] + \mathbf{y}_0 \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} \mathbf{x}_{0k} \\ -\text{round}[\mathbf{C}\mathbf{x}_{0k}] + \text{round}[\mathbf{C}\mathbf{x}_{0k}] + \mathbf{s}_{0k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_{0k} \\ \mathbf{s}_{0k} \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{D} \\ \mathbf{0} & \mathbf{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_{0k} \\ \mathbf{s}_{0k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_{0k} + \text{round}[\mathbf{D}\mathbf{s}_{0k}] \\ \mathbf{s}_{0k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_{0j} - \text{round}[\mathbf{D}\mathbf{s}_{0j}] + \text{round}[\mathbf{D}\mathbf{s}_{0j}] \\ \mathbf{s}_{0j} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_{0j} \\ \mathbf{s}_{0j} \end{bmatrix}, \quad (13)$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{0} \\ -\mathbf{C} & \mathbf{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_{0j} \\ \mathbf{s}_{0j} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_{0j} \\ -\text{round}[\mathbf{C}\mathbf{x}_{0j}] + \mathbf{s}_{0j} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_0 \\ -\text{round}[\mathbf{C}\mathbf{x}_0] + \text{round}[\mathbf{C}\mathbf{x}_0] + \mathbf{s}_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_0 \\ \mathbf{s}_0 \end{bmatrix}. \quad (14)$$

Как видно из формул (8)–(14), округление результатов преобразований в БЛСП не влияет на обратимость декоррелирующего преобразования на основе ДКП-ОДКП. Следовательно, выполнение обратимого «целого к целому» трансформационного кодирования изображений возможно на основе целочисленных прямых и обратных ДКП. Также количество обрабатываемых блоков увеличивается всего лишь на 1 блок размером $M \times M$ по сравнению с общим количеством блоков $(N/M)^2$ для изображения $N \times N$ пикселей, поэтому время преобразования увеличится незначительно.

Моделирование системы анализа-синтеза на основе блочной лестничной структурной параметризации ДКП-ОДКП в программной среде MATLAB с помощью инструментального модуля Fixed Point с использованием арифметики с фиксированной запятой для исходного изображения «Lena» 512×512 пикселей (рис. 3, а) показало, что без применения информационного SIB-блока s_n наблюдается эффект «шахматной доски»: PSNR = 84,6834 дБ, MSE = $2,2118 \times 10^{-4}$ (рис. 3, б), а с обработкой по схеме с SIB-блоком s_n PSNR = ∞ дБ, MSE = 0, т. е. исходное изображение восстанавливается без потерь (рис. 3, в).

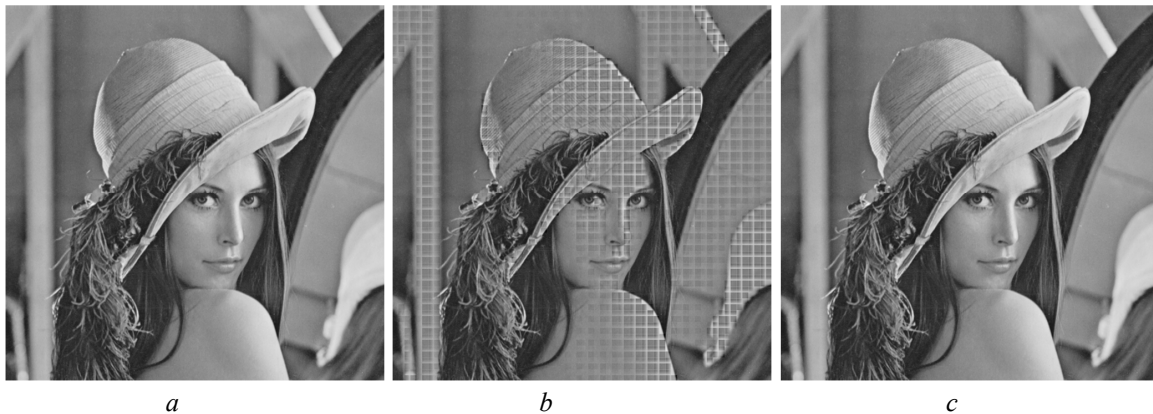


Рис. 3. Реконструкция изображения «Lena» 512×512 пикселей системой анализа-синтеза
Fig. 3. “Lena” 512×512 pixels image reconstruction by analysis-synthesis system

Система трансформационного кодирования изображений 2D ДКП-ОДКП процессора

Методы компрессии изображений, основанные на модификации и сжатии результатов преобразования изображения, называются методами трансформационного кодирования [7]. Согласно данному подходу, обратимое линейное преобразование \mathbf{T} , представляющее собой квадратную матрицу, используется для отображения множества целых чисел исходного изображения \mathbf{x} во множество вещественных чисел коэффициентов \mathbf{y} преобразования \mathbf{T} , которые затем квантуются и кодируются. Система трансформационного кодирования изображений (сжатия – кодер и восстановления – декодер) показана на рис. 4. В кодере реализуются четыре операции: разбиение изображения размера $N \times N$ на блоки $M \times M$ пикселей, прямое преобразование \mathbf{T}_A – преобразование анализа формата $M \times M$, квантование и кодирование.

Декодер выполняет обратную последовательность операций: декодирование символов, обратное преобразование T_S – преобразование синтеза формата $M \times M$, и объединение блоков в изображение. Так как значительное количество коэффициентов в частотных субполосах после операции квантования равно нулю для разных значений среднего числа бит на один пиксель r_{bb} , то можно применить алгоритм кодирования серий нулей типа RLE (Run-Length Encoding) и энтропийное кодирование, используя алгоритм Хаффмана. Добавление блока кодирования RLE+Huffman [7] в систему сжатия изображения (рис. 4) позволит сжать изображение в 8 раз и получить результаты, сравнимые с предложенными в статьях [5, 9, 10–12]: на 0,25 bpp (сжатие 1:32), 0,5 bpp (сжатие 1:16), 1 bpp (сжатие 1:8) для монохромных 8-битных изображений.

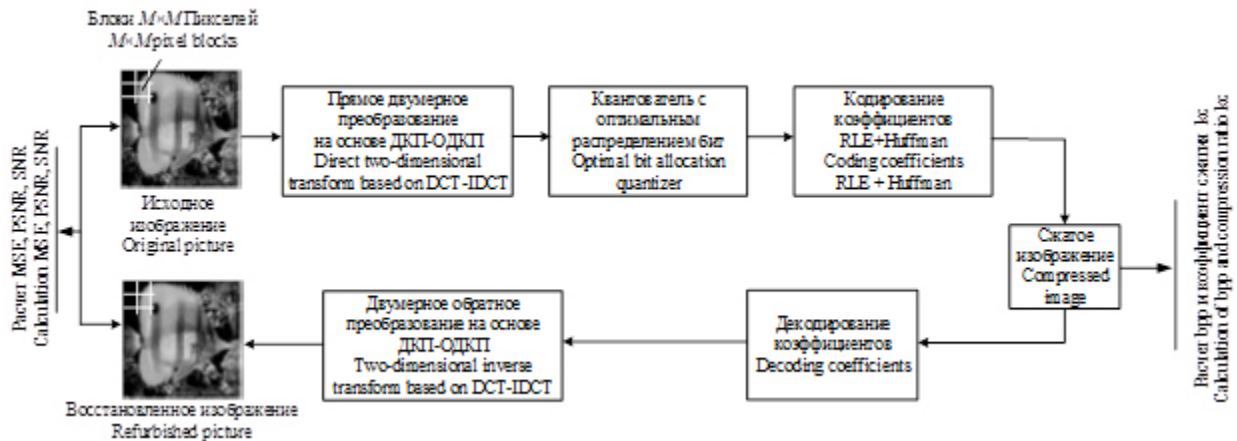


Рис. 4. Трансформационное кодирование изображений двумерным преобразователем ДКП-ОДКП
Fig. 4. Transformational images coding based on the two-dimensional converter DCT-IDCT

Вычисление и кодирование по принципу L2L (lossless-to-lossy) или на основе блочной лестничной структурной параметризации хорошо «ложится» на структуру системы компрессии на основе общего универсального модуля ДКП-ОДКП и будет иметь вид, представленный на рис. 5.

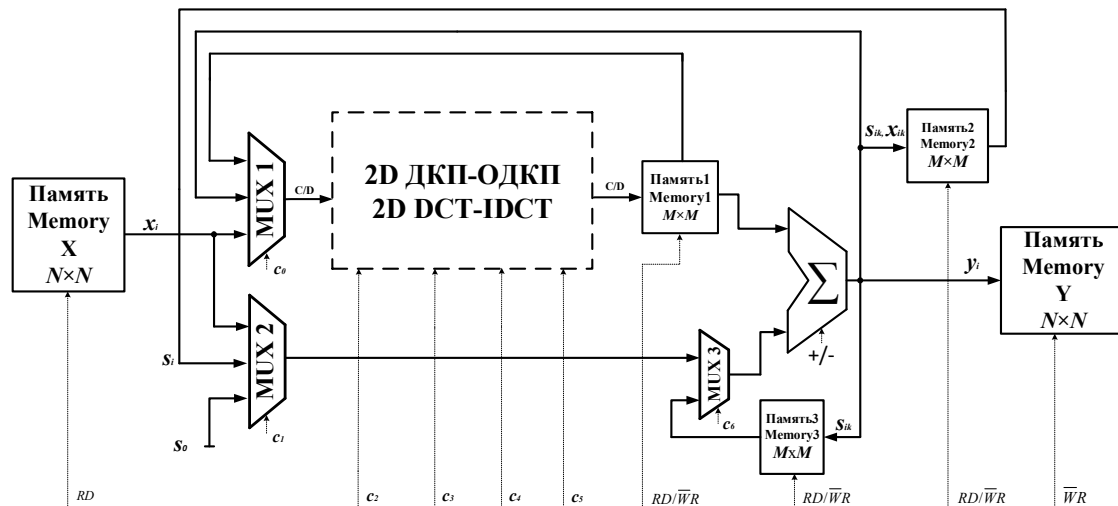


Рис. 5. Структура преобразователя L2L на основе 2D ДКП-ОДКП процессора
Fig. 5. Structure of the L2L converter based on the 2D DCT-IDCT processor

Преобразователь L2L состоит из памяти X размером $N \times N$, где хранится исходное изображение, мультиплексоров, процессорного модуля вычисления ДКП и ОДКП, памяти 1 для хранения промежуточных вычислений 1D или 2D ДКП или ОДКП размерностью $M \times M$, памяти 2 для хранения результатов вычислений ошибки округления в виде S_{ik} -блока размерностью $M \times M$, памяти 3 как дополнительного буфера для хранения результатов вычислений предыдущего цикла блоков s_{ik} размерностью $M \times M$, сумматора, памяти Y размером $N \times N$ для хранения закодированного изображения в виде блоков размерностью $M \times M$.

и управляющих сигналов для настройки работы преобразователя согласно блочной лестничной структурной параметризации в трех режимах:

- первый, режим без потерь (lossless) на основе БЛСП с использованием дополнительного нулевого информационного блока **SIB** для накопления ошибки целочисленного округления на каждом шаге лестничной структуры по формуле (7) и алгоритму вычисления, представленному на рис. 6;
- второй, режим с потерями (lossy) на основе БЛСП 2D ДКП-ОДКП, вычислительное ядро которого представлено на рис. 1, и вычисление происходит по формулам (5), (6);
- третий, режим с потерями (lossy) работает, как в стандарте JPEG, и вычисление происходит по формуле (2).

В первом режиме вычислительный процесс происходит на основе ядер прямого или обратного декоррелирующего преобразования двумерной блочной лестничной структурной параметризации и пространственной диаграммы вычисления коэффициентов в режиме без потерь (см. рис. 6). Преобразование изображения Y происходит за $(N/M)^2$ итераций. Преобразователь на основе ДКП-ОДКП с использованием дополнительного информационного **SIB**-блока по схеме L2L предлагается реализовать на основе рекурсивной структуры процессора (рис. 6), которая позволит за три процессорных цикла в режиме кодирования без потерь выполнить преобразование БЛСП на базе двумерных матриц целочисленного ДКП и ОДКП (рис. 1).

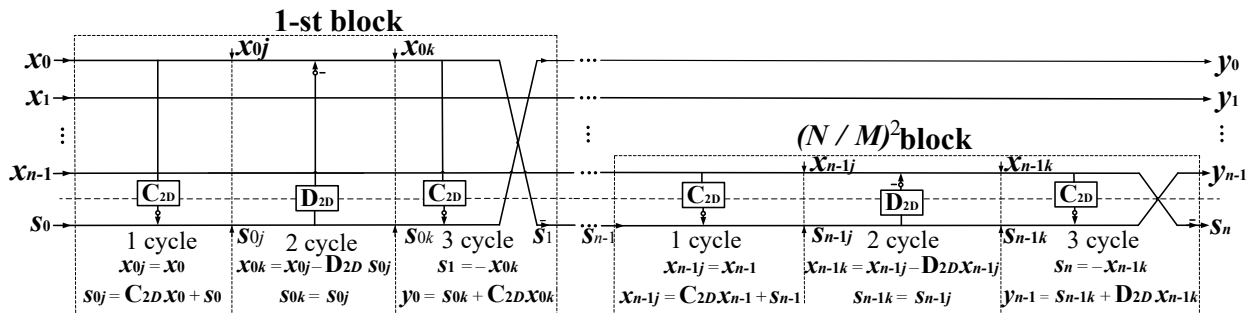


Рис. 6. Алгоритм БЛСП на 2D целочисленных ДКП-ОДКП с SIB-блоком для $(N/M)^2$ блоков изображения
Fig. 6. Algorithm of BLSP on 2D integer DCT-IDCT with SIB-block for $(N/M)^2$ image blocks

Заключение

Анализ перфективного целочисленного декоррелирующего преобразования изображений на основе блочной лестничной параметризации ДКП-ОДКП показывает наличие артефакта «шахматная доска» в реконструированном изображении, который обусловлен наличием постоянной составляющей в каналах ОДКП.

Для реализации кодера изображения по схеме L2L предлагается выбрать перфективное 2D целочисленное декоррелирующее преобразование на основе блочной лестничной параметризации ДКП-ОДКП с включенным дополнительным модулем ОДКП обработки ошибки округления при вычислениях ДКП каждого $M \times M$ блока изображения (**SIB**-блоком). При этом число операций округления на 1D преобразовании вектора $M \times 1$ сокращается с $3M$ до $3M/2M$. В трансформационном преобразовании декодера изображение $N \times N$ пикселей восстанавливается из всего цифрового потока и блока ошибки округления $M \times M$, который преобразуется на основе ДКП.

Процессор перфективного 2D целочисленного декоррелирующего преобразования на основе блочной лестничной параметризации ДКП-ОДКП с дополнительным информационным **SIB**-блоком для кодирования изображений по схеме L2L предлагается реализовать на рекурсивной вычислительной структуре, что позволяет за три процессорных цикла в режиме кодирования без потерь выполнить прямое и обратное преобразования блочной лестничной структурной параметризации ДКП-ОДКП блока изображения $M \times M$ и за $(N/M)^2$ итераций вычислить 2D трансформационное преобразование изображения $N \times N$ пикселей.

Список литературы / References

1. Pennebaker W. B. *JPEG: Still image compression standard*. New York: Van Nostrand Reinhold; 1993.
2. Weinberger J. LOCO-I: a low complexity, context-based, lossless image compression algorithm. *Proceedings of the Data Compression Conference (DC'96)*. Snowbird, UT, 31 March – 03 April 1996: 140-149.
3. Skodras A. The JPEG2000 still image compression standard. *IEEE Trans. Signal Process. Mag.* 2001;18(5):36-58.
4. Dufaux F. The JPEG XR image coding standard. *IEEE Signal Process. Mag.* 2009;26(6):195-199.
5. Suzuki T. Integer DCT Based on Direct-Lifting of DCT-IDCT for Lossless-to-Lossy Image Coding. *IEEE Transactions on image processing*. November 2010;19(11):2958-2965.
6. Suzuki T. Integer fast lapped transforms based on direct-lifting of DCTs for lossy-to-lossless image coding. *EURASIP Journal on Image and Video Processing*. 2013;1:1-9.
7. Vaidyanathan P.P. *Multirate systems and filter banks*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, USA; 1993.
8. Suzuki T. Realization of lossless-to-lossy image coding compatible with JPEG standard by direct-lifting of DCT-IDCT. *Proceedings of the 17th IEEE Intern. Conf. on Image Processing (ICIP'2010)*, Hong Kong 26 – 29 September, 2010: 389-392.
9. Chokchaitam S. A new unified 2D-DCT accelerator lossless/lossy image compression based on a new integer DCT. *IEICE Trans. Inf. Syst.* Feb. 2005;Vol. E88-D (2):403-413.
10. Fukuma S. Lossless 8-point fast discrete cosine transform using lossless Hadamard transform. *Tech. Rep. IEICE, DSP99-103*. October 1999: 37-44.
11. Liang J. Fast multiplierless approximations of the DCT with the lifting scheme. *IEEE Transaction on Signal Processing*. Dec. 2001;49(12):3032-3044.
12. Komatsu K. Reversible discrete cosine transform. *Processing International Conference Acoustic, Speech, Signal Processing. Seattle, WA*. May 1998: 1769-1772.

Сведения об авторах

Ключеня В.В., к.т.н., доцент кафедры электронных вычислительных средств Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Information about the authors

Kliuchenia V.V., PhD, Associate Professor at the Electronic Computing Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники;
тел. +375-29-701-54-89,
e-mail: vitaly.kliuchenia@gmail.com
Ключеня Виталий Васильевич

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka str., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics;
tel. +375-29-701-54-89,
e-mail: vitaly.kliuchenia@gmail.com
Kliuchenia Vitaly Vasil'evich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2021-19-14-21>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 539.3

УСКОРЕНИЕ ГРАНИЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫХ РАСЧЕТОВ ДЛЯ ЗАМКНУТОЙ ОБЛАСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЛИНЕЙНЫХ ФУНКЦИЙ ФОРМЫ И ТЕХНОЛОГИИ CUDA

С.С. ЩЕРБАКОВ^{1,2}, М.М. ПОЛЕЩУК²

¹Государственный комитет по науке и технологиям Республики Беларусь
(г. Минск, Республика Беларусь)

²Белорусский государственный университет (г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 9 сентября 2020

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2021

Аннотация. Развитие компьютерных технологий, как в аппаратной, так и программной сфере, позволяет быстро и точно получать решения прикладных задач многих областей науки. Ускорение расчетов – широко применяемая техника, которая реализуется на основе многоядерности и многопоточности процессоров. Технология NVidia CUDA, или просто CUDA, позволяет наиболее эффективно ускорять метод граничных элементов, который реализуется путем множества независимых расчетов. Основная цель работы заключается в реализации и ускорении непрямого метода граничных элементов с использованием трех функций формы для вычисления распределения потенциала внутри замкнутого контура при действии потенциала, распределенного на поверхности. Ускорение соответствующих вычислений было реализовано на графическом акселераторе с помощью технологии NVidia CUDA. Получены зависимости ускорения параллельных вычислений по сравнению с последовательными в зависимости от количества граничных элементов и расчетных узлов. Показано значительное, до 52 раз, ускорение расчета распределения потенциала при сохранении его точности. Достигнуто ускорение до 22 раз при расчете матрицы взаимовлияний граничных элементов. Также исследована сходимость данного метода. При использовании технологии CUDA можно получить значительное ускорение без потери точности и скорости сходимости. Таким образом, использование CUDA является очень хорошим подходом к распараллеливанию гранично-элементного метода. Применение этой технологии для ускорения вычислений позволит эффективно решать задачи различных областей физики: акустики, гидромеханики, электродинамики, механики твердых тел и многих других.

Ключевые слова: метод граничных элементов, распараллеливание, распределение потенциала, NVidia CUDA, ускорение.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Щербаков С.С., Полещук М.М. Ускорение гранично-элементных расчетов для замкнутой области с использованием нелинейных функций формы и технологии CUDA. Доклады БГУИР. 2021; 19(3): 14-21.

ACCELERATION OF BOUNDARY ELEMENT CALCULATIONS FOR CLOSED DOMAIN USING NONLINEAR FORM FUNCTIONS AND CUDA TECHNOLOGY

SERGEY S. SHERBAKOV^{1,2}, MIKHAIL M. POLESTCHUK²

¹ State Committee on Science and Technology of the Republic of Belarus, (Minsk, Republic of Belarus)

² Belarusian State University (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 9 September 2020

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2021

Abstract. The evolution of computer technologies, as a hardware and a software parts, allows to attain fast and accurate solutions to many applied problems in scientific areas. Acceleration of calculations is broadly used technic that is basically implemented by multithreading and multicore processors. NVidia CUDA technology or simply CUDA opens a way to efficient acceleration of boundary elements method (BEM), that includes many independent stages. The main goal of the paper is implementation and acceleration of indirect boundary element method using three form functions. Calculation of the potential distribution inside a closed boundary under the action of the defined boundary condition is considered. In order to accelerate corresponding calculations, they were parallelized at the graphic accelerator using NVidia CUDA technology. The dependences of acceleration of parallel computations as compared with sequential ones were explored for different numbers of boundary elements and computational nodes. A significant acceleration (up to 52 times) calculation of the potential distribution without loss in accuracy is shown. Acceleration of up to 22 times was achieved in calculation of mutual influence matrix for boundary elements. Using CUDA technology allows to attain significant acceleration without loss in accuracy and convergence. So application of CUDA is a good way to parallelizing BEM. Application of developed approach allows to solve problems in different areas of physics such as acoustics, hydromechanics, electrodynamics, mechanics of solids and many other areas, efficiently.

Keywords: boundary element method, parallelization, distribution of potential, NVidia CUDA, acceleration.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Sherbakov S.S., Polestchuk M.M. Acceleration of boundary element calculations for closed domain using nonlinear form functions and CUDA technology. Doklady BGUIR. 2021; 19(3): 14-21.

Введение

Необходимость ускорения расчетов является одной из приоритетных задач современных численных методов. При решении задач механики сплошной среды и механики деформируемого твердого тела широко используется метод граничных элементов (МГЭ). Основным недостатком классической реализации данного метода является большое время вычислений по сравнению, например, с методом конечных элементов. Использование технологии NVidia CUDA позволяет многократно ускорить расчеты, как показано, например, в работе [1], где в качестве исследуемой области была рассмотрена полуплоскость. В настоящей статье в качестве объекта исследования рассмотрена двумерная прямоугольная область.

Постановка задачи. Рассмотрим решение задачи об определении распределения потенциала внутри замкнутой прямоугольной области $A = \{(x, y) : (x, y) \in \mathbb{R}^2, |x| \leq 5, -8 \leq y \leq 0\}$ при действии потенциала, распределенного на отрезке $-b \leq x \leq b, y = 0, b = 2,5$ верхней границы данной области (рис. 1):

$$p^*(x) = p_0 \sqrt{1 - \frac{x^2}{b^2}}. \quad (1)$$

Решение задачи было получено непрямым МГЭ [2] с распараллеливанием вычислений матрицы взаимовлияний и распределения потенциала с помощью технологии NVidia CUDA.

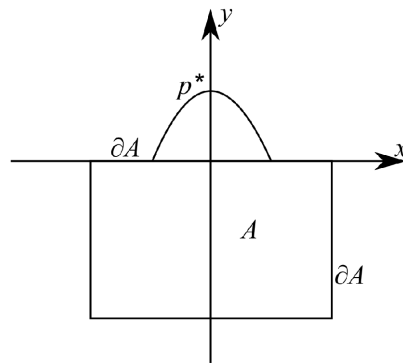


Рис. 1. Схема задачи и граничное условие
Fig. 1. Problem scheme and boundary condition

Решение с применением нелинейных функций формы

Подобная задача была рассмотрена в [1] за исключением формы границы, тут же она замкнута и имеет прямоугольную форму. Особенностью данной задачи является программная реализация расположения функций формы около углов прямоугольника. При расчетах использовались три функции формы $f_i^I(\mathbf{x})$, $f_i^{II}(\mathbf{x})$, $f_i^{III}(\mathbf{x})$, которые распределялись на граничных элементах, как показано на рис. 2. Обязательным условием для обеспечения гладкости искомого решения на поверхности является равенство $f_i^{III} = f_{i+1}^I$.

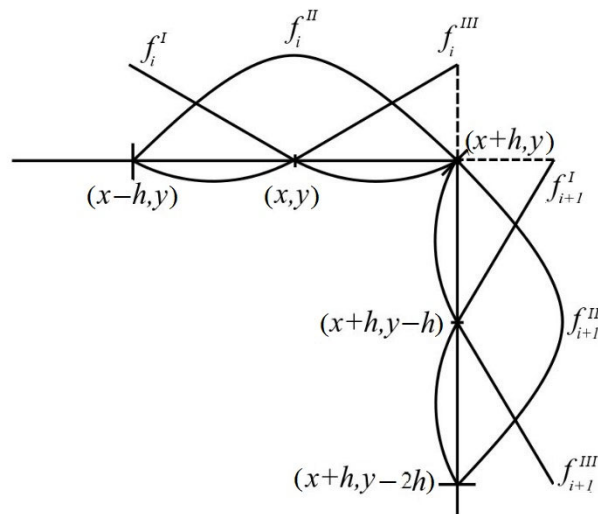


Рис. 2. Распределение нелинейных функций формы по граничным элементам
Fig. 2. Nonlinear form functions distribution on boundary elements

Сходимость расчета

Сходимость расчетов с использованием нелинейных функций формы оценивалась для распределения потенциала вдоль оси y . В качестве эталонного распределения рассматривался результат расчета с использованием нелинейных функций формы для максимального числа граничных элементов $N = 288$.

На рис. 3. представлены две зависимости погрешности e решений p с равномерной (линейной) функцией формы и тремя нелинейными относительно эталонного p^{eth} от числа граничных элементов ($\Gamma\Theta$), которые были получены по формуле

$$e_k = \sum_y \frac{P_k - P_{k-1}}{p^{eth}}, \quad (2)$$

где k – это номер дискретизации.

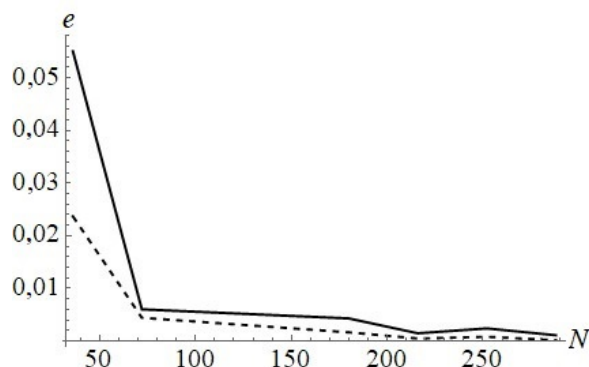


Рис. 3. Графики сходимости алгоритмов с равномерной (сплошная) и нелинейными (пунктирная) функциями влияния

Fig. 3. Convergence plot of algorithms with level (continuous) and nonlinear (dashed) form functions

Как видно из рис. 3, при дискретизации более 70 ГЭ данная погрешность составляет менее 1% и продолжает уменьшаться при уменьшении размера ГЭ, что свидетельствует о хорошей сходимости алгоритма.

Из анализа погрешности относительно эталона для каждой дискретизации также видно, что скорость сходимости алгоритма МГЭ с тремя нелинейными функциями формы примерно в 3,2 раза выше, чем у алгоритма с равномерной функцией формы.

Применение технологии CUDA для ускорения формирования матрицы взаимовлияния

Про формирование матрицы взаимовлияния и процесс построения итогового решения также было рассказано в [1]. Так как в статье [1] было показано, что скорость последовательной реализации алгоритма, реализованного в пакете Wolfram Mathematica, крайне низкая по отношению к алгоритму, реализованному на C, в дальнейшем будет рассматриваться реализация только на C.

Для распараллеливания расчетов были выбраны наборы различных дискретизаций для границы, а также внутренней части расчетной области. В целях чистоты и повторяемости эксперимента расчеты проводились на одной и той же графической карте, в то время как последовательный расчет производился на центральном процессоре. Подробное описание оборудования, использованного для расчетов, можно найти в [1].

На рис. 4 представлена зависимость времени формирования матрицы взаимовлияний и коэффициента ускорения расчетов от количества ГЭ для последовательной (C) и распараллеленной реализации алгоритма (CUDA).

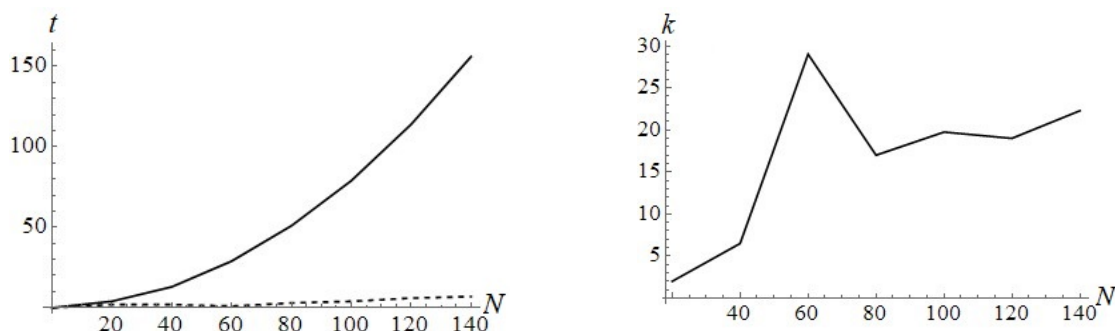


Рис. 4. Время формирования матрицы взаимовлияния и коэффициент ускорения

Fig. 4. Creation time of influence matrix and of acceleration coefficients

Распараллеливание расчета распределения потенциала под поверхностью

Также эффективно можно распараллеливать и процесс вычисления распределения потенциала. Далее будут представлены распределения потенциала (рис. 5), время расчетов (рис. 6) и коэффициенты ускорений (рис. 7), полученные при использовании технологии CUDA для различных дискретизаций.

Распределения полей потенциала были построены для разных дискретизаций расчетной области.

При вычислении распределения потенциала используется подход к вычислениям, который подробно описан в [1]. Вычисление распределения потенциала состоит из независимых операций для каждого расчетного узла. Таким образом, вычисляя потенциал для каждого расчетного узла в отдельном потоке, можно получить значительный прирост скорости вычисления распределения потенциала.

Рассмотрим зависимости времени расчета потенциала при фиксированном количестве граничных элементов и расчетных узлов. Из анализа рис. 6 можно сделать вывод, что время, требуемое для последовательного расчета, почти линейно зависит от дискретизации границы и расчетной области. При этом также растет, хотя и гораздо медленнее, время параллельных вычислений. Это связано с временными затратами на копирование расчетных данных из оперативной памяти в память графического процессора. В итоге ускорение вычислений достигает 52 раз.

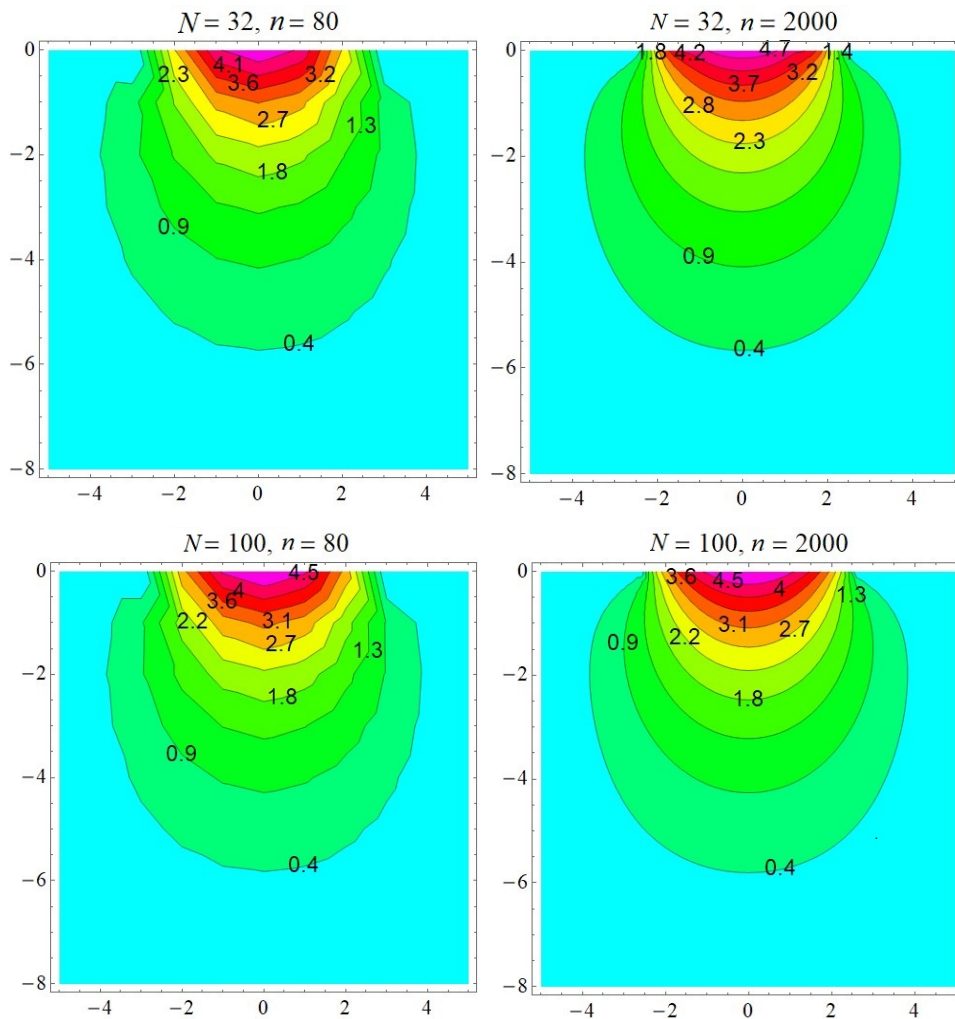


Рис. 5. Распределение потенциала для разного количества граничных элементов и расчетных узлов
Fig. 5. Potential distribution for different number of boundary elements and calculation nodes

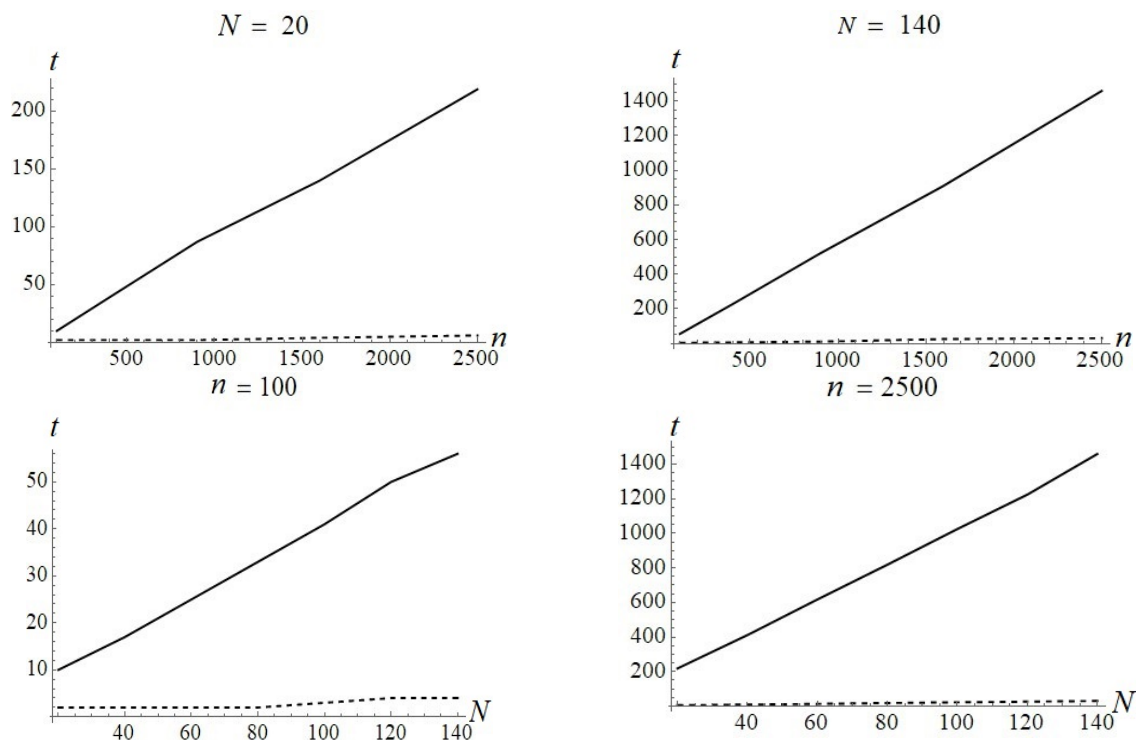


Рис. 6. Зависимости времени расчета распределения потенциала от количества граничных элементов и расчетных узлов

Fig. 6. Calculation time dependence on number of boundary elements and calculations nodes

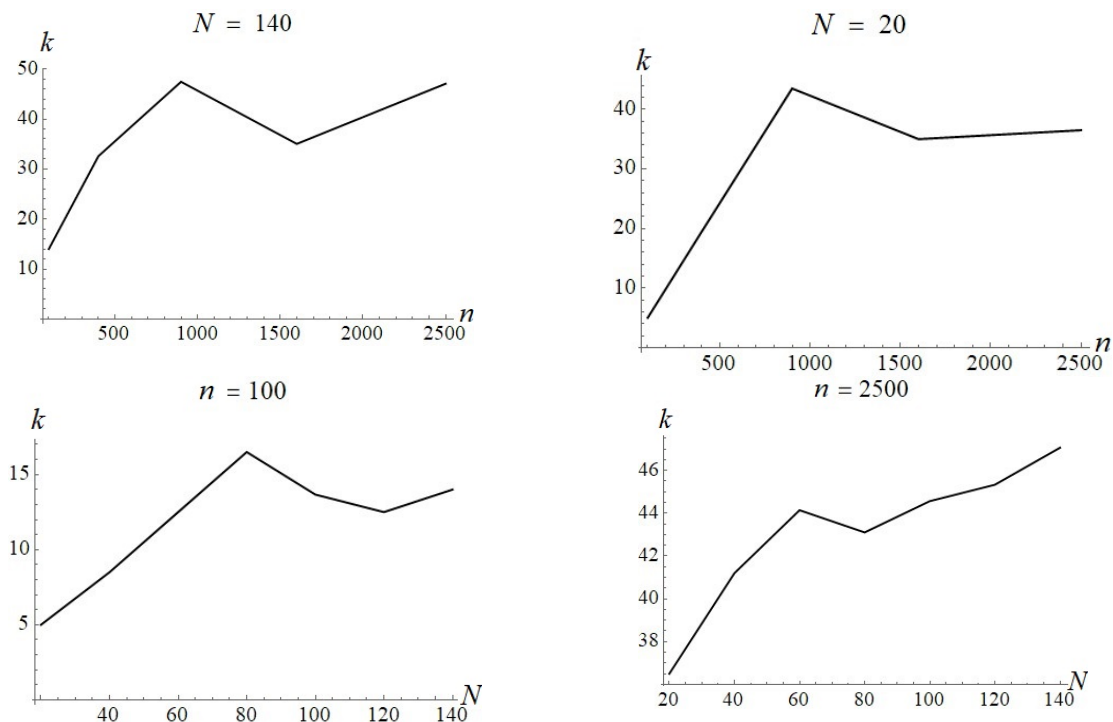


Рис. 7. Зависимости коэффициентов ускорения от количества различных элементов и расчетных узлов

Fig. 7. Acceleration coefficients dependence on number of boundary elements and calculation nodes

На рис. 8, 9 показаны зависимости времени расчета сразу от двух параметров: количества граничных элементов и количества расчетных узлов для последовательного и параллельного расчетов соответственно.

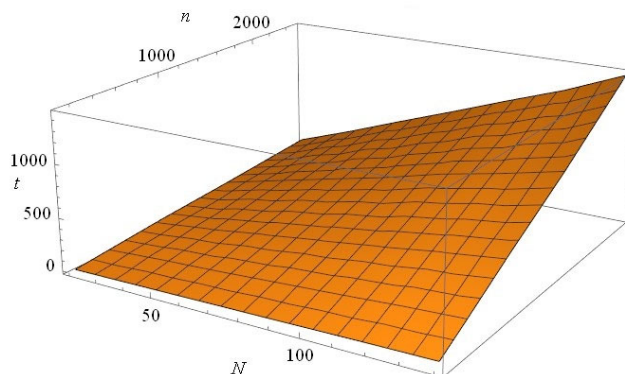


Рис. 8. Зависимость времени вычисления потенциала от количества граничных элементов и расчетных узлов для последовательного расчета
Fig. 8. Potential calculation time dependence on number of boundary elements and calculations nodes by consequent calculation

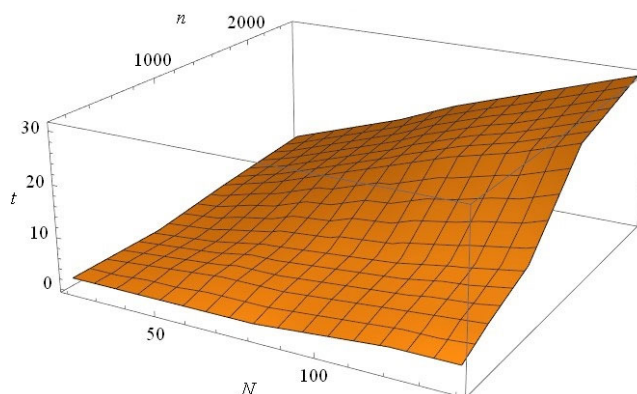


Рис. 9. Зависимость времени вычисления потенциала от количества граничных элементов и расчетных узлов при распараллеливании расчета (CUDA)
Fig. 9. Potential calculation time dependence on number of boundary elements and calculation nodes by parallelization of calculation (CUDA)

Заключение

Был реализован метод граничных элементов с тремя нелинейными функциями формы для отыскания распределения потенциала внутри прямоугольной замкнутой области. Применение технологии CUDA позволило эффективно распараллелить расчеты и получить значительные приросты к скорости вычислений.

Исследование сходимости расчета с использованием нелинейных функций формы показало существенную разницу аналогичного метода с постоянными функциями. Таким образом, скорость сходимости метода с нелинейными функциями формы, выбранными в данной работе, выше в 3,2 раза. Также исследована погрешность данных методов относительно друг друга, и представлена ее зависимость от числа граничных элементов.

Для каждой комбинации числа граничных элементов и количества расчетных узлов были построены графики времени расчета и коэффициента ускорения. При изучении данных зависимостей был сделан вывод о значительном, до 52 раз, ускорении расчета распределения потенциала при сохранении его точности, и, что немаловажно, ускорении до 22 раз при формировании матрицы взаимовлияний граничных элементов.

Данные результаты могут быть использованы для развития технологии CUDA в сфере компьютерного моделирования, чтобы в дальнейшем получить более эффективные методы моделирования различных задач.

Список литературы

1. Щербаков С.С., Полещук М.М. Ускорение гранично-элементных расчетов с помощью графического акселератора для элементов с нелинейными функциями формы. *Механика машин, механизмов и материалов*. 2019;4(49);89-94.
2. Бенерджи П. *Метод граничных элементов в прикладных науках*. Москва: Мир; 1984.
3. Крауч С.Л. *Методы граничных элементов в механике твердого тела*. Москва: Мир; 1987.
4. Molina-Moya J., Mart'inez-Castro A.E., Ortiz P. An Iterative Parallel Solver in GPU Applied to Frequency Domain Linear Water Wave Problems by the Boundary Element Method. *Frontiers in Built Environment*. 26 November 2018. DOI: 10.3389/fbuil.2018.00069.
5. Takahashi T., Hamada T. GPU-accelerated boundary element method for Helmholtz' equation in three dimensions. *International Journal of Numerical Methods in Engineering*. 2009;80:1295-1321. DOI: 10.1002/nme.2661.
6. Rauber T., R\"unger G. *General Purpose GPU Programming*. In: *Parallel Programming*. Berlin: Springer, Heidelberg; 2013: 387-415. DOI: 10.1007/978-3-642-37801-0_7.

References

1. Sherbakov S.S., Polestchuk M.M. [Acceleration of boundary-element computing using graphics accelerator for the elements with nonlinear form functions]. *Mechanics of machines, mechanisms and materials*. 2019;4(49);89-94. (In Russ.)
2. Benerdgi P. [*Boundary element method in applied sciences*]. Moscow: Mir; 1984. (In Russ.)
3. Crouch S.L. [*Boundary elements methods in solid mechanics*]. Moscow: Mir; 1987. (In Russ.)
4. Molina-Moya J., Mart'inez-Castro A.E., Ortiz P. An Iterative Parallel Solver in GPU Applied to Frequency Domain Linear Water Wave Problems by the Boundary Element Method. *Frontiers in Built Environment*. 26 November 2018. DOI: 10.3389/fbuil.2018.00069.
5. Takahashi T., Hamada T. GPU-accelerated boundary element method for Helmholtz' equation in three dimensions. *International Journal of Numerical Methods in Engineering*. 2009;80:1295-1321. DOI: 10.1002/nme.2661.
6. Rauber T., R\"unger G. *General Purpose GPU Programming*. In: *Parallel Programming*. Berlin: Springer, Heidelberg; 2013: 387-415. DOI: 10.1007/978-3-642-37801-0_7.

Вклад авторов

Щербаков С.С. определил задачи, которые необходимо было решить в ходе проведения исследований, принимал участие в реализации алгоритмов и интерпретации результатов.

Полещук М.М. принимал участие в реализации алгоритмов и интерпретации результатов.

Authors' contribution

Sherbakov S.S. identified the tasks that needed to be solved during the research, and also took part in the realization of algorithms and interpretation of their results.

Polestchuk M.M. took part in the realization of algorithms and interpretation of their results.

Сведения об авторах

Щербаков С.С., д.ф.-м.н, профессор, заместитель Председателя Государственного комитета по науке и технологиям Республики Беларусь, профессор кафедры теоретической и прикладной механики Белорусского государственного университета.

Полещук М.М., аспирант кафедры теоретической и прикладной механики Белорусского государственного университета.

Information about the authors

Sherbakov S.S., D.Sc., Professor, Vice Chairman of the State Committee on Science and Technology of the Republic of Belarus, Professor at the Department of Theoretical and Applied Mechanics of Belarusian State University.

Polestchuk M.M., Postgraduate student at the Department of Theoretical and Applied Mechanics of Belarusian State University.

Адрес для корреспонденции

220125, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. Николая Михайлашева, 5, кв. 96;
тел. +375-29-809-05-09;
e-mail: mikhailpaliashchuk@yandex.ru
Полещук Михаил Михайлович

Address for correspondence

220125, Republic of Belarus,
Minsk, Nikolaya Mikhailasheva str., 5, r. 96;
tel. +375-29-809-05-09;
e-mail: mikhailpaliashchuk@yandex.ru
Polestchuk Mikhail Mikhailovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2021-19-3-22-30>

Оригинальная статья
Original paper

УДК621.3.049.77: 621.793

ВЛИЯНИЕ ОТЖИГА НА СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫЕ И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЛЕНОК ОКСИДА ВАНАДИЯ

Т.Д. НГУЕН¹, А.И. ЗАНЬКО², Д.А. ГОЛОСОВ¹, С.М. ЗАВАДСКИЙ¹, С.Н. МЕЛЬНИКОВ¹,
В.В. КОЛОС², Т.К. ТО¹

¹Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)

²ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ» (г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 26 января 2021

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2021

Аннотация. Целью работы являлось исследование влияния параметров процесса нанесения и последующего отжига на свойства пленок оксида ванадия VO_x , осажденных методом реактивного магнетронного распыления V мишени в Ar/O_2 смеси газов. Получены зависимости структуры, фазового состава, температурного коэффициента сопротивления (ТКС), удельного сопротивления ρ , ширины запрещенной зоны E_g пленок от концентрации кислорода в Ar/O_2 смеси газов в процессе нанесения GO_2 и температуры отжига пленок в атмосфере O_2 . Установлено, что после нанесения пленки имеют аморфную структуру. Процессы кристаллизации наблюдаются при температурах более $275^\circ C$. При этом формируются поликристаллические пленки с моноклинной, кубической или смешанной кристаллической решеткой и происходит переход от промежуточного оксида V_4O_9 к смешанной фазе $VO_2/VO_x/V_2O_5$ и далее к высшему оксиду V_2O_5 . Характер изменения ρ , ТКС и E_g пленок при изменении температуры отжига имеют сложный характер и во многом определяется GO_2 . Установлено, что с точки зрения использования VO_x пленок в качестве термочувствительных слоев предпочтительными являются следующие условия нанесения и отжига: пленки наносятся при концентрации кислорода 25 % в Ar/O_2 смеси газов и отжигаются при температуре $250\text{--}275^\circ C$ в атмосфере кислорода 10 мин. При данных условиях получены пленки VO_x с $\rho = (1,0 - 3,0) \cdot 10^{-2}$ Ом·м, ТКС = 2,05 %/ $^\circ C$ и $E_g = 3,76\text{--}3,78$ эВ.

Ключевые слова: микроболометр, оксид ванадия, тонкие пленки, реактивное магнетронное распыление, отжиг, структура, фазовый состав, электрофизические свойства.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарности. Исследования выполнены при финансовой поддержке БРФФИ в рамках научных проектов № Т19КИТГ-016 и № Т20КИТГ-013.

Для цитирования. Нгуен Т.Д., Занько А.И., Голосов Д.А., Завадский С.М., Мельников С.Н., Колос В.В., То Т.К. Влияние отжига на структурно-фазовые и электрофизические свойства пленок оксида ванадия. Доклады БГУИР. 2021; 19(3): 22-30.

INFLUENCE OF ANNEALING ON STRUCTURE, PHASE AND ELECTROPHYSICAL PROPERTIES OF VANADIUM OXIDE FILMS

TUYEN D. NGUYEN¹, ANDREY I. ZANKO², DMITRIY A. GOLOSOV¹,
SERGEY M. ZAVADSKI¹, SERGEY N. MELNIKOV¹, VLADIMIR V. KOLOS², T.K. TO¹

¹Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

²JSC "INTEGRAL" – the managing company of the "INTEGRAL" holding (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 26 January 2021

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2021

Abstract. The aim of this work was to study the effect of the parameters of deposition process and subsequent annealing on the properties of vanadium oxide VO_x films deposited by the pulsed reactive magnetron sputtering of a V target in an Ar/O_2 gas mixture. The dependences of the structure, phase, temperature coefficient of resistance (TCR), resistivity ρ , band gap E_g of the films on the oxygen concentration in Ar/O_2 gas mixture during the deposition Γ_{O_2} , and the temperature of annealing in an O_2 atmosphere were obtained. The films were found to have an amorphous structure after deposition. Crystallization processes are observed at temperatures above 275 °C. In this case, depending on the temperature, polycrystalline films with a monoclinic, cubic or mixed crystal lattice are formed and a transition occurs from the intermediate oxide V_4O_9 to the mixed phase $\text{VO}_2/\text{VO}_x/\text{V}_2\text{O}_5$ and then to the higher oxide V_2O_5 . The character of changes in ρ , TCR and E_g of films coming from the change in the annealing temperature is complex and largely determined by Γ_{O_2} . It was established that with the view of using VO_x films as thermosensitive layers, the following conditions of deposition and annealing would be preferable: films deposited at the oxygen concentration 25 % in Ar/O_2 gas mixture and annealed at a temperature of 250–275 °C in an O_2 atmosphere for 10 min. Under these conditions VO_x films with the following properties were obtained: $\rho = (1.0 - 3.0) \cdot 10^{-2} \text{ Ohm}\cdot\text{m}$, $\text{TCR} = 2.05 \text{ \%}/^\circ\text{C}$, and $E_g = 3.76\text{--}3.78 \text{ eV}$.

Keywords: microbolometer, vanadium oxide, thin films, reactive magnetron sputtering, annealing, structure, phase composition, electrical properties.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

Gratitude. The work was supported by the BRFFR, research program grants № T19КИТГ-016 and № T20КИТГ-013.

For citation. Nguen T.D., Zanko A.I., Golosov D.A., Zavadski S.M., Melnikov S.N., Kolos V.V., To T.Q. Influence of annealing on structure, phase and electrophysical properties of vanadium oxide films. Doklady BGUIR. 2021; 19(3): 22-30.

Введение

В последнее десятилетие отмечается резкое увеличение исследований, направленных на разработку неохлаждаемых болометрических матриц ИК диапазона, использующих терморезистивные свойства чувствительного элемента [1]. Терморезистивный материал болометра должен обладать высоким значением температурного коэффициента сопротивления (ТКС), малыми значениями теплопроводности, удельного сопротивления ρ и шумов. Оксид ванадия VO_x обладает наилучшим сочетанием показателей, поэтому именно его чаще всего используют в качестве терморезистивного материала [2]. Нанесенные методом реактивного магнетронного распыления пленки аморфного оксида ванадия обладают требуемыми характеристиками: $\text{ТКС} = 2,2\text{--}2,3 \text{ \%}/^\circ\text{C}$, $\rho = (0,6\text{--}4,0) \cdot 10^{-2} \text{ Ом}\cdot\text{м}$ [3]. Однако в процессе производства болометрических датчиков после нанесения слоя оксида ванадия производится еще ряд термических процессов. Оксиды ванадия имеют сравнительно низкую термическую стабильность, что приводит при повышенных температурах к кристаллизации и дальнейшему окислению пленок. Начальные процессы кристаллизации в пленках VO_x отмечаются уже при температурах около 200 °C [2]. Поэтому для стабилизации требуемой

фазы и структуры пленки требуется проводить предварительный отжиг [4]. В данном случае процесс отжига является ключевым фактором, определяющим конечную структуру, состав и свойства пленок VO_x . При этом температура отжига должна превышать все последующие температурные процессы ($250\text{ }^\circ\text{C}$), но в то же время ограничивается термостойкостью полиимида, используемого в качестве жертвенного слоя при формировании подвешенных ячеек микроболометров ($400\text{ }^\circ\text{C}$). Чаще всего пленки низших оксидов ванадия получают путем восстановления высшего оксида V_2O_5 при высокотемпературном отжиге ($500\text{--}1000\text{ }^\circ\text{C}$) в инертной среде или восстановительной атмосфере. Однако при этом возникает целый ряд проблем: взаимодействие материалов пленки и подложки, деградация характеристик ранее сформированных КМОП структур и т.п. Поэтому исследование возможности низкотемпературного синтеза однофазных тонких пленок низших оксидов ванадия представляет собой актуальную задачу. Одним из возможных путей решения данной проблемы является нанесение пленок низших оксидов ванадия (VO , V_2O_3) и дальнейшее формирование определенной кристаллической структуры и фазы путем отжига в атмосфере кислорода. Однако формирование однофазных пленок промежуточных оксидов является большой проблемой из-за узкого диапазона технологических режимов, обеспечивающих оптимальные характеристики. Таким образом, целью работы являлось исследование влияния режимов процесса нанесения и последующего отжига в атмосфере O_2 на структурно-фазовые и электрофизические свойства пленок VO_x .

Методика проведения эксперимента

Пленки VO_x наносились методом импульсного реактивного магнетронного распыления V мишени (чистота 99,96 %) в среде Ar/O_2 рабочих газов. Описание схемы установки магнетронного нанесения и методика нанесения пленок приведены в статье [3]. Пленки VO_x наносились на структуры $Si_3N_4/SiO_2/Si$ и оптическое стекло BK7. Концентрация кислорода в Ar/O_2 смеси газов G_{O_2} изменялась от 0 до 33,34 %. Толщина нанесенных пленок регулировалась временем распыления и составляла около 150 нм. Для кристаллизации пленок производился их отжиг на установке ИК нагрева R-321B2AN в атмосфере O_2 . Время отжига было постоянным и составляло 10 мин. Температура отжига варьировалась от 200 до $450\text{ }^\circ\text{C}$. Толщина нанесенных пленок измерялась с помощью оптического интерферометрического профилометра ПОИ-08. Структура и фазовый состав пленок определялись методами дифракции обратно-отраженных электронов (EBSD) и рамановской спектроскопии. Для исследования пленок методом EBSD использовался двулучевой электронно-ионный микроскоп Versa 3D Lovac (США). Дифракционные картины получены при угле наклона подложки 70° . Рамановская спектроскопия пленок осуществлялась с помощью сканирующего конфокального микроскопа SOL Instrument Confotec NR500 с длиной волны лазера 488 нм при мощности 1,46 мВт. Спектры комбинационного рассеяния (КР) снимались при комнатной температуре в диапазоне $150\text{--}1150\text{ см}^{-1}$. Электронномикроскопические изображения пленок получены методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) с помощью высокоразрешающего автоэмиссионного растрового электронного микроскопа Hitachi S-4800. Ширина оптической запрещенной зоны нанесенных пленок определялась по краю собственного оптического поглощения [5]. Для этого были получены спектры оптического пропускания пленок с помощью спектрофотометра Проскан МС-121. Для исследования электрических свойств пленок VO_x методом ионно-лучевого распыления формировались Ti контакты. Сформированные резисторы имели прямоугольную форму размером $7,5\times 15\text{ мм}$ (коэффициент формы $K_\phi = 0,5$). Электрическое сопротивление пленок VO_x измерялось при комнатной температуре при токе 100 мкА. Удельное сопротивление пленок рассчитывалось исходя из толщины пленки, сопротивления резистора R , его коэффициента формы K_ϕ . При измерениях ТКС пленок температура терморезисторов изменялась от комнатной до $90\text{ }^\circ\text{C}$ и обратно со скоростью $4\text{ }^\circ\text{C}/\text{мин}$. Температурный коэффициент сопротивления рассчитывался по формуле

$$TKC = \frac{1}{R} \frac{dR}{dT} \cdot 100, \quad (1)$$

где T – температура терморезистора.

Результаты и их обсуждение

Проведены исследования влияния отжига на структуру и фазовый состав пленок оксида ванадия. Методами EBSD и рамановской спектроскопии установлено, что после нанесения все пленки оксида ванадия, независимо от Γ_{O_2} , имели аморфную структуру. Аморфное состояние пленок также подтверждено методом СЭМ. На рис. 1 представлены СЭМ изображения пленок оксида ванадия, нанесенных при $\Gamma_{O_2} = 25\%$ и отожженных при различной температуре. На СЭМ изображениях начальные процессы кристаллизации наблюдались при температурах около $300\text{ }^\circ\text{C}$ (рис. 1, б). При этом структура пленок становилась зернистой в виде кристаллитов размером до 100 нм . При увеличении температуры отжига размеры зерен увеличивались, что приводило к формированию на поверхности сплошной зернистой структуры с поперечным размером кристаллитов до 200 нм (рис. 1 в, г). При этом отмечалось увеличение начальной толщины пленок.

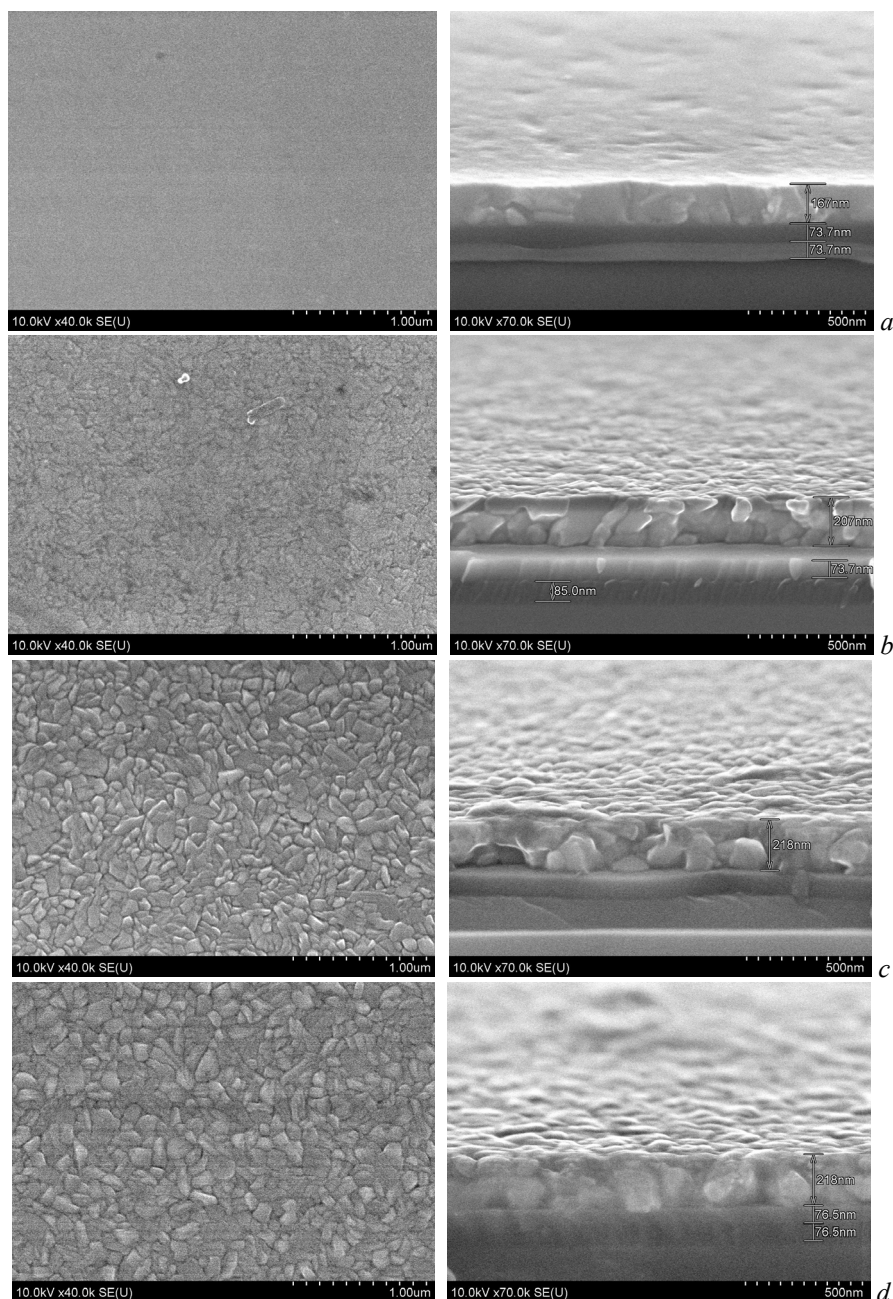


Рис. 1. СЭМ изображения поверхности и бокового среза пленок оксида ванадия, отожженных при различной температуре: *a* – $300\text{ }^\circ\text{C}$, *b* – $350\text{ }^\circ\text{C}$, *c* – $400\text{ }^\circ\text{C}$, *d* – $450\text{ }^\circ\text{C}$

Fig. 1. SEM images of the surface and cross section of vanadium oxide films annealed at different temperatures: *a* – $300\text{ }^\circ\text{C}$, *b* – $350\text{ }^\circ\text{C}$, *c* – $400\text{ }^\circ\text{C}$, *d* – $450\text{ }^\circ\text{C}$

Анализ пленок методом рамановской спектроскопии показал, что фазовый состав отожженных пленок имел большую зависимость от температуры отжига. На рис. 2 представлены КР спектры пленок оксида ванадия, нанесенных при $\Gamma_{O_2} = 25\%$ и отожженных в атмосфере O_2 в диапазоне температур 200–450 °С, $t_{an} = 10$ мин. При $T_{an} = 200$ –250 °С не отмечалось значительного изменения КР спектров. При температуре 275 °С формировались рамановские сдвиги при 762 cm^{-1} и 906 cm^{-1} , характерные для фазы V_4O_9 [6]. При увеличении температуры до 350 °С их интенсивность увеличивалась и уменьшалась полуширина. Уменьшение полуширины рамановских полос связано с переходом фазы V_4O_9 из аморфного состояния в поликристаллическое. При температуре отжига 325 °С на КР спектрах отмечалось формирование пиков других фаз оксида ванадия. Были обнаружены такие фазы, как VO_2 (пики на 195, 223, 260 и 615 cm^{-1}) [6, 7], V_2O_5 (пики на 145, 285, 303, 405, 483, 704 и 998 cm^{-1}) [6, 7], и переходная фаза с рамановскими сдвигами на 165, 846, 881, 939 и 1035 cm^{-1} , идентифицируемая разными источниками как V_3O_7 [6], V_6O_{13} [8], V_7O_{16} [9]. В данной статье эти полосы были обозначены VO_x , как предложено в [7].

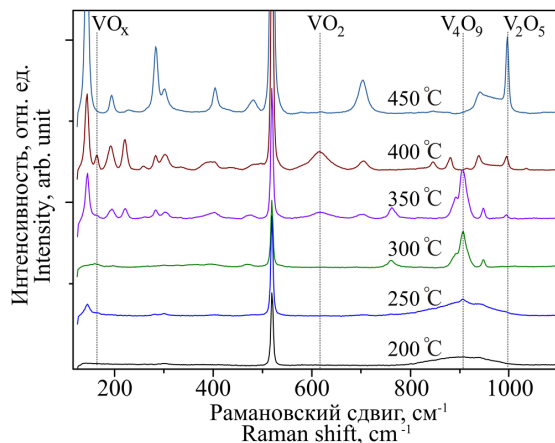


Рис. 2. Спектры комбинационного рассеяния пленок оксида ванадия после отжига в атмосфере кислорода ($\Gamma_{O_2} = 25\%$)

Fig. 2. Raman spectra of vanadium oxide films after annealing in an O_2 atmosphere ($\Gamma_{O_2} = 25\%$)

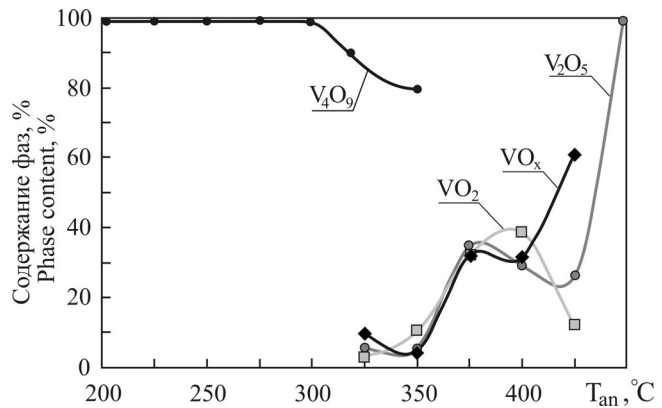


Рис. 3. Зависимость относительного содержания различных фаз оксида ванадия от температуры отжига ($\Gamma_{O_2} = 25\%$)

Fig. 3. Relative content of various phases of vanadium oxide as a function of annealing temperature ($\Gamma_{O_2} = 25\%$)

Для количественной оценки содержания фаз в пленке были выбраны рамановские полосы, характерные для различных фаз оксида ванадия: V_2O_5 (998 cm^{-1}), VO_2 (615 cm^{-1}), V_4O_9 (906 cm^{-1}), VO_x (165 cm^{-1}). При анализе предполагалось, что концентрация в пленке различных фаз оксида ванадия пропорциональна интенсивности их пиков. На рис. 3 представлена зависимость относительной концентрации различных фаз оксида ванадия от температуры отжига. Как видно из рисунка, при температурах до 300 °С пленки являлись однофазными и состояли из оксида V_4O_9 . При повышении температуры интенсивность линий оксида V_4O_9 уменьшалась, и при T_{an} более 350 °С данная фаза исчезала. При $T_{an} = 325$ °С формировались другие фазы оксида ванадия (VO_2 , V_2O_5 , VO_x), и при повышении температуры их содержание увеличивалось. Содержание оксида ванадия VO_2 достигало максимума концентрации 40 % при $T_{an} = 400$ °С и при дальнейшем увеличении температуры снижалось до нуля при 425 °С. При этом содержание оксидов VO_x и V_2O_5 продолжало увеличиваться. Содержание оксида VO_x достигало максимума 62 % при $T_{an} = 425$ °С, и также при более высоких температурах КР пики исчезали. При $T_{an} = 450$ °С на КР спектре пленки отмечены только пики, характерные для фазы V_2O_5 . То есть пленки окислялись до высшего оксида. Методом EBSD установлено, что поликристаллическая структура пленок формировалась при температурах более 300 °С. В зависимости от температуры отжига отмечено формирование моноклинной, кубической или смешанной моноклинной/кубической кристаллической решетки.

Проведены исследования влияния отжига в атмосфере O_2 на электрофизические характеристики пленок VO_x . На рис. 4 представлена зависимость удельного сопротивления при комнатной температуре от температуры отжига $\rho(T_{an})$ пленок оксида ванадия, нанесенных при различной концентрации кислорода в Ag/O_2 смеси газов. Как видно из рисунка,

зависимости $\rho(T_{an})$ имели сложный характер и во многом определялись Γ_{O_2} . Независимо от Γ_{O_2} , удельное сопротивление пленок оксида ванадия практически не изменялось при температурах отжига до 200–250 °С. Для пленок, нанесенных при Γ_{O_2} менее 25 %, при увеличении температуры до 300–350 °С удельное сопротивление снижалось до 10^{-6} – 10^{-5} Ом·м. При дальнейшем увеличении температуры ρ резко увеличивалось и достигало 1,0 Ом·м при температурах более 450 °С. При увеличении концентрации кислорода до 27,5 % снижение удельного сопротивления при температурах отжига 275–350 °С было не столь значительное – $\rho = (3 - 6) \cdot 10^{-3}$ Ом·м. При дальнейшем повышении T_{an} более 350 °С удельное сопротивление также увеличивалось и становилось более 1,0 Ом·м. При концентрации кислорода 33,34 % удельное сопротивление пленок практически не зависело от температуры отжига и составляло $(2 - 7) \cdot 10^{-2}$ Ом·м.

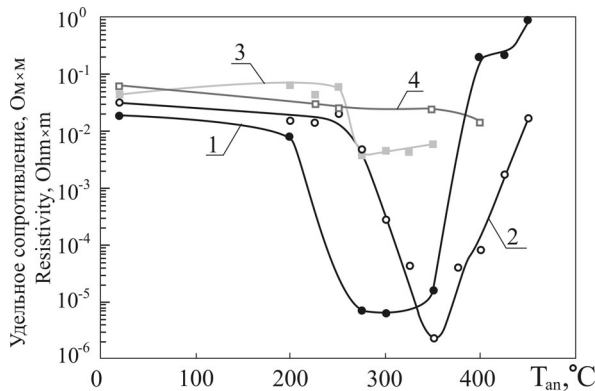


Рис. 4. Зависимость удельного сопротивления от температуры отжига пленок оксида ванадия, нанесенных при различной концентрации кислорода в Ar/O₂ смеси газов:

1 – 16,67 %, 2 – 25 %, 3 – 27,5 %, 4 – 33,34 %

Fig. 4. Resistivity as a function of annealing temperature of VO_x films deposited at various oxygen concentrations in an Ar/O₂ gas mixture: 1 – 16.67 %, 2 – 25 %, 3 – 27.5 %, 4 – 33.34 %

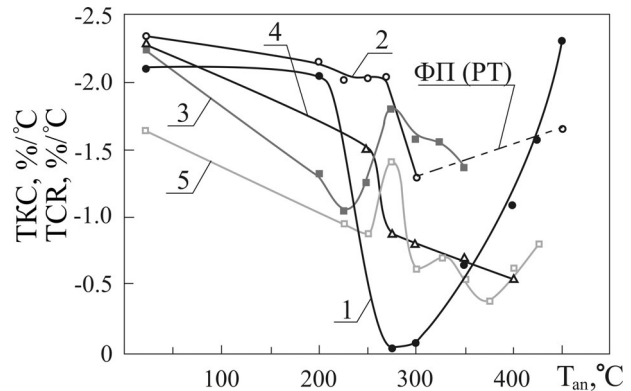


Рис. 5. Зависимость ТКС от температуры отжига пленок оксида ванадия, нанесенных при различной концентрации кислорода в Ar/O₂ смеси газов:

1 – 16,67 %, 2 – 25 %, 3 – 27,5 %, 4 – 29,17 %, 5 – 33,34 % (ФП – фазовый переход)

Fig. 5. Dependence of TCR on the annealing temperature of vanadium oxide films deposited at various oxygen concentrations in an Ar/O₂ gas mixture: 1 – 16.67 %, 2 – 25 %, 3 – 27.5 %, 4 – 29.17 %, 5 – 33.34 % (PT – phase transition)

ТКС пленок оксида ванадия также имел сложную зависимость от температуры отжига и Γ_{O_2} (рис. 5). Было обнаружено, что ТКС пленок связан с удельным сопротивлением. В основном пленки, имеющие низкое ρ , имели низкие значения ТКС. Для пленок, нанесенных при низких концентрациях кислорода ($\Gamma_{O_2} = 16,67$ %), ТКС снижался с 2,2 до 0,1–0,2 %/°С при температурах отжига 275–300 °С, что связано с уменьшением удельного сопротивления пленок. При дальнейшем увеличении T_{an} ТКС пленок увеличивался, что связано с увеличением ρ пленок. Для пленок, нанесенных при $\Gamma_{O_2} = 25$ %, ТКС незначительно снижался с 2,3 до 2,05 %/°С при $T_{an} = 275$ °С. При дальнейшем увеличении температуры происходило резкое снижение удельного сопротивления и ТКС пленок. Однако при этом наблюдалось формирование фазового перехода (ФП) с гистерезисом вблизи температуры 67 °С. Фазовый переход при данной температуре характерен для диоксида ванадия VO₂. Для пленок, нанесенных при большей концентрации кислорода ($\Gamma_{O_2} \geq 27,5$ %), фазовый переход отсутствовал. ТКС пленок в общем случае имел более низкие значения и снижался при увеличении температуры отжига. Однако при $T_{an} = 225$ –350 °С наблюдались скачки ТКС, что, по-видимому, связано с изменением степени окисления ванадия и структуры пленок.

Для оценки ФП измерялось сопротивление пленок в предельных точках гистерезиса и рассчитывался скачок сопротивления $\gamma = R_{max}/R_{min}$. Установлено, что при увеличении температуры отжига скачок сопротивления при ФП увеличивался и достигал максимума ($\gamma = 230$) при $T_{an} = 400$ °С. При дальнейшем увеличении температуры происходило уменьшение γ , и при $T_{an} = 450$ °С фазовый переход пропадал. Для расчета оптической ширины запрещенной зоны получены спектры оптического пропускания пленок оксида ванадия, отожженных при различной температуре (рис. 6). Пленки VO_x, нанесенные при $\Gamma_{O_2} = 25$ %, обладали высоким

оптическим поглощением. Коэффициент пропускания на длине волны 630 нм составлял 0,13. Край оптического пропускания находился на длине волны около 350 нм. При температурах отжига 200–275 °С коэффициент пропускания пленок незначительно повышался до 0,175. При этом край оптического пропускания практически не изменялся. Резкое изменение спектра пропускания наблюдалось при $T_{an} = 300$ °С. Коэффициент пропускания пленок увеличивался до 0,25, и край оптического пропускания смещался до 450 нм. При дальнейшем увеличении температуры оптическое пропускание уменьшалось до 0,18 и далее увеличивалось до 0,44 при $T_{an} = 400$ °С. При этом край оптического пропускания смещался до 475 нм.

С использованием полученных оптических спектров проведены расчеты оптической ширины запрещенной зоны пленок. На рис. 7 представлены зависимости E_g от температуры отжига для прямых (1) и непрямых переходов (2). Рассчитанная ширина запрещенной зоны для непрямых переходов имела меньшие значения по сравнению с прямыми переходами, но характер кривых был сходным. Ширина запрещенной зоны для пленок, отожженных при температурах до 300 °С, практически не изменялась и для прямых и непрямых переходов составляла соответственно $E_g^{dir} = 3,78$ эВ и $E_g^{indir} = 3,50$ эВ. При $T_{an} = 300$ °С ширина запрещенной зоны резко уменьшалась и достигала минимума $E_g^{dir} = 2,76$ эВ и $E_g^{indir} = 2,10$ эВ в диапазоне температур отжига 300–400 °С. При дальнейшем увеличении температуры ширина запрещенной зоны резко увеличивалась до $E_g^{dir} = 3,82$ эВ и $E_g^{indir} = 3,65$ эВ при $T_{an} = 450$ °С.

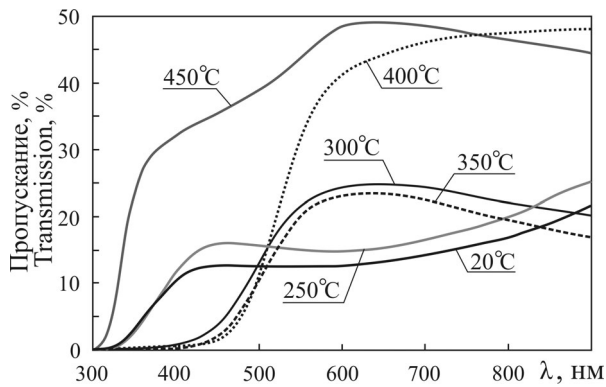


Рис. 6. Спектры оптического пропускания пленок оксида ванадия, отожженных при различной температуре ($\Gamma_{O_2} = 25\%$)

Fig. 6. Optical transmission spectra of vanadium oxide films annealed at different temperatures ($\Gamma_{O_2} = 25\%$)

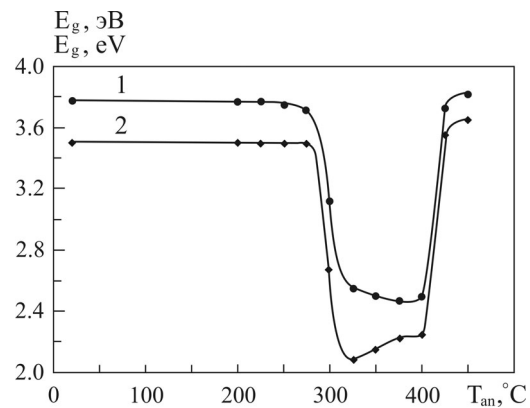


Рис. 7. Зависимость ширины запрещенной зоны пленок оксида ванадия для прямых (1) и непрямых (2) разрешенных переходов от температуры отжига ($\Gamma_{O_2} = 25\%$)

Fig. 7. Dependence of the band gap of VO_x films for direct (1) and indirect (2) transitions on the annealing temperature ($\Gamma_{O_2} = 25\%$)

Анализ полученных результатов показывает, что отжиг в атмосфере кислорода оказывает большое влияние на характеристики пленок оксида ванадия. При реактивном магнетронном распылении формируются аморфные пленки с недостатком кислорода (промежуточные оксиды). Так, при $\Gamma_{O_2} = 25\%$ формируются пленки состава $V:O = 2,25$. При отжиге процессы кристаллизации наблюдаются при температурах более 275 °С. При этом формируются поликристаллические пленки с моноклинной, кубической или смешанной кристаллической решеткой, и происходит переход от промежуточного оксида V_4O_9 к смешанной фазе $VO_2/VO_x/V_2O_5$ и далее к высшему оксиду V_2O_5 . То есть при отжиге в атмосфере O_2 происходит дальнейшее окисление и кристаллизация пленок. Однако в смешанной фазе в пленке, по-видимому, формируются отдельные области или кристаллиты с различной степенью окисления. Наличие фазы VO_2 говорит о формировании при отжиге в атмосфере O_2 кристаллитов со степенью окисления, меньшей, чем исходный состав пленки (для VO_2 отношение $V:O = 2$). Изменения удельного сопротивления, ТКС и E_g пленок при изменении температуры отжига имеют сложный характер и во многом определяются Γ_{O_2} . Так, для пленок, нанесенных при $\Gamma_{O_2} < 25\%$, изменения ρ , ТКС и E_g наблюдаются при температурах более 250–275 °С. При этом происходит резкое падение ρ , ТКС и E_g . При дальнейшем увеличении температуры отжига эти параметры опять увеличиваются. По-видимому,

изменения характеристик связаны с образованием оксида ванадия VO_2 . Наибольший скачок сопротивления при фазовом переходе как раз наблюдается в пленках с наибольшим содержанием фазы VO_2 . Для пленок, нанесенных при большой концентрации кислорода ($G_{\text{O}_2} > 25\%$), не отмечается значительных изменений ρ и ТКС, что, по-видимому, связано с первоначальным нанесением пленок, по составу близких к предельному оксиду.

Заключение

Проведены исследования влияния параметров процесса распыления и последующего отжига в атмосфере O_2 на характеристики пленок оксида ванадия, нанесенных методом реактивного магнетронного распыления V мишени в Ar/O_2 смеси газов. Установлено, что температура отжига оказывает большое влияние как на структурно-фазовые, так и электрофизические характеристики пленок оксида ванадия. При отжиге пленки переходят из аморфного состояния в поликристаллическое. При этом происходит их дальнейшее окисление, и при повышении температуры до 450°C пленки окисляются до высшего оксида V_2O_5 . Изменение состава и структуры пленок приводит к резким изменениям их электрических характеристик. Установлено, что электрические характеристики пленок оксида ванадия определяются концентрацией различных оксидов в пленке. При концентрации кислорода в Ar/O_2 смеси газов 25% в процессе нанесения и при последующем отжиге при температуре $250\text{--}275^\circ\text{C}$ в атмосфере кислорода в течение 10 мин получены пленки оксида ванадия с удельным сопротивлением $(1,0 - 3,0) \cdot 10^{-2}$ Ом·м, температурным коэффициентом сопротивления $2,05\%/^\circ\text{C}$ и шириной запрещенной зоны для прямых переходов $3,76\text{--}3,78$ эВ. Полученные характеристики позволяют использовать данные пленки в качестве термочувствительных слоев неохлаждаемых микроболометров.

Список литературы

1. Rogalski A. Infrared Detectors for the Future. *Acta physica polonica A*. 2009;116(3):389-406.
2. Mauger A, Julien Ch. M. Review V_2O_5 thin films for energy storage and conversion. *AIMS Materials Science*. 2018;5(3):349-401. DOI: 10.3934/matserci.2018.3.349.
3. Нгуен Т.Д., Занько А.И., Голосов Д.А., Завадский С.М., Мельников С.Н., Колос В.В. Электрофизические свойства пленок оксида ванадия, нанесенных методом реактивного магнетронного распыления. *Доклады БГУИР*. 2020;18(6):94-102.
4. Suh J. Y., Lopez R., Feldman L.C., Haglund Jr. R.F. Semiconductor to metal phase transition in the nucleation and growth of VO_2 nanoparticles and thin films. *Journal of Applied Physics*. 2004;96(2):1209-1213.
5. Рембеза С.И. *Методы измерения основных параметров полупроводников*. Воронеж: Изд-во ВГУ; 1989.
6. Shvets P., Dikaya O., Maksimova K., Goikhman A. A review of Raman spectroscopy of vanadium oxides. *Journal of Raman spectroscopy*. 2019;50(8):1226-1244. DOI: 10.1002/jrs.5616.
7. Ureña-Begara F., Crunteanub A., Raskina J.-P. Raman and XPS characterization of vanadium oxide thin films with temperature. *Applied Surface Science*. 2017;403:717-727. DOI:10.1016/j.apsusc.2017.01.160.
8. Zhang Ch., Yang Q., Koughia C., Ye F., Sanayei M., Wen Sh.-J., Kasapa S. Characterization of vanadium oxide thin films with different stoichiometry using Raman spectroscopy. *Thin Solid Films*. 2016;620:64-69.
9. Huotari J., Lappalainen J., Eriksson J., Bjorklund R., Heinonen E., Miinalainen I., Puustinen J., Lloyd Spetz A. Synthesis of nanostructured solid-state phases of V_7O_{16} and V_2O_5 compounds for ppb-level detection of ammonia. *Journal of Alloys and Compounds*. 2016;675:433-440.

References

1. Rogalski A. Infrared Detectors for the Future. *Acta physica polonica A*. 2009;116(3):389-406.
2. Mauger A., Julien Ch.M. Review V_2O_5 thin films for energy storage and conversion. *AIMS Materials Science*. 2018;5(3):349-401. DOI: 10.3934/matserci.2018.3.349.
3. Nguyen T.D., Zanko A.I., Golosov D.A., Zavadski S.M., Melnikov S.N., Kolos V.V., To T.K. [Influence of annealing on structural, phase and electrophysical properties of vanadium oxide films]. *Doklady BGUIR = Doklady BGUIR*. 2020;18(6):94-102. (In Russ.)
4. Suh J.Y., Lopez R., Feldman L.C., Haglund Jr. R.F. Semiconductor to metal phase transition in the nucleation and growth of VO_2 nanoparticles and thin films. *Journal of Applied Physics*. 2004;96(2):1209-1213.

5. Rembeza S.I. [Methods for measuring basic parameters of semiconductors]. Voronezh: Izdatelstvo VGU; 1989. (In Russ.)
6. Shvets P., Dikaya O., Maksimova K., Goikhman A. A review of Raman spectroscopy of vanadium oxides. *Journal of Raman spectroscopy*. 2019;50(8):1226-1244. DOI: 10.1002/jrs.5616.
7. Ureña-Begara F., Crunteanub A., Raskina J.-P. Raman and XPS characterization of vanadium oxide thin films with temperature. *Applied Surface Science*. 2017;403:717–727. DOI:10.1016/j.apsusc.2017.01.160.
8. Zhang Ch., Yang Q., Koughia C., Ye F., Sanayei M., Wen Sh.-J., Kasapa S. Characterization of vanadium oxide thin films with different stoichiometry using Raman spectroscopy. *Thin Solid Films*. 2016;620:64-69.
9. Huotari J., Lappalainen J., Eriksson J., Bjorklund R., Heinonen E., Miinalainen I., Puustinen J., Lloyd Spetz A. Synthesis of nanostructured solid-state phases of V_7O_{16} and V_2O_5 compounds for ppb-level detection of ammonia. *Journal of Alloys and Compounds*. 2016;675:433-440.

Вклад авторов / Authors contribution

Все авторы в равной степени внесли вклад в написание статьи.

All authors have equally contributed to writing the article.

Сведения об авторах

Нгуен Т.Д., аспирант кафедры электронной техники и технологии Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Занько А.И., инженер-технолог ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ».

Голосов Д.А., к.т.н., доцент, ведущий научный сотрудник Центра 9.1. НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Завадский С.М., к.т.н., доцент, начальник Центра 9.1. НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Мельников С.Н., к.т.н., ведущий научный сотрудник Центра 9.1. НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Колос В.В., заместитель заведующего отраслевой лаборатории новых технологий и материалов ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ».

То Т.К., магистрант кафедры электронной техники и технологии Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Information about the authors

Nguyen T.D., Postgraduate student at the Electronic Technique and Technology Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Zanko A.I., Process Engineer of JSC “INTEGRAL” – the managing company of the “INTEGRAL” holding.

Golosov D.A., PhD, Associate Professor, Leader Researcher at the Center 9.1 of R&D Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Zavadski S.M., PhD, Associate Professor, Head of the Center 9.1 of R&D Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Melnikov S.N., PhD, Leader Researcher at the Center 9.1 of R&D Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Kolos V.V., Deputy Head of the Industry Laboratory of New Technologies and Materials of JSC “INTEGRAL” – the managing company of the “INTEGRAL” holding.

To T.Q., Undergraduate student at the Electronic Technique and Technology Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники;
тел. +375-29-671-35-43;
e-mail: golosov@bsuir.by
Голосов Дмитрий Анатольевич

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki str., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics;
tel. +375-29-671-35-43;
e-mail: golosov@bsuir.by
Golosov Dmitriy Anatol'evich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2021-19-3-31-39>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.396

СПОСОБ АВТОМАТИЧЕСКОГО СОГЛАСОВАНИЯ АНТЕННЫ И ВЫХОДНЫХ КАСКАДОВ ПЕРЕДАТЧИКА

Д.А. КОВАЛЕВИЧ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)*

Поступила в редакцию 27 января 2021

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2021

Аннотация. Данная работа посвящена исследованию автоматических антенных согласующих устройств коротковолнового диапазона. Рассмотрены устройства узкополосного согласования на основе дискретных наборов реактивных элементов. Произведена классификация наиболее часто используемых способов автоматического согласования. Проанализированы достоинства и недостатки каждого способа. Приведены примеры использования различных подходов в серийно выпускаемых устройствах. Особое внимание уделено расчетному способу согласования как наиболее перспективному для использования в современных средствах связи. Сделаны предположения о причинах редкого применения его в серийных устройствах. Разработаны схемы для моделирования влияния паразитных параметров компонентов согласующей цепи и корпуса согласующего устройства на результирующий коэффициент стоячей волны при использовании данного способа. По результатам моделирования сделаны выводы о причинах низкого качества работы расчетного способа. В качестве альтернативы предложен новый способ автоматического согласования, сочетающий в себе достоинства расчетного и поискового, который базируется на моделировании процесса поиска с использованием имитационной модели. Определены условия его применения в автоматических антенных согласующих устройствах. Произведен сравнительный анализ особенностей использования как известных способов автоматического согласования, так и вновь предложенного.

Ключевые слова: мобильная антенна, активное и реактивное сопротивление, коэффициент стоячей волны, антенное согласующее устройство, согласующая цепь.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Ковалевич Д.А. Способ автоматического согласования антенны и выходных каскадов передатчика. Доклады БГУИР. 2021; 19(3): 31-39.

METHOD FOR AUTOMATIC ANTENNA MATCHING WITH TRANSMITTER OUTPUT STAGE

DMITRY A. KOVALEVICH

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 27 January 2021

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2021

Abstract. This work is devoted to the study of automatic antenna tuning units of the short-wave range. Devices of narrowband matching based on discrete sets of reactive elements are considered. A classification of the most frequently used automatic matching methods has been made. The advantages and disadvantages of each method are analyzed. Examples of using different approaches in commercially available devices are given. Particular attention is paid to the calculation method of matching, as the most promising for use in modern communications. Assumptions are made about the reasons for its rare use in serial devices. Circuits have been developed to simulate the influence of parasitic parameters of the components of the matching circuit and the body of the tuning unit on the resulting standing wave ratio when using this method. Based on the simulation results, conclusions were drawn about the reasons for the low quality of the calculation method. As an alternative, a new method of automatic tuning is proposed, combining the advantages of computation and search methods, which is based on modeling the search process using a simulation model. The conditions for its application in automatic antenna tuning units are determined. A comparative analysis of the features of both the known methods of automatic tuning and the newly proposed one is made.

Keywords: mobile antenna, active and reactive resistance, standing wave ratio, antenna tuning unit, matching circuit.

Conflict of interests. The author declares no conflict of interests.

For citation. Kovalevich D.A. Method for automatic antenna matching with transmitter output stage. Doklady BGUIR. 2021; 19(3): 31-39.

Введение

Узкополосные антенные согласующие устройства (СУ) обеспечивают согласование сопротивлений антенны и выходных каскадов передатчика на заданной рабочей частоте и перестраиваются всякий раз при смене частоты. Наибольшее распространение получили СУ с согласующими цепями (СЦ) на дискретных элементах, поскольку это решение является наиболее простым и универсальным.

Для достижения целевого качества согласования могут использоваться различные методы:

- расчетный;
- поисковый;
- комбинированный.

Наиболее очевидный и простой способ согласовать произвольное сопротивление антенны с выходным сопротивлением передатчика – рассчитать номиналы согласующих элементов [1–3]. Вместе с тем необходимо констатировать, что расчетный способ может быть использован только в том случае, если импеданс нагрузки может быть точно измерен. С целью повышения качества согласования, при ограниченном динамическом диапазоне измерителя импеданса антенны, применяют итерационный расчетный алгоритм. Описание этого способа приведено в [4]. Суть метода состоит в том, что коррекция номиналов трансформирующего и компенсирующего элементов производится в соответствии с той же формулой, что и их первоначальная установка. Выигрыш заключается в том, что при приближении сопротивления

согласованной нагрузки к целевому, повышается точность измерений, а младшие разряды согласующих элементов пересчитываются с учетом погрешности установки старших.

Как разновидность расчетного метода согласования, в некоторых устройствах производства фирмы Rohde&Schwarz (Antenna Tuning Units (ATU) R&S FK2100 and R&S FK2100M. Datasheet. https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl_downloads/dl_common_library/dl_brochures_and_datasheets/pdf_1/FK2100_FK2100M_en.pdf) используется алгоритм «Silent tuning». Он позволяет настроить согласующее устройство за время, не превышающее время загрузки информации из памяти устройства. В этом режиме согласующее устройство предварительно «запоминает» номиналы элементов согласующей цепи для предопределенного массива частот (максимальное количество частот в памяти устройства – 1500). Далее, при настройке на произвольной частоте происходит расчет параметров согласующих элементов с использованием сохраненных данных и механизма интерполяции.

Стоит отметить, что расчетный метод практически не нашел применения в серийных устройствах. Это можно подтвердить анализом заявленного в технической документации времени настройки, которое в десятки раз превышает время загрузки состояния элементов СЦ из памяти устройства [5]. К тому же при анализе доступных электрических принципиальных схем этих устройств становится очевидным, что реализация измерительных датчиков не обеспечивает высокой точности измерений в широком диапазоне сопротивлений нагрузки. Из этого следует, что используются преимущественно поисковый либо комбинированный способы. Однако в некоторых случаях, когда диапазон изменения сопротивления антенны небольшой, расчетные методы все же могут использоваться [6].

Наиболее широко применяются СУ, использующие поисковый метод. Его сущность заключается в том, что в процессе поиска, путем целенаправленного изменения номиналов реактивных элементов СЦ, достигается выполнение того или иного критерия качества согласования, контролируемое при помощи соответствующих датчиков [1]. Наибольшее распространение получил метод, известный как метод взвешивания, или поразрядного уравнивания [4]. Он характеризуется тем, что решение о сбросе или фиксации воздействия может быть принято лишь тогда, когда будет получена информация о его результативности, которая оценивается датчиками-компараторами активного сопротивления, активной проводимости и фазы. В этом случае время настройки СУ не превосходит произведения количества коммутаторов на время переключения каждого. Если это время значительно больше, то компараторы активного сопротивления и активной проводимости отсутствуют, а алгоритм поиска используется иной. Такой вариант измерительных датчиков применен в устройстве SGC MAC200 (MAC-200 master antenna controller. User manual. 2003). Как следует из технического описания устройства, массив детекторов в MAC-200 контролирует только модуль и фазу сопротивления, а также коэффициент стоячей волны (КСВ) нагрузки.

В тех случаях, когда предъявляются высокие требования как к скорости перестройки, так и к качеству согласования, может быть использован алгоритм настройки комбинированного типа. Комбинированный способ – это поисковый алгоритм, использующий предварительный приближенный расчет номиналов СЦ с целью ограничения диапазона поиска и, как следствие, уменьшения времени настройки и увеличения ресурса коммутирующих элементов. Он часто используется в серийных устройствах наряду с поисковым. Так, в согласующем устройстве MFJ-928 (MFJ Compact Intellytuner Automatic Antenna Tuner. Model MFJ-928. Instruction manual. 2005) используется комбинированный алгоритм «IntelliTune». В процессе согласования устройство первоначально рассчитывает номиналы согласующих элементов. Для этого измеряется комплексное сопротивление антенны на частоте передачи, затем выполняется точная настройка поисковым методом для достижения минимально возможного КСВ.

Анализ недостатков существующих способов согласования

Основной проблемой эксплуатации коротковолновых (КВ) радиостанций малой и средней мощности на мобильных узлах связи является то, что параметры используемых антенн обусловлены условиями их развертывания и не могут быть статичными. Это требует неоднократного проведения процедуры согласования. К тому же в современных средствах

КВ радиосвязи прослеживается тенденция к увеличению числа заранее подготовленных каналов, которое может достигать нескольких тысяч, за счет наличия режимов автоматической установки соединения и псевдослучайной перестройки рабочей частоты. В этом случае настройка антенны при развертывании антенного поля мобильного пункта связи поисковым способом становится проблематичной. Помимо этого, режим поискового согласования сопровождается множественными переключениями коммутационных элементов под напряжением, что значительно снижает их ресурс, а большая длительность этого процесса является серьезным демаскирующим фактором.

Применение комбинированного метода позволяет уменьшить время поиска в несколько раз, но все же выигрыш существует не для всех нагрузок и рабочих частот. Например, для электрически коротких антенн в нижней части КВ диапазона нельзя исключить ни старшие разряды элементов СЦ, так как рабочая частота достаточно низкая, ни младшие, так как добротность антенны высокая [7].

Оптимальным с точки зрения времени согласования ресурса коммутационных элементов и демаскирования передатчика является расчетный способ. При использовании современных процессоров время расчета номиналов СЦ будет на несколько порядков меньше, чем время коммутации электромагнитных реле. Однако данный способ практически не используется. Причинами этого являются как низкая точность применяемых измерителей, так и наличие у элементов СЦ паразитных параметров, которые искажают результаты измерений.

При создании СУ используются реальные реактивные элементы. Их параметры отличаются от параметров идеальных наличием потерь и резонансов. К тому же значительное влияние оказывает сама конструкция СУ. Можно выделить основные механизмы, которые снижают результативность расчетного способа согласования:

- активные потери в индуктивных элементах СЦ;
- емкость катушек индуктивности на корпус СУ;
- индуктивность подключения конденсаторов.

Чтобы доказать это утверждение, необходимо смоделировать поведение СУ, использующего расчетный способ, как под влиянием каждого из этих механизмов в отдельности (это позволит оценить вес каждого в суммарном результате), так и под их комплексным воздействием (эквивалент реальной конструкции СУ). Для качественной оценки будет использована модель двухэлементного СУ (рис. 1, а). Расчет номиналов элементов СЦ осуществлен для трех частотных точек – нижней части рабочего диапазона (3 МГц), средней (12 МГц) и верхней частей (24 МГц) с применением выражений из [8]. В качестве параметров нагрузки использованы данные измерений входного импеданса антенны АШ-4. Результаты расчетов приведены в табл. 1.

Таблица 1. Номиналы элементов СЦ
Table 1. Matching network (MN) elements values

Частота настройки СУ, кГц TU tuning frequency, kHz	Активное сопротивление антенны, Ом Antenna resistance, Ohm	Реактивное сопротивление антенны, Ом Antenna reactance, Ohm	Тип СЦ MN type	Номинал катушки индуктивности, мкГн Inductor rating, μH	Номинал конденсатора, пФ Capacitor rating, pF
3000	4,253	-624,3	Г-звено	33,86	3480
12000	27,8	-17,79	Г-звено	0,576	237
24000	1085	-134,1	обратное	1,518	26,88

Для оценки влияния паразитных параметров компонентов и конструкции СУ были использованы эквивалентные схемы, изображенные на рис. 1, b – e. На рис. 2–6 представлены результаты моделирования работы СУ для схем, изображенных на рис. 1, для разных частотных диапазонов.

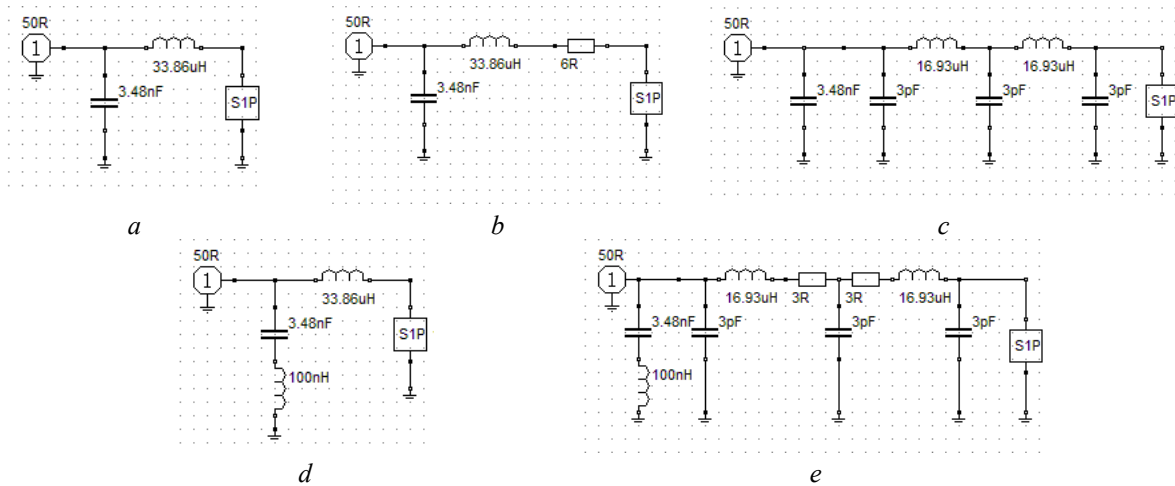


Рис.1. Схемы для моделирования влияния паразитных параметров СУ на частоте 3 МГц: *a* – на идеальных элементах; *b* – с учетом активных потерь в катушках индуктивности; *c* – с учетом емкости катушек индуктивности на корпусе СУ; *d* – с учетом индуктивности подключения конденсаторов; *e* – с учетом всех паразитных параметров

Fig. 1. Circuits for modeling the influence of the tuning (TU) parasitic parameters at a frequency of 3 MHz: *a* – on ideal elements; *b* – taking into account the active losses in the inductors; *c* – taking into account the capacity of the inductance coils on the TU case; *d* – taking into account the capacitor connection inductance; *e* – taking into account all parasitic parameters

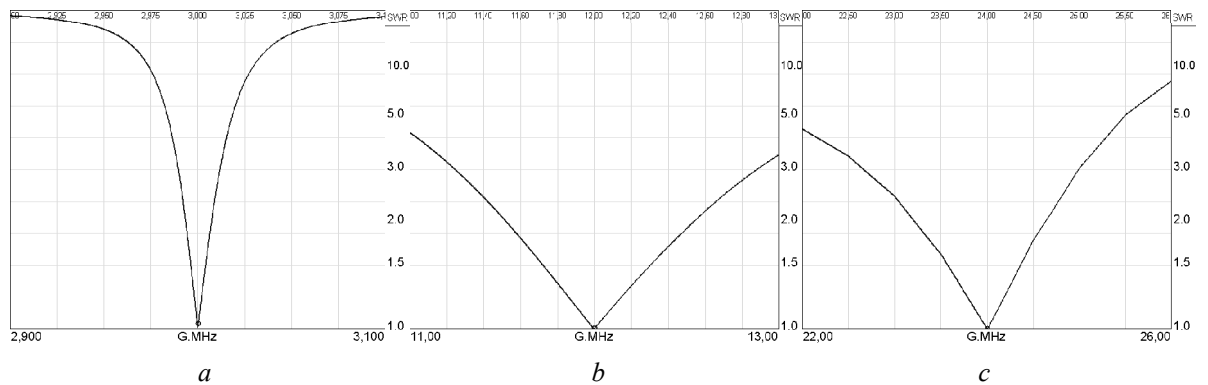


Рис. 2. КСВ на входе СУ при использовании идеальных элементов на частоте: *a* – 3 МГц; *b* – 12 МГц; *c* – 24 МГц

Fig. 2. SWR at the TU input when using ideal elements at frequency: *a* – 3 MHz; *b* – 12 MHz; *c* – 24 MHz

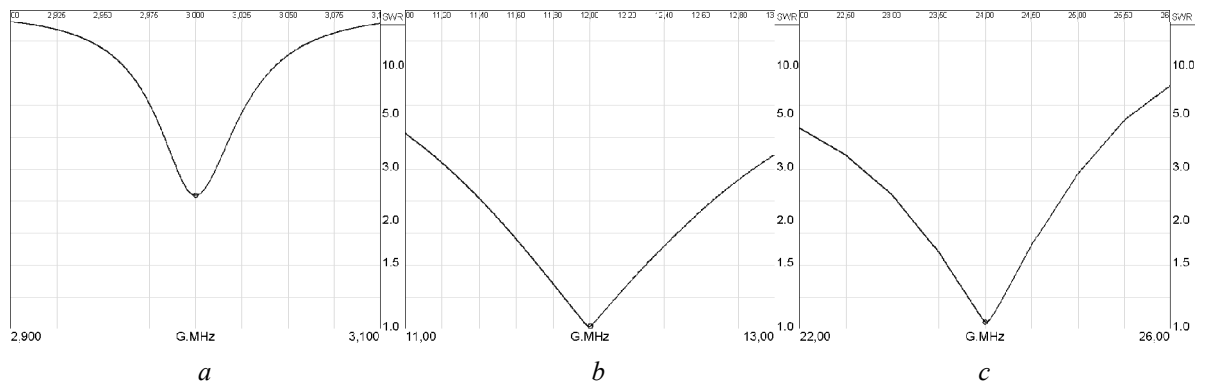


Рис. 3. КСВ на входе СУ с учетом активных потерь в индуктивных элементах на частоте: *a* – 3 МГц; *b* – 12 МГц; *c* – 24 МГц

Fig. 3. SWR at the TU input taking into account active losses in inductive elements at frequency: *a* – 3 MHz; *b* – 12 MHz; *c* – 24 MHz

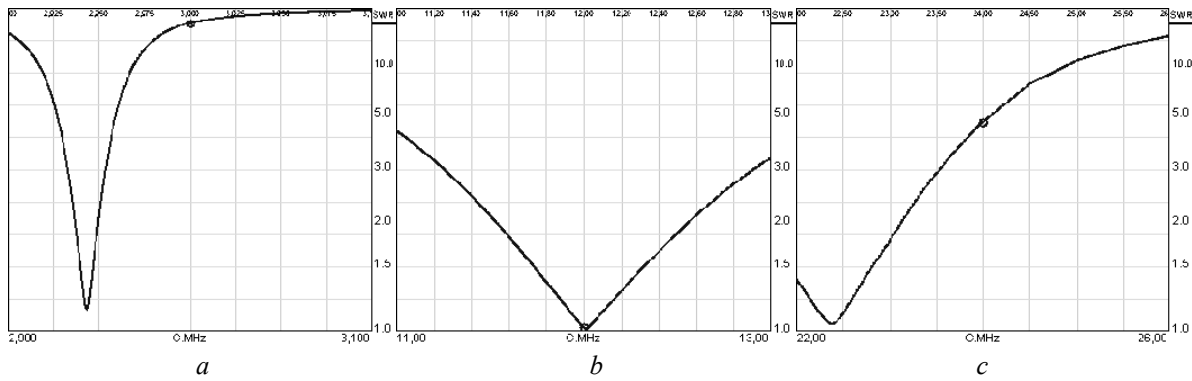


Рис. 4. КСВ на входе СУ с учетом емкости катушек индуктивности на корпус на частоте:
 $a - 3$ МГц; $b - 12$ МГц; $c - 24$ МГц

Fig. 4. SWR at the TU input taking into account inductors to case capacity at frequency:
 $a - 3$ MHz; $b - 12$ MHz; $c - 24$ MHz

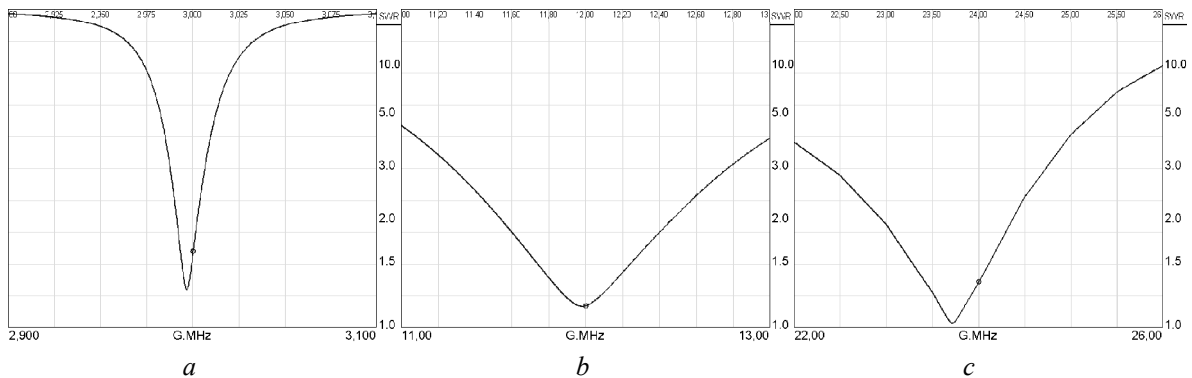


Рис. 5. КСВ на входе СУ с учетом индуктивности подключения конденсаторов на частоте:
 $a - 3$ МГц; $b - 12$ МГц; $c - 24$ МГц

Fig. 5. SWR at the TU input, taking into account the capacitors connection inductance at a frequency:
 $a - 3$ MHz; $b - 12$ MHz; $c - 24$ MHz

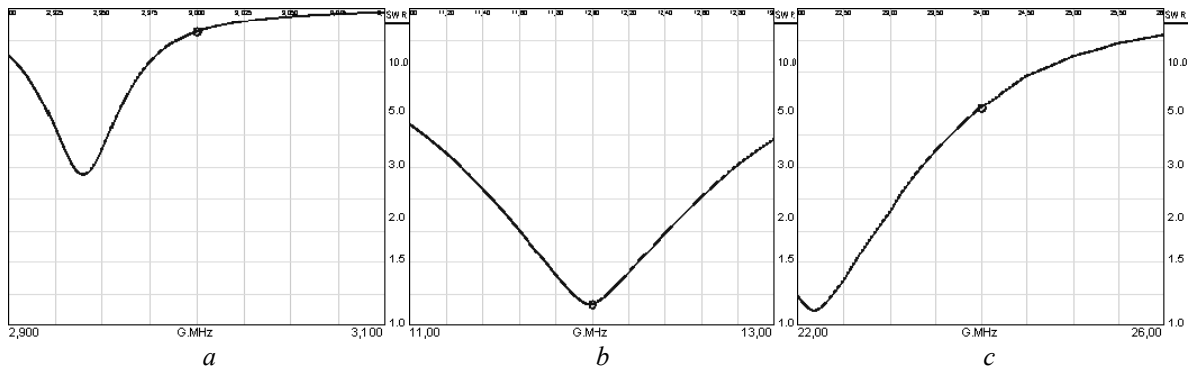


Рис. 6. КСВ на входе СУ под влиянием всех паразитных параметров на частоте:
 $a - 3$ МГц; $b - 12$ МГц; $c - 24$ МГц

Fig. 6. SWR at the TU input under the influence of all parasitic parameters at a frequency:
 $a - 3$ MHz; $b - 12$ MHz; $c - 24$ MHz

Анализ результатов моделирования показывает, что паразитные параметры оказывают наибольшее влияние при высокой добротности антенны (3 МГц), а также на верхних частотах рабочего диапазона (24 МГц). Основное влияние на качество согласования оказывает паразитная емкость катушек индуктивности на корпус СУ – частота настройки СЦ существенно снижается, КСВ становится недопустимо высоким (более 5). Вторым по значимости механизмом является наличие активных потерь, влияние которых проявляется только при низком активном сопротивлении антенны (3 МГц). КСВ при этом ухудшается незначительно (не более 3). Наименьшее влияние оказывает индуктивность подключения конденсаторов. Стоит отметить, что для анализа использовалась упрощенная модель СЦ,

состоящая из двух элементов. В реальных устройствах реактивные элементы СЦ реализованы в виде дискретных наборов, что значительно увеличивает степень влияния паразитных параметров. Из этого можно сделать вывод о том, что наличие паразитных параметров, не учтенных в расчетах номиналов элементов СЦ, делает расчетный способ согласования практически непригодным к использованию.

Новый способ автоматического согласования антенны и выходного каскада передатчика

Для современных СУ представляет интерес разработка нового алгоритма автоматического согласования, позволяющего обеспечить качество, приближенное к качеству поискового, при всех остальных свойствах расчетного алгоритма. В общем виде постановка задачи может быть сформулирована как определение состояния элементов СЦ, которое обеспечивает достижение целевого качества согласования системы «СУ-антенна» с выходными каскадами передатчика. Попытка аналитического учета только активных потерь в согласующих элементах приводит к необходимости решения дифференциального уравнения численными методами [1]. Учет паразитных реактивностей значительно усложняет задачу. В случае реализации СУ на базе дискретного набора реактивных элементов, паразитные параметры могут изменяться не монотонно с изменением номинала элемента СЦ, а определяться типом используемых компонентов непосредственно в каждом разряде дискретного набора. Это объясняет отсутствие серийно выпускаемых СУ, использующих расчетный способ.

Наиболее простым решением в этом случае является виртуальный поиск – моделирование процесса поразрядного поиска либо комбинированный алгоритм с применением его результатов для управления аппаратной частью СУ. Для этого необходимо разработать модель аппаратной части, используя схемы замещения элементов СЦ, и определить их параметры¹. В рамках полученной модели можно менять состояние коммутирующих элементов, тем самым меняя эквивалентную схему четырехполюсника, образованную элементами СЦ. На ее основании можно рассчитывать результирующее сопротивление на входе СУ по известному сопротивлению антенны. Состояние же коммутирующих элементов будет определяться типом используемого алгоритма итерационного поиска. При использовании современных вычислительных платформ время настройки будет определяться временем однократного переключения коммутирующих элементов, аналогично расчетному способу.

Для обеспечения задачи автоматического согласования с использованием виртуального поиска требуется соблюдение ряда условий:

- известен импеданс антенны на рабочей частоте с требуемой точностью;
- определены все паразитные реактивности СЦ, необходимые для использования имитационной модели;
- известны активные потери в индуктивных элементах СЦ для любой частоты в рабочем диапазоне частот СУ.

Для упрощения расчетов могут быть приняты некоторые допущения:

- добротность емкостных элементов СЦ высокая и не требует учета (она превосходит добротность индуктивных элементов СЦ более чем на порядок¹);
- собственный резонанс всех элементов СЦ находится за пределами рабочего диапазона частот СУ (резонанс в рабочем диапазоне в принципе недопустим, так как при помощи такого элемента не может быть реализована ни трансформирующая, ни компенсирующая функция).

Необходимо отметить, что при широком диапазоне изменения импеданса антенны собственная частота резонанса старших разрядов дискретных индуктивных элементов СЦ может находиться в рабочем диапазоне. В этом случае (т. е. при работе на частотах, близких к резонансным) такие элементы полностью отключаются от схемы и не учитываются при расчетах. Подобное решение применено в радиостанции Р-134 (Радиостанция Р-134. Техническое описание. Ч. 2. 1980).

¹ Ковалевич Д.А. Моделирование процесса согласования автоматических антенных согласующих устройств коротковолнового диапазона. 55-я юбилейная конференция аспирантов, магистрантов и студентов учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники». Сборник тезисов докладов. 2019; 79-80.

Результаты сравнения качества работы виртуального поиска с поисковым способом автоматического согласования при помощи имитационного моделирования показывают полное их совпадение при корректном определении параметров элементов модели. Отличие возникает только в том случае, если параметры моделей существенно различаются. Из вышеизложенного следует, что качество работы данного способа автоматического согласования будет во многом определяться точностью описания моделей элементов СЦ.

Сравнительная оценка различных способов автоматического согласования

Для удобства сравнения различных способов согласования между собой, их особенности сведены в табл. 2.

Таблица 2. Особенности различных способов согласования
Table 2. Features of the various matching methods

Параметр/метод Parameter / method	Поисковый метод Search method	Расчетный метод Calculation method	Комбинированный метод Combined method	Виртуальный поиск Virtual search
Длительность согласования	1...10 с	менее 10 мс	0,1...10 с	менее 10 мс
Максимальный КСВ на входе СУ	1...2	более 10	1...2	1...2*
Производительность вычислительной платформы	низкая	средняя	средняя	высокая
Точность датчиков	низкая	высокая	средняя	высокая
Информации о параметрах СЦ	не требуется	частичная	частичная	полная
Примечание – *Определяется точностью моделей элементов СЦ и датчиков импеданса антенны.				

Заключение

Предложен новый способ автоматического согласования антенны и выходного каскада передатчика, сочетающий в себе достоинства как расчетного, так и поискового способов, который базируется на моделировании процесса поиска с использованием имитационной модели. Определены условия его применения в автоматических антенных согласующих устройствах. Произведен сравнительный анализ особенностей использования, как известных способов автоматического согласования, так и вновь предложенного.

Показано, что для использования предложенного способа необходимо наличие корректных сведений о всех параметрах СЦ, а так же информации с датчика импеданса, обеспечивающего требуемую точность в заданном диапазоне сопротивлений антенны.

Список литературы

1. Бабков В.Ю., Муравьев Ю.К. *Основы построения устройств согласования антенн*. ВАС; 1980.
2. Лапицкий Е.Г., Семенов А.М., Сосновкин Л.Н. *Расчет диапазонных радиопередатчиков*. Ленинград; 1974.
3. Grebennikov A. *RF and microwave power amplifier design*. New York; 2004.
4. Жуков В.М., Шилов А.А. *Устройства автоматики в системах радиосвязи*. Тамбов; 2013.
5. Ковалевич Д.А. Антенные согласующие устройства для коротковолновых систем связи с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты. *8-я Международная научная конференция по военно-техническим проблемам, проблемам обороны и безопасности, использованию технологий двойного применения: сборник научных статей*. 2019;4:54-57.
6. Chan Wai Po F., De Foucauld E., Delavaud C., Ciais P. An vector automatic matching system designed for wireless medical telemetry. *Joint 6th International IEEE Northeast Workshop on Circuits and Systems and TAISA Conference*. 2008; 89-92.
7. Листопад Н.И., Ковалевич Д.А. Оптимизация параметров мобильных антенн ВЧ-диапазона. *Доклады БГУИР*. 2018;6(116):73-79.
8. Листопад Н.И., Ковалевич Д.А. Методика синтеза согласующих устройств для мобильных систем связи КВ-диапазона. *Новости науки и технологий*. 2020;4(55):17-25.

References

1. Babkov V.Yu., Muravyev Yu.K. [*Basics of constructing antenna matching devices*]. VAS; 1980. (In Russ.)
2. Lapitsky E.G., Semenov A.M., Sosnovkin L.N. [*Calculation of band radio transmitters*]. Leningrad; 1974. (In Russ.)
3. Grebennikov A. *RF and microwave power amplifier design*. New York; 2004.
4. Zhukov V.M., Shilov A.A. [*Automation devices in radio communication systems*]. Tambov, 2013. (In Russ.)
5. Kovalevich D.A. [Antenna matching devices for short-wave frequency hopping communication systems]. *8-ya mezhdunarodnaya nauchnaya konferenciya po voenno-tehnicheskim problemam, problemam oborony i bezopasnosti, ispolzovaniyu technologii dvoynogo primeneniya: sbornik nauchnih statei*. 2019;4:54-57. (In Russ.)
6. Chan Wai Po F., De Foucauld E., Delavaud C., Ciaï P. An vector automatic matching system designed for wireless medical telemetry. *Joint 6th International IEEE Northeast Workshop on Circuits and Systems and TAISA Conference*. 2008; 89-92.
7. Listopad N.I., Kovalevich D.A. [Optimization of the parameters of mobile antennas of HF range]. *Doklady BGUIR = Doklady BGUIR*. 2018;6(116):73-79 (in Russ.).
8. Listopad N.I., Kovalevich D.A. [Matching unit synthesis technique for HF mobile communication systems]. *Novosti nauki i technologii*. 2020;4(55):17-25 (in Russ.).

Сведения об авторах

Ковалевич Д.А., аспирант кафедры информационных радиотехнологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники;
тел.: +375-17-293-23-04;
Ковалевич Дмитрий Александрович

Information about the authors

Kovalevich D.A., Postgraduate student at the Information Radiotechnologies Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Address for correspondence

220103, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki str., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics;
tel.: +375-17-293-23-04;
Kovalevich Dmitry Aleksandrovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2021-19-3-40-48>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.373.826

ДВУЛУЧЕВАЯ ЛАЗЕРНАЯ ОЧИСТКА КВАРЦЕВОГО СЫРЬЯ

В.А. ЕМЕЛЬЯНОВ¹, Е.Б., ШЕРШНЕВ², С.И. СОКОЛОВ²

¹ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ» (г. Минск, Республика Беларусь)

²Гомельский государственный университет им. Франциска Скорины (г. Гомель, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 27 января 2021

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2021

Аннотация. В работе выполнено численное моделирование лазерной сепарации при воздействии лазерных пучков с длинами волн, равными 10,6 и 1,06 мкм, на кварцевое сырье, используемое в электронной промышленности при изготовлении фотошаблонов. Выполнено сравнение температурных полей, полученных при моделировании методом конечных элементов и с помощью аналитического решения. Распределение температуры до глубины 50 мкм практически совпадает при использовании обеих методик решения, при этом с увеличением глубины разница температур возрастает на 10 %, что позволяет использовать обе методики решения, так как на практике более важным является распределение температур в приповерхностных слоях, которое определяет формирование агломератов с примесными включениями. Выявлено, что эффективность сепарации кварцевого сырья зависит от скорости обработки и энергетических свойств лазерного излучения, что позволяет подобрать оптимальные параметры обработки, обеспечивающие эффективное образование агломератов, содержащих примесные включения. Проведены экспериментальные исследования двулучевой лазерной очистки кварцевого сырья, которые позволили определить оптимальные параметры обработки кварцевого сырья для эффективной очистки его от примесных включений, что обеспечивает возможность изготовления фотошаблонов с улучшенными эксплуатационными характеристиками, применяемых при производстве микросхем.

Ключевые слова: лазерное излучение, сепарация, примесь, агломерат.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Емельянов В.А., Шершнев Е.Б., Соколов С.И. Двулучевая лазерная очистка кварцевого сырья. Доклады БГУИР. 2021; 19(3): 40-48.

TWO-BEAM LASER PURIFICATION OF QUARTZ RAW MATERIAL

VICTOR A. EMELYANOV¹, EVGENY B. SHERSHNEV², SERGEY I. SOKOLOV²

¹JSC "INTEGRAL" – the managing company of the "Integral" holding (Minsk, Republic of Belarus)

²Francisk Skaryna Gomel State University, (Gomel, Republic of Belarus)

Submitted 27 January 2021

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2021

Abstract. The paper presents a numerical simulation of laser separation under the influence of laser beams with wavelengths of 10.6 microns and 1.06 microns on quartz raw material used in the electronics industry in the manufacture of photomasks. The temperature fields obtained by the finite element method and the analytical solution are compared. The temperature distribution to a depth of 50 microns is almost the same when using both methods of solution, while with increasing depth the temperature difference increases by 10 %, which allows using both methods of solution, since in practice the temperature distribution in the near-surface layers, which determines the formation of agglomerates with impurity inclusions, is more important. It is revealed that the efficiency of separation of quartz raw material depends on the processing speed and the energy properties of laser radiation, which allows to choose the optimal processing parameters that ensure the effective formation of agglomerates containing impurity inclusions. Experimental studies of bi-beam laser cleaning of quartz raw material were carried out, which allowed us to determine the optimal processing parameters of quartz raw material for effective cleaning of it from impurity inclusions, that make it possible to manufacture photomasks used in the production of microcircuits with improved performance characteristics.

Keywords: laser radiation, separation, impurity, agglomerate.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Emelyanov V.A., Shershnev E.B., Sokolov S.I. Two-beam laser purification of quartz raw material. Doklady BGUIR. 2021; 19(3): 40-48.

Введение

Фотошаблоны, используемые для производства микросхем, являются важной составляющей данного производства. При их изготовлении применяют такие материалы, как боросиликатное стекло, натриево-кальциево-силикатное стекло и кварцевое стекло. Кварцевое стекло характеризуется высокой твердостью и химической устойчивостью, устойчиво к воздействию воды, щелочных и кислых растворов. При уменьшении размеров транзисторов возникает необходимость применения лазерного излучения меньшей длины волны, что определяет целесообразность использования кварцевого стекла для изготовления фотошаблонов [1]. При этом чистота кварцевого сырья, используемого при изготовлении фотошаблонов, оказывает существенное влияние на эксплуатационные характеристики микросхем [2].

Основными примесями, присутствующими в кварцевом сырье, являются различные полевые шпаты, слюда и сфен. На данный момент самыми распространенными методами очистки кварцевого сырья от примесей являются электрические, магнитные и химические методы. Однако эти методы не позволяют очистить кварцевое сырье от неизвлекаемых примесей, которые не доступны для химических реактивов и не чувствительны к магнитному и электрическому полям [3]. Поэтому актуальной задачей является исследование метода лазерной очистки кварцевого сырья, основанного на том, что примеси, не извлекаемые другими методами, можно очистить за счет воздействия на них лазерного излучения, которое не поглощается чистыми частицами кварцевого сырья [4, 5].

Теоретический анализ

Кварц практически не поглощает лазерное излучение с длиной волны 1,06 мкм, однако энергия лазерного излучения при этом поглощается примесями, входящими в состав кварцевого сырья. Лазерное излучение с длиной волны 10,6 мкм поглощается кварцем в приповерхностном слое малой толщины. YAG-лазер можно использовать в качестве источника излучения с длиной волны 1,06 мкм, а CO₂-лазер в качестве источника излучения с длиной волны 10,6 мкм. При проведении экспериментальных исследований применялась схема лазерной сепарации кварцевого сырья, которая состоит из этапов, приведенных в [4]. Для осуществления эффективной лазерной сепарации необходимо определить температурные поля, которые формируются в частицах кварцевого сырья при воздействии на него лазерного излучения. Для расчета температурных полей использовались метод конечно-элементного анализа и аналитическое решение [6, 7]. На рис. 1–5 представлены графики температур для различных параметров обработки, полученные с использованием аналитического решения, приведенного в [6].

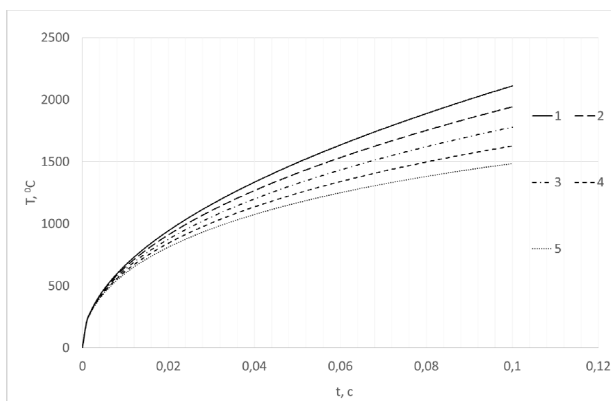


Рис. 1. Зависимость температуры в частице кварца от времени лазерной обработки на глубине: 1–0 мкм; 2–50 мкм; 3–100 мкм; 4–150 мкм; 5–200 мкм

Fig. 1. Dependence of the temperature in a quartz particle on the time of laser treatment at a depth of: 1–0 μm ; 2–50 μm ; 3–100 μm ; 4–150 μm ; 5–200 μm

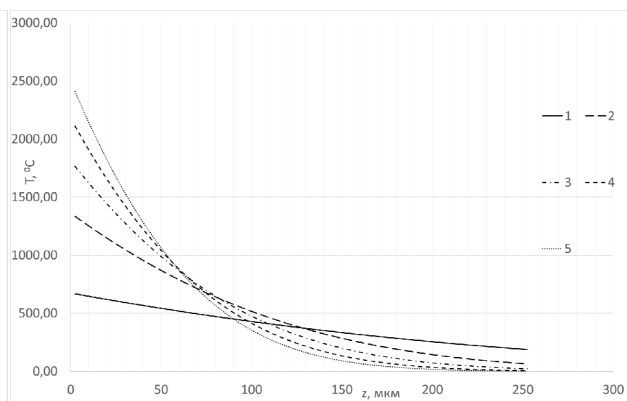


Рис. 2. Зависимость температуры от глубины в момент времени: 1–0,01 с; 2–0,04 с; 3–0,07 с; 4–0,1 с; 5–0,13 с

Fig. 2. Dependence of temperature on depth at the moment of time: 1– 0.01 s; 2–0.04 s; 3–0.07 s; 4–0.1 s; 5–0.13 s

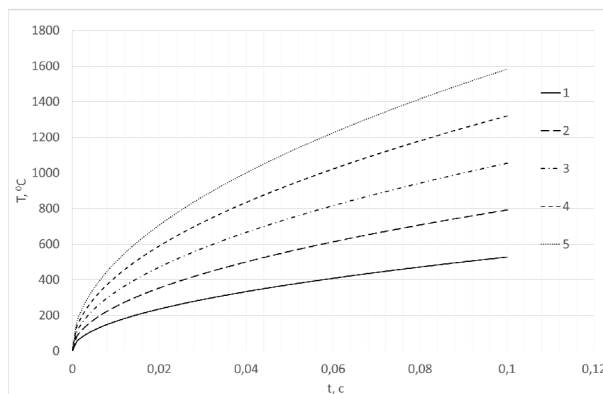


Рис. 3. Зависимость температуры на поверхности частицы кварца от времени при воздействии CO₂-лазера: 1–50 Вт; 2–100 Вт; 3–150 Вт; 4–200 Вт; 5–250 Вт

Fig. 3. Dependence of the temperature on the surface of a quartz particle on time when exposed to a CO₂ laser: 1–50 W; 2– 100 W; 3– 150 W; 4–200 W; 5– 250 W

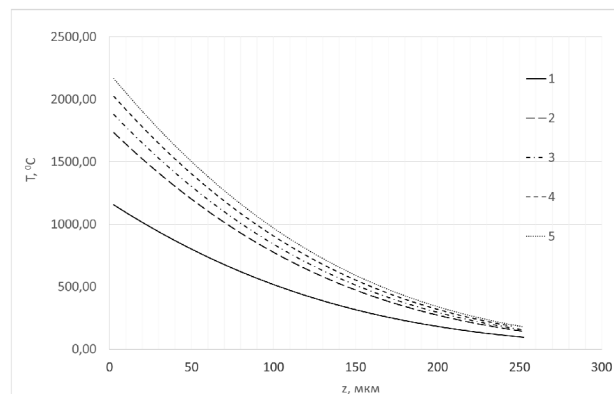


Рис. 4. Зависимость температуры по глубине частицы кварца от времени при: 1 – CO₂-лазер; 2 – CO₂-лазер + YAG-лазер 50 Вт; 3 – CO₂-лазер + YAG-лазер 100 Вт; 4 – CO₂-лазер + YAG-лазер 150 Вт; 5 – CO₂-лазер + YAG-лазер 200 Вт

Fig. 4. Dependence of the temperature over the depth of a quartz particle on time at: 1 – CO₂ laser; 2 – CO₂ laser + YAG laser 50 W; 3 – CO₂ laser + YAG laser 100 W; 4 – CO₂ laser + YAG laser 150 W; 5 – CO₂ laser + YAG laser 200 W

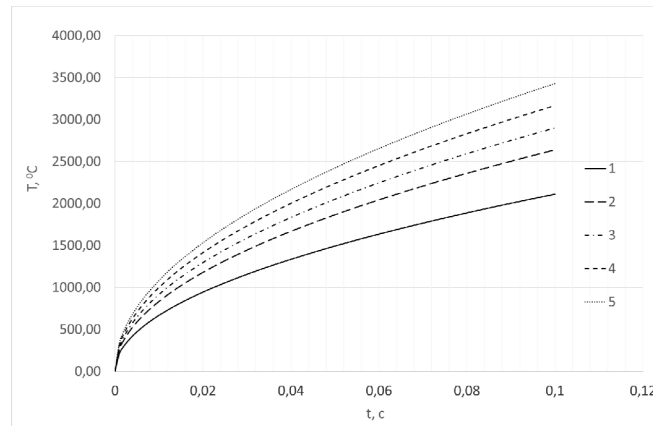


Рис. 5. Зависимость температуры частицы с примесью от времени при воздействии CO₂-лазера и YAG-лазера мощностью : 1–0 Вт; 2–50 Вт; 3–100 Вт; 4–150 Вт; 5–200 Вт

Fig. 5. Dependence of the temperature of a particle with an impurity on time when exposed to a CO₂ laser and a YAG laser with a power of: 1–0 W; 2–50 W; 3–100 W; 4–150 W; 5–200 W

Из рис. 1–5 видно, что длительность прогрева частиц кварца зависит от плотности мощности лазерного излучения. При этом достижение температуры плавления происходит в разные моменты времени для различных плотностей мощности лазерного излучения, что позволяет подобрать оптимальные параметры обработки, обеспечивающие эффективное образования агломератов. Для верификации полученных результатов была использована конечно-элементная модель нагрева частицы кварца с включением из примеси [6]. Расчетное распределение температур приведено на рис. 6. Было выполнено сравнение температурных полей, полученных двумя способами (рис. 7).

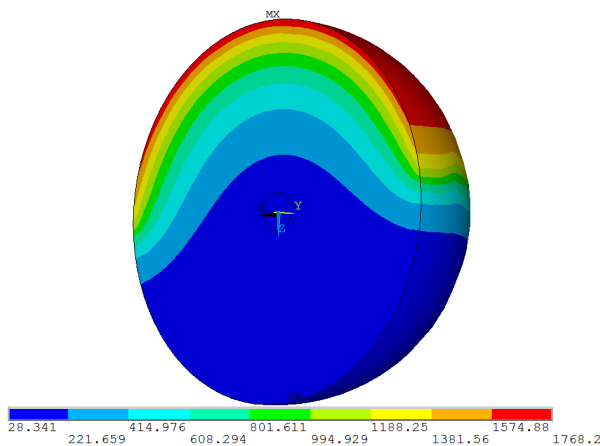


Рис. 6. Распределение температурных полей в частице кварцевого сырья

Fig. 6. Distribution of temperature fields in a particle of quartz raw material

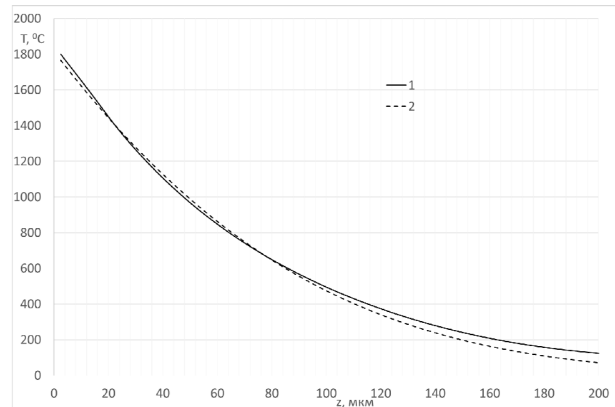


Рис. 7. Распределение температуры в частице кварцевого сырья при обработке лазерным излучением CO₂-лазера с плотностью мощности 100 Вт/мм²: 1 – решение методом конечно-элементного анализа; 2 – аналитическое решение

Fig. 7. Temperature distribution in a particle of quartz raw material during processing by laser radiation of a CO₂ laser with a power density of 100 W/mm²: 1 – solution by the method of finite element analysis; 2 – analytical solution

Как видно из рис. 7, распределение температуры до глубины 50 мкм практически совпадает при использовании обеих методик решения, при этом с увеличением глубины разница температур возрастает на 10 %. Однако на практике более важным является распределение температур в приповерхностных слоях, которое определяет формирование агломератов.

Следует отметить, что использование аналитического решения позволяет рассчитать распределение температур с меньшими временными затратами по сравнению с конечно-элементным моделированием, что дает возможность использовать это решение для экспресс-оценки параметров обработки.

Экспериментальные исследования

Для проведения эксперимента по сепарации кварцевого сырья разработана установка (рис. 8), схема которой приведена на рис. 9.

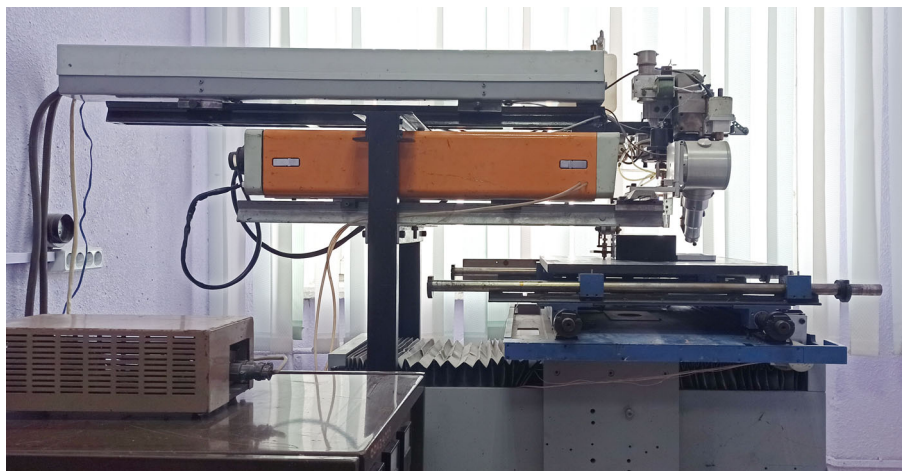


Рис. 8. Установка для лазерной сепарации кварцевого сырья
Fig. 8. Installation for laser separation of quartz raw material

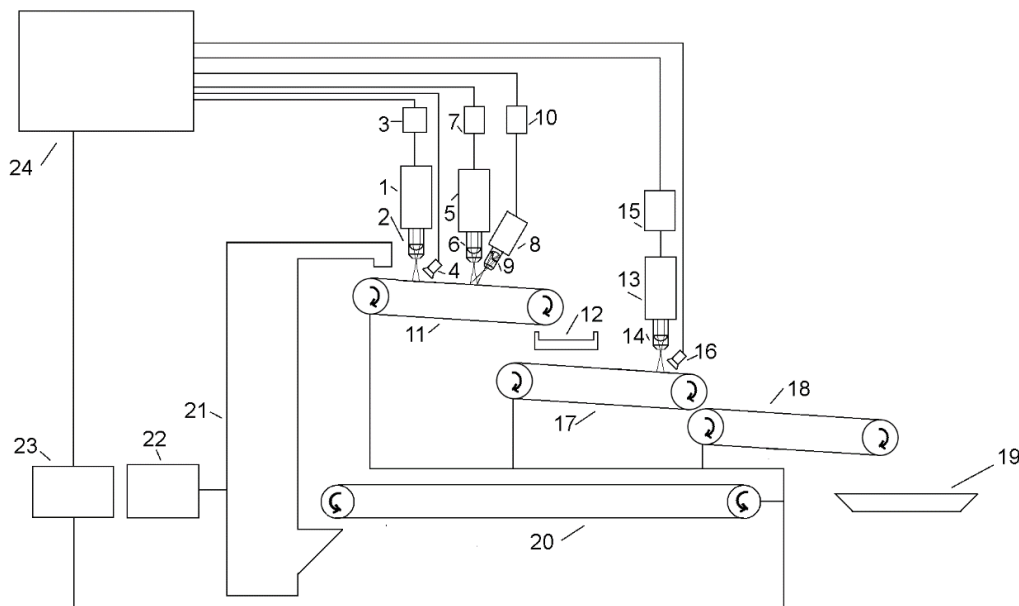


Рис. 9. Схема сепарации кварцевого сырья:

1 – низкоинтенсивный YAG-лазер; 2 – фокусирующий объектив; 3 – блок управления лазером 1; 4 – устройство измерения температурного поля; 5 – YAG-лазер; 6 – фокусирующий объектив; 7 – блок управления лазером 5; 8 – CO₂-лазер; 9 – фокусирующий объектив; 10 – блок управления CO₂-лазером 8; 11 – конвейерная лента, на которой находится кварцевое сырье при обработке ее лазерами 1 и 5, а также источником полихроматического излучения 8; 12 – сито; 13 – YAG-лазер; 14 – фокусирующий объектив; 15 – блок управления лазером 13; 16 – устройство измерения температурного поля; 17 – конвейерная лента; 18 – конвейерная лента; 19 – емкость для очищенного кварцевого сырья; 20 – конвейерная лента; 21 – устройство перемещения; 22 – блок управления устройством 21; 23 – блок управления конвейерными лентами 11, 17 и 18; 24 – компьютер

Fig. 9. Scheme of separation of quartz raw material:

1 – low-intensity YAG laser; 2 – focusing lens; 3 – laser control unit 1; 4 – device for measuring the temperature field; 5 – YAG laser; 6 – focusing lens; 7 – laser control unit 5; 8 – CO₂ laser; 9 – focusing lens; 10 – CO₂ laser control unit 8; 11 – conveyor belt, which contains quartz raw material when processed by lasers 1 and 5, as well as a source of polychromatic radiation 8; 12 – sieve; 13 – YAG laser; 14 – focusing lens; 15 – laser control unit 13; 16 – device for measuring the temperature field; 17 – conveyor belt; 18 – conveyor belt; 19 – container for purified quartz raw material; 20 – conveyor belt; 21 – moving device; 22 – device control unit 21; 23 – control unit for conveyor belts 11, 17 and 18; 24 – computer

При проведении исследований кварцевое сырье располагалось на конвейерной ленте. Далее осуществлялся нагрев сырья низкоинтенсивным YAG-лазером, при этом лазерное излучение было сфокусировано в виде полосы по ширине конвейерной ленты. Сырье перемещалось к устройству измерения температурного поля с последующим анализом полученных данных и определением количества и размера примесных включений в нем. Затем сырье перемещалось по конвейерной ленте в зону воздействия CO₂-лазера и YAG-лазера. При этом определялась плотность мощности лазерного излучения, необходимая для плавления примесных включений. В результате нагрева частицы кварцевого сырья, содержащие примесные включения, расплавились и вокруг них образовывались агломераты (рис. 10).



Рис. 10. Частица примеси в сырье: *a* – до обработки; *b* – после обработки

Fig. 10. A particle of impurity in the raw material: *a* – before processing; *b* – after processing

Далее конвейерная лента перемещала кварцевое сырье для его сепарации. Очищенное от агломератов сырье повторно перемещали по конвейерной ленте в зону нагрева низкоинтенсивным YAG-лазером. Цикл обработки повторяли до тех пор, пока сырье не достигало необходимого уровня очистки.

В работе проведены экспериментальные исследования, определяющие параметры, необходимые для эффективной сепарации кварцевого концентрата RQ-3K, произведенного ООО «Русский кварц» и используемого на ОАО «КОРАЛЛ» [<http://russianquartz.com/produksiya/>].

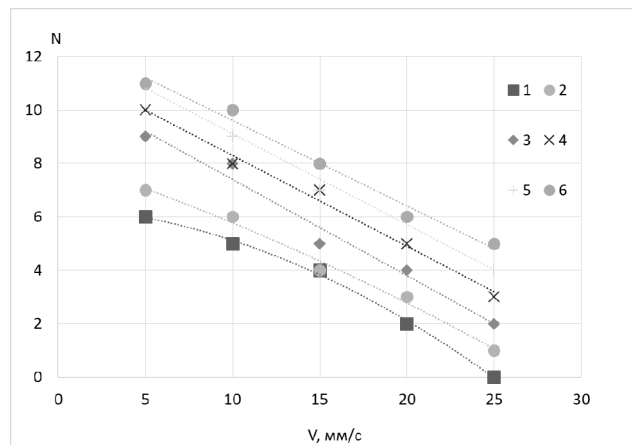


Рис. 11. Зависимость количества агломератов на 10 г сырья от скорости перемещения конвейерной ленты при мощности CO₂-лазера 50 Вт и мощности YAG-лазера: 1 – 50 Вт; 2 – 60 Вт; 3 – 70 Вт; 4 – 80 Вт; 5 – 90 Вт; 6 – 100 Вт

Fig. 11. Dependence of the number of agglomerates per 10 g of raw material on the speed of the conveyor belt at a CO₂ laser power of 50 W and a YAG laser power: 1 – 50 W; 2 – 60 W; 3 – 70 W; 4 – 80 W; 5 – 90 W; 6 – 100 W

Как видно из рис. 11, при увеличении скорости перемещения конвейерной ленты количество образовавшихся агломератов снижается и при скорости 25 мм/с практически достигает нуля, что свидетельствует о том, что при данной скорости обработки сырье не успевает прогреваться до необходимой температуры. При этом увеличение мощности YAG-лазера обеспечивает увеличение количества агломератов.

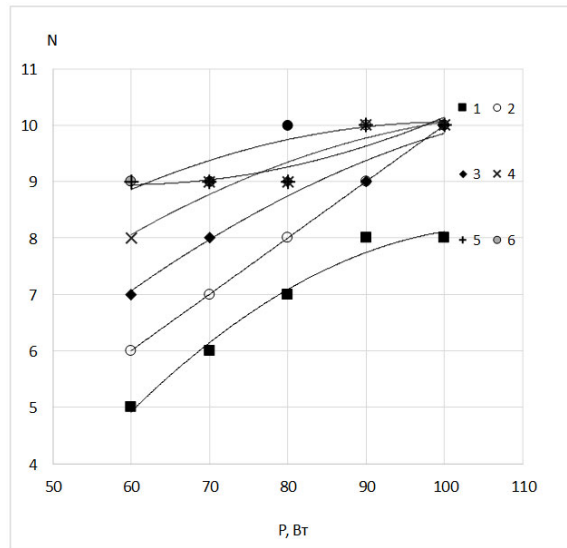


Рис. 12. Зависимость количества агломератов на 10 г сырья при скорости перемещения конвейерной ленты 5 мм/с и мощности YAG-лазера 50 Вт от мощности CO₂-лазера: 1 – 50 Вт; 2 – 60 Вт; 3 – 70 Вт; 4 – 80 Вт; 5 – 90 Вт; 6 – 100 Вт

Fig. 12. Dependence of the number of agglomerates per 10 g of raw material at a conveyor belt speed of 5 mm/s and a YAG laser power of 50 W on the CO₂ laser power: 1 – 50 W; 2 – 60 W; 3 – 70 W; 4 – 80 W; 5 – 90 W; 6 – 100 W

Как видно из рис. 12, при увеличении мощности CO₂-лазера количество агломератов растет до 10 штук. При этом дальнейшее увеличение мощности не приводит к увеличению производительности, а при больших значениях мощности CO₂-лазера приводит к переплавлению сырья и излишним потерям материала, что согласуется с приведенными ранее расчетами.

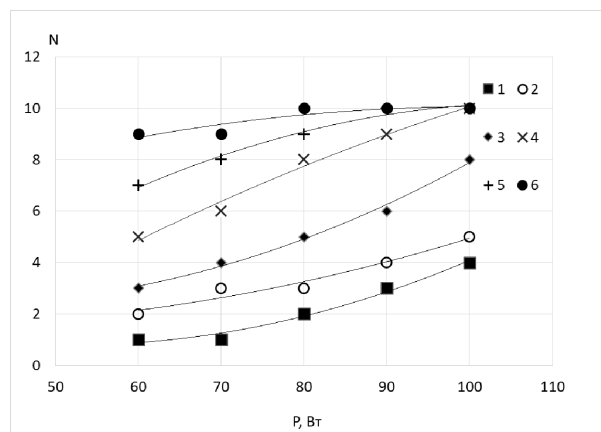


Рис. 13. Зависимость количества агломератов на 10 г сырья при мощности CO₂-лазера 50 Вт и скорости перемещения конвейерной ленты 5 мм/с от мощности YAG-лазера: 1 – 50 Вт; 2 – 60 Вт; 3 – 70 Вт; 4 – 80 Вт; 5 – 90 Вт; 6 – 100 Вт

Fig. 13. Dependence of the number of agglomerates per 10 g of raw material at a CO₂ laser power of 50 W and a conveyor belt speed of 5 mm/s on the YAG laser power: 1 – 50 W; 2 – 60 W; 3 – 70 W; 4 – 80 W; 5 – 90 W; 6 – 100 W

Анализ рис. 13 показывает, что увеличение мощности YAG-лазера целесообразно до количества агломератов, равного 10, так как ее дальнейшее увеличение не приводит к росту количества агломератов.

Заключение

Разработана математическая модель процесса нагрева кварцевого сырья для определения температурных полей при лазерной сепарации. Выполнено сравнение температурных полей, полученных при моделировании методом конечных элементов и с помощью аналитического решения. Распределение температуры до глубины 50 мкм практически совпадает при использовании обеих методик расчета, при этом с увеличением глубины разница температур возрастает на 10 %. Экспериментальные исследования выявили влияние мощности лазерного излучения и скорости обработки на эффективность очистки сырья от примесей. Для эффективной очистки кварцевого сырья от примесей мощности СО₂-лазера и YAG-лазера следует выбирать с условием достижения в зоне обработки плотности мощности порядка 80–100·10⁶ Вт/м² в зависимости от скорости перемещения сырья в пределах 5–10·10⁻³ м/с. Фотошаблоны, полученные из сырья, очищенного с помощью лазерной обработки, уменьшают количество брака на 10–15 % за счет исключения примесных частиц в исходном сырье.

Список литературы

1. Бокарев В., Горнев Е. Контактная литография в нанотехнологии. *Наноиндустрия*. 2010;5:22-25.
2. Аваков С., Овчинников В., Карпович С., Титко Е., Трапашко Г. Оптико-механические комплексы для бездефектного изготовления фотошаблонов 0,35 мкм и 90 нм. *Фотоника*. 2007;6:35-39.
3. Иванов Г.А., Первадчук В.П. *Технология производства и свойства кварцевых оптических волокон: учебное пособие*. Пермь: Изд-во Пермского нац. исслед. политехнического университета; 2011.
4. Шершнева Е.Б., Никитюк Ю.В., Соколов С.И., Баевич Г.А. Моделирование двулучевой лазерной сепарации кварцевого сырья. *Известия ГГУ им. Ф.Скорины*. 2013;6:216-220.
5. Шершнева Е.Б., Свиридова В.В., Астахов П.В., Соколов С.И. Использование метода конечных элементов для оптимизации режимов лазерной сепарации кварцевого сырья. *Международный научно-практический журнал. Чрезвычайные ситуации: образование и наука*. 2012;7(2):8-13.
6. Григорьянц А.Г., Соколов А.А. *Лазерная техника и технология: в 7 кн. Кн. 4. Лазерная обработка неметаллических материалов: учебное пособие для вузов*. Москва: Высшая школа; 1988.
7. Шабров Н.Н. *Метод конечных элементов в расчетах деталей тепловых двигателей*. Ленинград: Машиностроение; 1983.

References

1. Bokarev V., Gornev E. [Contact lithography in nanotechnology]. *Nanoindustry*. 2010;5:22-25. (In Russ.)
2. Avakov S., Ovchinnikov V., Karpovich S., Titko E., Trapashko G. [Optical and mechanical complexes for defect-free production of photomasks 0.35 microns and 90 nm]. *Photonics*. 2007;6:35-39. (In Russ.)
3. Ivanov G.A., Pervadchuk V.P. [*Production technology and properties of quartz optical fibers: textbook. Allowance*]. Perm: Publishing house of Perm. nat. issled. Polytechnic University; 2011. (In Russ.)
4. Shershnev E.B., Nikityuk Yu.V., Sokolov S.I., Baevich G.A. [Simulation of double-beam laser separation of quartz raw materials]. *Izvestia GSU im. F. Skorina*. 2013;6:216-220. (In Russ.)
5. Shershnev E.B., Sviridova V.V., Astakhov P.V., Sokolov S.I. [Using the finite element method to optimize the modes of laser separation of quartz raw materials]. *International scientific and practical journal. Emergencies: Education and Science*. 2012;7(2):8-13. (In Russ.)
6. Grigoryants A.G., Sokolov A.A. [*Laser technology and technology: in 7 books. Book. 4. Laser processing of non-metallic materials: Textbook, manual for universities*]. Moscow:Vysshaya shkola; 1988. (In Russ.)
7. Shabrov N.N. [*Finite element method in calculations of heat engine parts*]. Leningrad: Mashinosnoenie; 1983. (In Russ.)

Вклад авторов

Емельянов В.А. разработал методику эксперимента и провел анализ данных экспериментальных исследований.

Шершневу Е.Б. и Соколову С.И. осуществили подготовку и проведение экспериментов, выполнили анализ полученных результатов, оформили рукопись статьи.

Authors' contribution

Emelyanov V.A. developed an experimental technique and analyzed the data of experimental studies.

Shershnev E.B. and Sokolov S.I. carried out the preparation and conduct of experiments, performed an analysis of the results obtained and prepared the manuscript of the article.

Сведения об авторах

Емельянов В.А., д.т.н., профессор, член-корр. Национальной академии наук Беларуси, член Международного института инженеров по электротехнике и электронике, заслуженный изобретатель Республики Беларусь.

Шершневу Е.Б. к.т.н., доцент, заведующий кафедрой общей физики Гомельского государственного университета им. Франциска Скорины.

Соколов С.И., старший преподаватель кафедры общей физики Гомельского государственного университета им. Франциска Скорины.

Information about the authors

Emelyanov V.A., D.Sc., Professor, Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, Member of the International Institute of Electrical and Electronic Engineers, Honored Inventor of the Republic of Belarus.

Shershnev E.B., PhD, Associate Professor, Head of the Department of General Physics of Francisk Skorina Gomel State University.

Sokolov S.I., Senior Lecturer at the Department of General Physics of Francisk Skorina Gomel State University.

Адрес для корреспонденции

246019, Республика Беларусь,
г. Гомель, ул. Советская, 104,
Гомельский государственный
университет им. Франциска Скорины;
тел. 8-0232-50-38-17;
e-mail: sokolov@gsu.by
Соколов Сергей Иванович

Address for correspondence

246019, Republic of Belarus,
Gomel, Sovietskaya str., 104,
Francisk Skorina Gomel State University;
tel. 8-0232-50-38-17;
e-mail: sokolov@gsu.by
Sokolov Sergey Ivanovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2021-19-3-49-57>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 681.5.015

МЕТОДИКА ОПТИМИЗАЦИИ ПОЛОЖЕНИЯ РОБОТА-МАНИПУЛЯТОРА В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ПРОЦЕССЕ ЛАЗЕРНОЙ РЕЗКИ

М.М. КОЖЕВНИКОВ¹, О.А. ЧУМАКОВ², И.Э. ИЛЮШИН¹, А.А. ЮРКИНА¹

¹Могилевский государственный университет продовольствия
(г. Могилев, Республика Беларусь)

²Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 29 января 2021

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2021

Аннотация. Перспективным направлением модернизации производственных технологических процессов, использующих лазерную резку металлических заготовок, является создание роботизированных линий, выполняющих операции резки с высокой производительностью и точностью. Современные роботы-манипуляторы с вращательными осями позволяют достаточно эффективно ориентировать инструмент при выполнении операций лазерной резки, однако их широкое внедрение сдерживается низкой эффективностью известных подходов к компоновке роботизированных линий. Такие подходы основаны на применении типовых конструктивных решений с дальнейшим поиском движений звеньев робота методом проб и ошибок и зачастую не позволяют обеспечить необходимое качество траектории режущего инструмента. В данной работе предложена новая методика оптимизации положения робота-манипулятора относительно контура резки, учитывающая, по сравнению с известными подходами, ограничения на возможности движений режущего инструмента, а также кинематические и геометрические ограничения на движения самого робота. Предложенная методика основана на кинематической модели робота-манипулятора и режущего инструмента и позволяет найти координаты положения базы робота-манипулятора, при которых он сможет перемещать режущий инструмент вдоль контура резки с минимальным объемом движений в сочленениях. Поиск оптимальных координат положения базы робота-манипулятора производится в два этапа. На первом этапе область допустимых значений координат базы дискретизируется с некоторым шагом, и для каждого дискретного значения ищется траектория, на которой минимизируется объем движений в сочленениях робота. При этом учитываются технологические ограничения на ориентацию режущего инструмента относительно контура резки, а также кинематические и геометрические ограничения на движения робота-манипулятора. На втором этапе выбирается такая позиция базы, которой соответствует наименьший объем движения при перемещении технологического инструмента вдоль контура резки. Эффективность использования предложенной методики продемонстрирована на модельных примерах. Методика может быть применена при проектировании новых компоновок роботизированных комплексов лазерной резки металлических заготовок для предприятий машиностроения.

Ключевые слова: робот-манипулятор, лазерная резка, оптимизация положения, технологические ограничения.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Кожевников М.М., Чумаков О.А., Илюшин И.Э., Юркина А.А. Методика оптимизации положения робота-манипулятора в технологическом процессе лазерной резки. Доклады БГУИР. 2021; 19(3): 49-57.

METHOD OF OPTIMIZATION OF THE ROBOT-MANIPULATOR POSITION IN THE TECHNOLOGICAL PROCESS OF LASER CUTTING

MIKHAIL M. KAZHEUNIKAU¹, OLEG A. CHUMAKOU², IGOR E. ILIUSHIN¹,
ANNA A. JURKINA¹

¹*Mogilev State University of Food Technologies (Mogilev, Republic of Belarus)*

²*Belorussian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)*

Submitted 29 January 2021

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2021

Abstract. A promising direction for the production processes modernization which uses laser cutting of metal blanks is the creation of the robotic lines that perform cutting operations with high productivity and accuracy. Modern robotic manipulators with rotational axes allow to orientate the tool quite effectively when performing laser cutting operations, however, their widespread adoption is constrained by the low efficiency of the known approaches to the layout of robotic lines. Such approaches are based on the use of standard design solutions with a further search for the robot links movements by trial and error, and often do not allow to ensure the required quality of the cutting tool path. In this paper, we propose a new technique for optimizing the robot-manipulator position relative to the cutting contour, which takes into account, compared with known approaches, constraints on the possibilities of the cutting tool movements, as well as kinematic and geometric constraints on the movements of the robot itself. The proposed technique is based on a kinematic model of a robot manipulator and a cutting tool and allows finding the coordinates of the robot manipulator base position, at which it can move the cutting tool along the cutting contour with a minimum range of movements in the joints. The search of the optimal coordinates of the robotic manipulator base position is carried out in two stages. At the first stage, the area of admissible values of the coordinates of the base is discretized with a certain step and for each discrete value it is a trajectory sought on which the range of movements in the joints of the robot is minimized. This allows to take into account technological constraints on the orientation of the cutting tool relative to the cutting contour, as well as kinematic and geometric restrictions on the movements of the robot manipulator. At the second stage a position of the base is selected which corresponds to the minimal volume of movement when the technological tool is moving along the cutting contour. The effectiveness of the proposed method is demonstrated on model examples. The technique can be used in the design of new layouts of robotic systems for laser cutting of metal blanks for mechanical engineering enterprises.

Keywords: robot-manipulator, laser cutting, position optimization, technological constraints.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Kazheunikau M.M., Chumakou O.A., Iliushin I.E., Jurkina A.A. Method of optimization of the robot-manipulator position in the technological process of laser cutting. Doklady BGUIR. 2021; 19(3): 49-57.

Введение

Дальнейшее повышение эффективности и гибкости производственных процессов лазерной резки может быть достигнуто на основе использования роботизированных линий. Такие линии экономически обоснованы в условиях мелкосерийного и среднесерийного производства при наличии ряда модификаций производимых изделий [1, 2]. Применение роботов-манипуляторов позволяет достаточно быстро и эффективно перенастроить линию на изменившиеся параметры линии реза и заготовки, путем перепрограммирования системы управления. Например, в кузовном производстве роботизированная лазерная резка показала эффективность на операциях обрезки кромок и реза проемов в металлических заготовках [3].

Современные промышленные роботы-манипуляторы с шестью и более степенями свободы позволяют эффективно ориентировать режущий инструмент относительно линий реза сложной геометрии, однако возникает ряд трудностей, связанных с поиском рационального расположения робота относительно таких линий реза и заготовок. При этом ряд ограничений

накладывается на траектории движения звеньев робота и режущего инструмента. В ряде известных работ [2, 4, 5] предложены критерии компоновки роботизированной линии, позволяющие учесть такие факторы, как кинематические ограничения, быстродействие, столкновения робота с препятствиями, находящимися в его в рабочей зоне. Однако эти подходы к компоновке роботизированных линий основаны на применении типовых конструктивных решений, которые предполагают доступность всех точек на линии реза. При этом проверяется достижимость линии реза инструментом при разных положениях базы и конфигурациях манипулятора. Поиск движений звеньев робота выполняется методом проб и ошибок до достижения приемлемой ориентации режущего инструмента, что зачастую не обеспечивает высокое качество траектории.

В данной работе предложена методика поиска оптимального положения робота-манипулятора относительно контура резки, учитывающая, по сравнению с известными подходами, ограничения на возможности движений режущего инструмента, а также кинематические и геометрические ограничения на движения самого робота.

Методика проведения исследования

Технология лазерной резки предполагает обход некоторого контура технологическим инструментом. Такой контур может быть с достаточной для практики точностью представлен в виде множества векторов $\{p_i \in R^3\}$, $i=1 \dots N$, определяющих координаты последовательности точек, через которые должна пройти рабочая точка режущего инструмента (рис. 1). Обычно в качестве инструмента используется твердотельный лазер, при этом луч лазера должен быть сориентирован строго перпендикулярно к поверхности металлической заготовки. Обозначим единичный вектор нормали к поверхности заготовки в i -й точке контура резки как $n_i \in R^3$, а направление перемещения рабочей точки режущего инструмента – единичным вектором, касательным к линии контура, $a_i = (p_{i+1} - p_i) / |p_{i+1} - p_i|$. Тогда положение и ориентация режущего инструмента, находящегося в i -й точке контура резки, могут быть заданы следующей матрицей однородного преобразования:

$$H_i = \begin{bmatrix} a_i & a_i \times n_i & n_i & p_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}_{4 \times 4}, \text{ где «} \times \text{» – символ, обозначающий векторное произведение.}$$

При обходе контура допускается вращать твердотельный лазер на угол $\gamma \in (-\pi, \pi]$ вокруг вектора нормали $n_i = [n_{xi}, n_{yi}, n_{zi}]^T$ к поверхности заготовки. При этом ограничимся дискретными значениями угла $\gamma_j = \Delta\gamma j$, где $\Delta\gamma$ – шаг дискретизации, $j=0 \dots M$. Тогда однородная матрица положения и ориентации режущего инструмента, повернутого на угол γ_j вокруг вектора нормали n_i , будет иметь вид

$$L_{i,j} = R_{i,j} H_i, \tag{1}$$

где $R_{i,j}$ – однородная матрица вращения на угол γ_j вокруг вектора нормали n_i , равная

$$R_{i,j} = \begin{bmatrix} n_{xi}^2 V_{\gamma_j} + C_{\gamma_j} & n_{xi} n_{yi} V_{\gamma_j} - n_{zi} S_{\gamma_j} & n_{xi} n_{zi} V_{\gamma_j} + n_{yi} S_{\gamma_j} & 0 \\ n_{xi} n_{yi} V_{\gamma_j} + n_{zi} S_{\gamma_j} & n_{yi}^2 V_{\gamma_j} + C_{\gamma_j} & n_{yi} n_{zi} V_{\gamma_j} - n_{xi} S_{\gamma_j} & 0 \\ n_{xi} n_{zi} V_{\gamma_j} - n_{yi} S_{\gamma_j} & n_{yi} n_{zi} V_{\gamma_j} + n_{xi} S_{\gamma_j} & n_{zi}^2 V_{\gamma_j} + C_{\gamma_j} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \tag{2}$$

где $C_{\gamma_j} = \cos(\gamma_j)$; $S_{\gamma_j} = \sin(\gamma_j)$; $V_{\gamma_j} = 1 - \cos(\gamma_j)$.

Зададим ориентацию фланца робота-манипулятора тройкой единичных векторов $a_f, a_f \times n_f, n_f$. Тогда геометрические параметры режущего инструмента, закрепленного на фланце, можно определить следующим образом: T – смещение рабочей точки режущего инструмента относительно точки крепления к фланцу; L – смещение рабочей точки режущего инструмента вдоль вектора n_i ; φ – угол поворота фланца режущего инструмента вокруг

вектора a_f . С учетом этих параметров определим однородную матрицу преобразования, связывающую систему координат фланца с системой координат рабочей точки режущего инструмента:

$${}^F T_t = \begin{bmatrix} -\cos(\varphi) & -\sin(\varphi) & 0 & -L \cdot \cos(\varphi) \\ \sin(\varphi) & -\cos(\varphi) & 0 & L \cdot \sin(\varphi) \\ 0 & 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

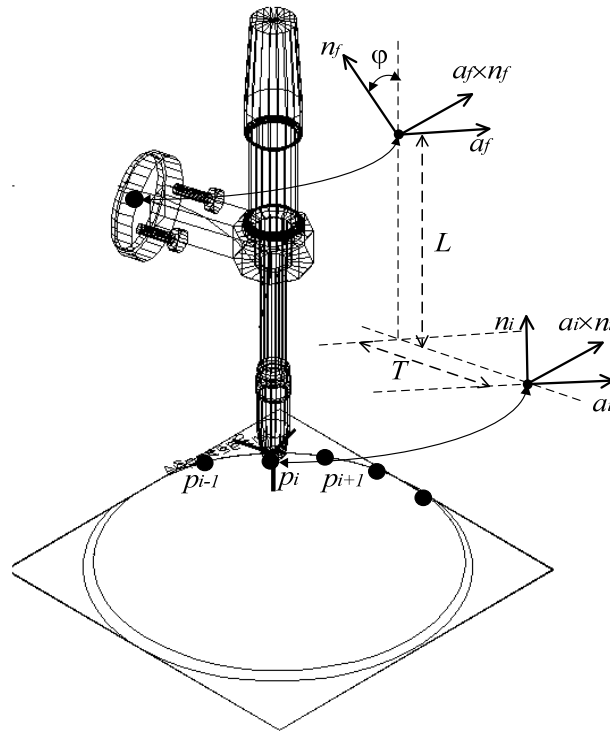


Рис. 1. Системы координат и параметры режущего инструмента
Fig. 1. Coordinate systems and cutting tool parameters

Положение и ориентация системы координат, связанной с базой робота-манипулятора относительно мировой системы координат (x_w, y_w, z_w) (рис. 2), заданы однородной матрицей преобразования

$${}^0 T_b^k = R(\delta_k) T(x_k), \quad (3)$$

где $R(\delta_k)$ – матрица, определяющая ориентацию базы робота относительно мировой системы координат (x_w, y_w, z_w) ; k – номер положения базы робота на дискретной сетке ($k=1, \dots, K$); $\delta_k = [\delta_{1k}, \delta_{2k}, \delta_{3k}]^T$ – вектор углов поворота базы робота относительно мировой системы координат; T – матрица, характеризующая сдвиг базы робота относительно мировой системы координат; $x_k = [x_k, y_k, z_k]^T$ – вектор сдвига базы робота относительно мировой системы координат.

С учетом (1) и (3) манипуляционную задачу по перемещению режущего инструмента роботом-манипулятором, размещенным в положении с номером k , можно представить в виде следующего матричного уравнения:

$$L_{i,j}^k = {}^0 T_b^k \cdot {}^b T_r(q_{i,j}^k) \cdot {}^F T_t, \quad (4)$$

где $T_r(q_{i,j}^k)$ – матрица преобразования, определяемая геометрическими характеристиками звеньев робота-манипулятора в зависимости от вектора углов поворота сочленений $q_{i,j}^k \in \mathbf{R}^d$, d – число степеней свободы робота-манипулятора.

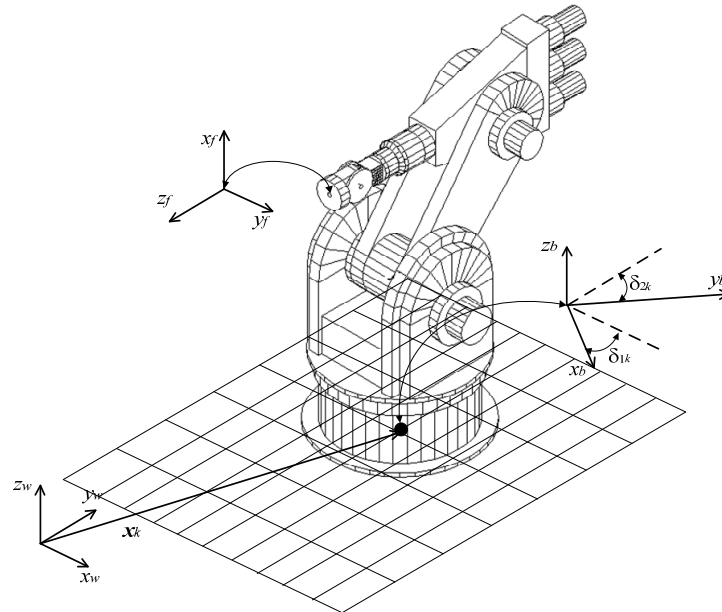


Рис. 2. Системы координат и параметры робота-манипулятора
Fig. 2. Coordinate systems and parameters of robot-manipulator

Величины углов в сочленениях манипулятора $q_{i,j}^k$ для каждого значения угла ориентации режущего инструмента γ_j и вектора сдвига базы манипулятора x_i могут быть получены путем применения известных алгоритмов решения обратной задачи кинематики [6, 7] к матричному уравнению (4). При этом для каждого из d индикаторов конфигурации μ робота-манипулятора, размещенного в позиции x_k , может быть найдено $M \cdot K$ векторов $q_{i,j}^k$, определяющих траектории изменения углов в его сочленениях при перемещении инструмента вдоль контура резки. На координаты каждого из векторов $q_{i,j}^k$ накладываются кинематические ограничения и ограничения на близость к препятствиям. В общем виде такие ограничения могут быть заданы следующим образом:

$$\Psi_{kin}(q_{i,j}^k, \mu) = 0, \quad \Psi_{col}(q_{i,j}^k, \mu) = 0, \quad (5)$$

где Ψ_{kin} , Ψ_{col} – бинарные функции, неравные нулю при нарушении кинематических ограничений и ограничений на близость к препятствиям соответственно. Более конкретный вид ограничений (5) будет определяться конструктивными особенностями манипулятора и формой препятствий.

Качество каждой траектории робота-манипулятора, размещенного в позиции x_k , можно оценить по объему движений в каждом из $n = 1, \dots, d$ углов в сочленениях робота-манипулятора:

$$J_n = \sum_{i=1}^N |q_{n,i,j}^k - q_{n,i-1,l}^k|. \quad (6)$$

Тогда траектория движения робота вдоль контура резки с минимальным объемом движений может быть найдена путем минимизации следующего критерия:

$$\min_{\gamma_j} \sum_{n=1}^d w_n J_n. \quad (7)$$

С учетом (7) задача поиска оптимального положения базы манипулятора относительно контура резки может быть записана в виде

$$F_{opt} = \min_{\gamma_j} \sum_{n=1}^d w_n J_n \rightarrow \min_{x_k}, \quad (8)$$

где w_n – весовые коэффициенты.

Учитывая содержательный смысл задачи (в процессе движения режущего инструмента положение базы манипулятора x_k должно быть неизменным), оптимизация проводится по следующей методике в два этапа. На первом этапе область значений $x_k \in [x_{\min} x_{\max}]$ дискретизируется с некоторым шагом Δx , и для каждого дискретного значения ищется траектория, на которой минимизируется критерий качества (7), при ограничениях (4), (5) для фиксированного значения индикатора конфигурации μ . Далее выбирается такая позиция базы манипулятора x_k , которой соответствует наименьшее значение критерия качества (8). Минимизация критерия качества (7) может быть эффективно выполнена, например, с использованием аппроксимации пространства поиска методом направленного графа, предложенного в авторских работах [8–10].

Результаты и их обсуждение

Для демонстрации эффективности предложенной методики рассмотрим два исследованных модельных примера. В качестве первого примера рассмотрен плоский трехзвенный манипулятор с тремя вращательными сочленениями (рис. 3). Моделирование выполнено с использованием программного пакета Matlab. Манипулятор состоит из трех звеньев длиной $l_1=1,0$ м, $l_2=1,0$ м и $l_3=0,25$ м. Контур резки задан форме квадрата со стороной $d=0,8$ м, углы которого скруглены с радиусом $r=0,1$ м. Центр контура размещен в точке $(1,0$ м, $1,0$ м), причем контур окружен препятствием, размещенным от него на расстоянии $\Delta d=0,05$ м. Дискретизация контура выполнена равномерно посредством 60 узлов.

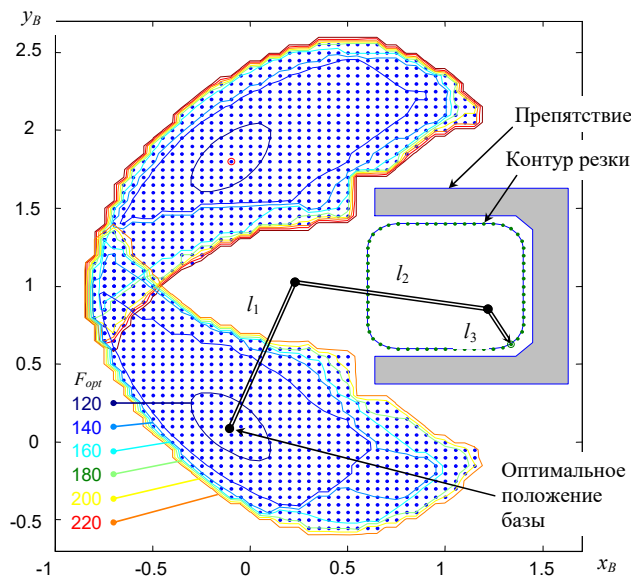


Рис. 3. Положения базы и значения критерия качества для трехзвенного манипулятора
Fig. 3. Base positions and quality criterion values for a three-link manipulator

На рис. 3 положения базы робота показаны точками, а оптимальные положения для значений индикатора конфигурации $\mu = -1$ и $\mu = 1$ обведены кругом. Линии уровня показывают области с одинаковым значением критерия качества траектории (7). Результаты поиска положения базы плоского манипулятора при различных значениях весовых коэффициентов и индикаторах конфигурации приведены в табл. 1. При моделировании использована сетка шагом $0,05$ м, включающая 61 узел. Симметрия области потенциальных решений объясняется симметрией контура резки и контура препятствия.

Второй модельный пример (рис. 4) показывает применение шестистого промышленного манипулятора Fanuc 710iC/50 при лазерной резке сглаженного контура круглой формы. Моделирование выполнено с использованием разработанного в ходе исследований программного обеспечения на базе системы Autodesk Inventor. Манипулятор состоит из трех вращательных звеньев, выполняющих переносные движения, и кисти с тремя степенями подвижности.

Степени свободы кисти обеспечивают ориентирование режущего инструмента. Контур резки представляет собой окружность, нанесенную на плоскую металлическую заготовку (квадрат с окружностью на рис. 4 *a, b*). Дискретизация контура выполнена равномерно посредством 100 узлов. На рис. 4, *a* возможные положения базы робота показаны цилиндрами, причем высота цилиндра пропорциональна значению критерия качества (7). Соответственно положения, обозначенные цилиндрами наименьшей высоты, минимизируют критерий (7) для трех первых индикаторов конфигурации манипулятора Fanuc 710iC/50. Для большей наглядности рис. 4, *b* показывает компоновку роботизированной ячейки на виде сверху. Проведенные эксперименты показывают, что предложенная методика позволяет достаточно эффективно определять оптимальное положение базы робота-манипулятора при движении режущего инструмента по сглаженной траектории.

Таблица 1. Результаты поиска координат базы плоского манипулятора при различных значениях весовых коэффициентов

Table 1. Results of coordinates searching of the planar manipulator base for different values of the weight coefficients

Весовые коэффициенты Weight coefficients			F_{opt}		Координаты базы робота-манипулятора The coordinates of the robotic arm base			
w_1	w_2	w_3	$\mu = -1$	$\mu = 1$	$\mu = -1$		$\mu = 1$	
					x	y	x	y
1	1	0	121,71	122,83	0,65	2	0,75	-0,1
1	1	1	120,4	120,45	-0,1	1,8	-0,1	0,15
2	1	1	116,65	116,59	-0,1	1,8	-0,1	0,1
3	1	1	114,27	114,27	-0,15	1,8	-0,1	0,1
4	1	1	112,6	112,57	-0,15	1,8	-0,15	0,1

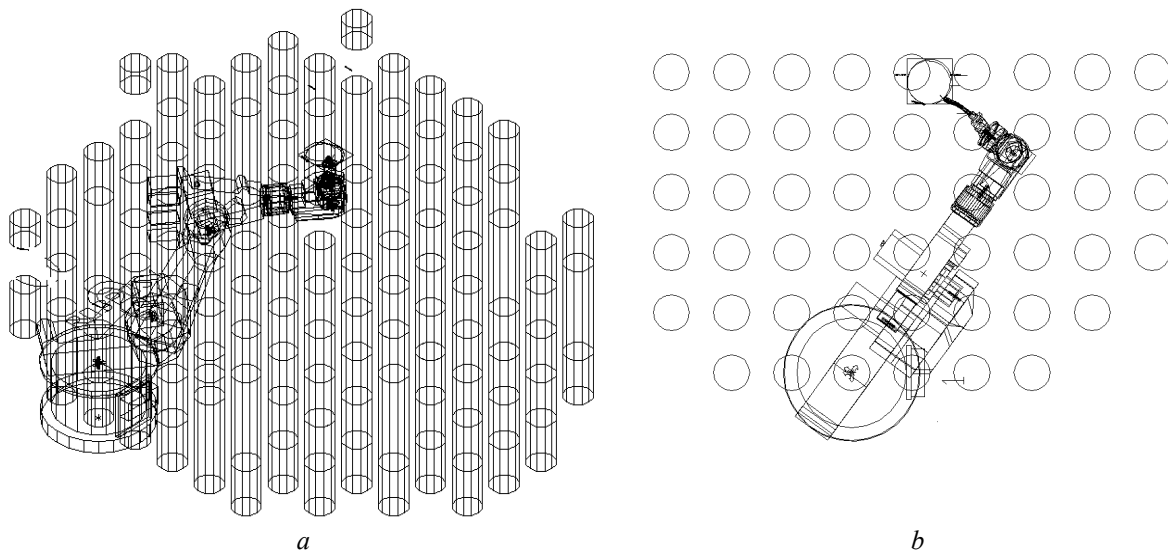


Рис. 4. Робот-манипулятор Fanuc 710iC/50 при лазерной резке кругового контура:

a – трехмерный вид; *b*– вид сверху

Fig. 4. Robotic manipulator Fanuc 710iC/50 for laser cutting of a circular contour:

a – three-dimensional view; *b*– view from above

Заключение

Разработана новая методика оптимизации положения базы робота-манипулятора, применимая при компоновке роботизированных линий лазерной резки. Предложенная методика, по сравнению с известными подходами, учитывает кинематические и геометрические ограничения на движения робота-манипулятора и режущего инструмента, а также позволяет найти положение робота, при котором режущий инструмент будет перемещаться по контуру резки с минимальным значением критерия объема движений в сочленениях.

Исследование предложенной методики проведено на модельных примерах. С целью оценки эффективности выполнено сравнение качества траекторий движения робота Fanuc 710iC/50 вдоль сглаженных круговых контуров резки с использованием типовой компоновки робототехнического комплекса и компоновки, оптимизированной по предложенной методике. Исследование показало, что применение оптимизированной компоновки позволяет в среднем на 20 % снизить объем движений робота Fanuc 710iC/50 вдоль контура резки по сравнению с типовой компоновкой, полученной методом геометрического моделирования.

Список литературы

1. Groover M. P. *Automation, Production Systems and Computer-Integrated Manufacturing. 4th edition.* Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall; 2015.
2. Moslemipour G., Lee T., Rilling D. A review of intelligent approaches for designing dynamic and robust layouts in flexible manufacturing systems. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology.* 2012;60(1):11-27. DOI: 10.1007/s00170-011-3614-x
3. Dolgui A., Pashkevich A. Manipulator motion planning for high speed robotic laser cutting. *International Journal of Production Research.* 2009;47(20):5691-5715. DOI: 10.1080/00207540802070967.
4. Moharana B., Gupta R., Kushawaha B. Optimization and Design of a Laser-Cutting Machine using Delta Robot. *International Journal of Engineering Trends and Technology.* 2014;10(4):176-179. DOI: 10.14445/22315381/IJETT-V10P233.
5. Geiger M., Kach A. Integration of Laser Material Processing into the Computer-Aided Product and Process Development. *Proceedings of the 3rd International Conference on Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering.* 2000:69. DOI: 10.1007/978-94-015-9966-5_31.
6. Dolgui A., Pashkevich A. Manufacturing process planning for laser cutting robotic systems. *Proceedings of the 17th World Congress The International Federation of Automatic Control.* 2008:14822-14827. DOI: 10.3182/20080706-5-KR-1001.02509.
7. Qiao S., Liao Q., Wei S., Su H.J. Inverse kinematic analysis of the general 6R serial manipulators based on double quaternions. *Mechanism and Machine Theory.* 2010;45(2):19-199. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2009.05.013.
8. Pashkevich A.P., Dolgui A.B., Chumakov O.A. Multiobjective optimization of robot motion for laser cutting applications. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing.* 2004;17:171-183. DOI: 10.1080/0951192031000078202.
9. Кожевников М.М., Чумаков О.А., Шеменков В.М., Илюшин И.Э. Методы и алгоритмы планирования траекторий роботов-манипуляторов для лазерной резки. *Вестник БПУ.* 2019;2:4-13.
10. Кожевников М.М., Чумаков О.А., Шеменков В.М., Илюшин И.Э., Юркина А.А. Оптимизация траекторий промышленных роботов-манипуляторов для лазерной резки. *Вестник БПУ.* 2020;2(67):21-30.

References

1. Groover M. P. *Automation, Production Systems and Computer-Integrated Manufacturing. 4th edition.* Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall; 2015.
2. Moslemipour G., Lee T., Rilling D. A review of intelligent approaches for designing dynamic and robust layouts in flexible manufacturing systems. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology.* 2012;60(1):11-27. DOI: 10.1007/s00170-011-3614-x.
3. Dolgui A., Pashkevich A. Manipulator motion planning for high speed robotic laser cutting. *International Journal of Production Research.* 2009;47(20):5691-5715. DOI: 10.1080/00207540802070967.
4. Moharana B., Gupta R., Kushawaha B. Optimization and Design of a Laser-Cutting Machine using Delta Robot. *International Journal of Engineering Trends and Technology.* 2014;10(4): 176-179. DOI: 10.14445/22315381/IJETT-V10P233.
5. Geiger M., Kach A. Integration of Laser Material Processing into the Computer-Aided Product and Process Development. *Proceedings of the 3rd International Conference on Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering.* 2000:69. DOI: 10.1007/978-94-015-9966-5_31.
6. Dolgui A., Pashkevich A. Manufacturing process planning for laser cutting robotic systems. *Proceedings of the 17th World Congress The International Federation of Automatic Control.* 2008:14822-14827. DOI: 10.3182/20080706-5-KR-1001.02509.
7. Qiao S., Liao Q., Wei S., Su H.J. Inverse kinematic analysis of the general 6R serial manipulators based on double quaternions. *Mechanism and Machine Theory.* 2010;45(2):19-199. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2009.05.013.

8. Pashkevich A.P., Dolgui A.B., Chumakov O.A. Multiobjective optimization of robot motion for laser cutting applications. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*. 2004;17:171-183. DOI: 10.1080/0951192031000078202.
9. Kazheunikau M.M., Chuakou O.A., Shemenkov V.M., Iliushin I.E. [Methods and algorithms for planning trajectories of robotic manipulators for laser cutting]. *Vestnik BRU*. 2019;2:4-13. (In Russ.)
10. Kazheunikau M.M., Chumakou O.A., Shemenkov V.M., Iliushin I.E., Jurkina A.A. [Trajectory optimization of industrial robotic manipulators for laser cutting]. *Vestnik BRU*. 2020;2(67):21-30. (In Russ.)

Вклад авторов

Кожевников М.М. осуществил постановку задачи для проведения исследования, разработал основные подходы к оптимизации положения робота, подготовил рукопись статьи.

Чумаков О.А. разработал методику оптимизации положения робота-манипулятора относительно контура лазерной резки.

Илюшин И.Э. выполнил алгоритмизацию методики оптимизации положения робота-манипулятора.

Юркина А.А. провела исследования по оценке эффективности методики оптимизации на модельных примерах.

Authors' contribution

Kazheunikau M.M. defined the task of the study, developed basic approaches to robot position optimization, submitted the manuscript of the article.

Chumakou O.A. developed the methodology for optimizing the position of the robot-manipulator regarding the laser cutting contour.

Iliushin I.E. performed the algorithmization of the position optimizing methodology for robot-manipulator.

Jurkina A.A. investigated the estimation of the optimization methodology effectiveness using model examples.

Сведения об авторах

Кожевников М.М., к.т.н., доцент, заведующий кафедрой автоматизации технологических процессов и производств Могилевского государственного университета продовольствия.

Чумаков О.А., к.т.н., доцент, доцент кафедры систем управления Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Илюшин И.Э., старший преподаватель кафедры автоматизации технологических процессов и производств Могилевского государственного университета продовольствия.

Юркина А.А., аспирант кафедры автоматизации технологических процессов и производств Могилевского государственного университета продовольствия.

Information about the authors

Kazheunikau M.M., PhD, Associate Professor, Head of the Department of Automation of Technological Processes and Production of the Mogilev State University of Food Technologies.

Chumakou O.A., PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Control System Department of the Belorussian State University of Informatics and Radioelectronics.

Iliushin I.E., Senior Lecturer at the Department of Automation of Technological Processes and Production of the Mogilev State University of Food Technologies.

Jurkina A.A., Postgraduate student at the Department of Automation of Technological Processes and Production of the Mogilev State University of Food Technologies.

Адрес для корреспонденции

212027, Республика Беларусь,
г. Могилев, пр. Шмидта, 3,
Могилевский государственный
университет продовольствия;
тел. +375-29-240-75-99;
e-mail: kmmk@mail.ru
Кожевников Михаил Михайлович

Address for correspondence

212027, Republic of Belarus
Mogilev, Shmidta str., 3,
Mogilev State University
of Food Technologies;
tel. +375-29-240-75-99;
e-mail: kmmk@mail.ru
Kazheunikau Mikhail Mikhailovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2021-19-3-58-65>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.365 (075.6)

ФОРМИРОВАНИЕ ОТВЕРСТИЙ В КРЕМНИЕВОЙ ПОДЛОЖКЕ 3D-ЭЛЕКТРОННОГО МОДУЛЯ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

В.Л. ЛАНИН, В.Т. ФАМ, А.И. ЛАППО

*Белорусский государственный университет информатики и электроники
(г. Минск, Республика Беларусь)*

Поступила в редакцию 1 февраля 2021

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2021

Аннотация. Лазерный нагрев является перспективным методом формирования отверстий в кремниевых подложках при сборке 3D-электронных модулей с высокой плотностью выводов из-за его высокой удельной энергии и способности локального нагрева. Применение лазерного излучения для формирования отверстий в кремнии дает возможность уменьшения их диаметра, косвенно повышает плотность элементов в 3D-электронных модулях. Выбор лазерной системы зависит от физико-механических свойств обрабатываемых материалов и от технических требований, предъявляемых к лазерной обработке. Отражательная способность большинства материалов возрастает с увеличением длины волны лазерного излучения. Установлено, что с повышением начальной температуры кремниевой подложки конусообразность отверстий в ней становится больше. Выполнено моделирование в COMSOL Multiphysics 5.6 для проведения теплового распределения при лазерной прошивке отверстий в кремниевой подложке. Моделированием тепловых полей в программном пакете COMSOL Multiphysics 5.6 при лазерной обработке кремниевых подложек и экспериментальными исследованиями оптимизированы параметры лазерного излучения для получения минимальной конусообразности отверстий в подложках 3D-электронных модулей. Оптимальная длительность воздействия лазерного излучения с длиной волны 10,64 мкм составляет не более 2 с при конусообразности отверстий 0,1–0,2.

Ключевые слова: лазерное излучение, кремниевая подложка, конусообразность отверстий, моделирование тепловых полей, начальная температура.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Ланин В.Л., Фам В.Т., Лаппо А.И. Формирование отверстий в кремниевой подложке 3D-электронного модуля лазерным излучением. Доклады БГУИР. 2021; 19(3): 58-65.

THROUGH-SILICON-VIA FORMATION OF 3D ELECTRONIC MODULES BY LASER RADIATION

VLADIMIR L. LANIN, VAN T. PHAM, ALEXANDR I. LAPPO

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 1 February 2021

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2021

Abstract. Laser heating is a promising method for through-silicon-via (TSV) formation in assembling high-density 3D electronic modules due to its high specific energy and local heating ability. Using laser radiation for the formation of TSV makes it possible to reduce its diameter, indirectly increases the density of elements in 3D electrical modules. Laser system selection depends on the physical and mechanical properties of the processed materials and on the technical requirements for laser processing. The reflectivity of most materials increases with the laser wavelength. It was found that with an increase in the initial temperature of the substrate, the TSV taper becomes larger. Simulation was performed in COMSOL Multiphysics 5.6 to conduct thermal distribution during TSV laser formation. By modeling thermal fields in the COMSOL Multiphysics 5.6 software for laser processing of silicon substrates and experimental studies, the parameters of laser radiation have been optimized to obtain a minimum hole taper coefficient in the substrates of 3D electronic modules. The optimal duration of exposure to laser radiation with a wavelength of 10.64 microns is less than 2 s with holes taper 0.1–0.2.

Keywords: laser radiation, silicon substrate, hole taper coefficient, thermal field simulation, initial temperature.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Lanin V.L., Pham V.T., Lappo A.I. Through-silicon-via formation of 3D electronic modules by laser radiation. Doklady BGUIR. 2021; 19(3): 58-65.

Введение

Движущей тенденцией в микроэлектронике является стремление создавать все более сложные и функциональные изделия в меньшем пространстве подложки, платы или корпуса. Достигается это за счет максимальной миниатюризации компонентов и укорачивания межсоединений, повышения предельных рабочих частот и распараллеливания систем обработки информации в одном приборе, переходе от плоских к «трехмерным» структурам и т. д. Интеграция происходит в виде многокристальных модулей, систем 3D-интеграции или вертикальной системной интеграции (VSI), которая характеризуется высокой плотностью выводов, которые проходят через отверстия в кремниевых кристаллах [1].

Технология формирования отверстий в кремниевой подложке является сравнительно новой, но быстроразвивающейся и эффективной. Применение лазерного излучения для формирования таких отверстий дает возможность уменьшения диаметра до десятков микрометров, что повышает плотность элементов в 3D-электронных модулях. Выбор лазерной системы зависит от физико-механических свойств обрабатываемых материалов, таких как шероховатость и покрытие, а также от технических требований, предъявляемых к лазерной обработке. Результат взаимодействия лазерного излучения с материалами сильно зависит от поглощения материала на длине волны лазерного излучения, пиковой мощности лазера и длительности воздействия излучения [2]. С другой стороны, рост температуры в зоне воздействия приводит к разрушению материала, поэтому эффективность обработки зависит от плотности мощности лазера и длительности воздействия излучения. Кроме этого, увеличение длительности излучения приводит к значительному тепловому и деформационному влиянию на материал вне зоны облучения. Таким образом, выбор источника лазерного излучения для микрообработки является сложной задачей, для решения которой зачастую приходится принимать комплексное решение. Процесс лазерной прошивки требует не только достаточно

большой мощности излучения, но также обеспечение реза с ровными гладкими кромками. Для этого необходимо сфокусировать лазерный луч в малоразмерное пятно.

Важным параметром лазера при рассмотрении импульсного режима воздействия является длина волны излучения λ , которая определяет степень поглощения лазерной энергии обрабатываемой поверхностью. С увеличением длины волны отражательная способность большинства материалов возрастает. Это означает, что лазеры с большой длиной волны по сравнению с лазерами с малой длиной волны отличаются повышенным расходом энергии, т. е. должны быть более мощными. Данная статья посвящена моделированию тепловых полей при лазерной обработке кремниевых подложек и оптимизации параметров лазерного излучения для получения минимальной конусообразности отверстий в подложках.

Моделирование параметров лазерного излучения

Поглощение лазерного излучения твердым телом происходит на глубине его проникновения $\delta = 1/\alpha$ по закону Бугера – Ламберта [2]:

$$Q(x, y, z) = Q_0(1 - R_c) \cdot \frac{A_c}{\pi r^2} e^{-\left[\frac{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}{2r^2}\right]} \cdot e^{-A_c z}, \quad (1)$$

где Q_0 – входная энергия лазера, R_c – коэффициент отражения, $A_c = 1 - R_c$ – коэффициент поглощения, r – радиус пятна лазера на поверхности подложки, x_0, y_0 – центр падающего луча лазера.

Для упрощения моделирования R_c и A_c для кремния считаются постоянными ($A_c = 0,15$ при длине волны лазерного излучения $\lambda = 10,64$ мкм [3]), температура плавления $T_{\text{пл-Si}} = 1415$ °С. Для моделирования импульсного лазера использованы следующие параметры: мощность лазера $P = 40$ Вт, длительность обработки $\tau_i = 1-5$ с, диаметр луча – 200 мкм, длина волны – 10,64 мкм. Параметры кремниевой пластины и источника лазерного излучения приведены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры кремниевой подложки и источника лазерного излучения
Table 1. Silicon wafer and laser source's parameters

Параметр Parameter	Значение Value
Радиус пластины Wafer radius	50 мм
Толщина пластины Wafer thickness	250 мкм
Удельная теплота испарения Specific heat of vaporization	13,68 кДж/г
Коэффициент отражения Reflection coefficient	0,3
Температура плавления Melting temperature	1415 °С
Плотность Density	2,33 г/см ³
Длина волны излучения Laser wavelength	10,64 мкм
Диаметр луча Beam diameter	0,2 мм
Длительность обработки Pulse duration	1–5 с
Мощность лазерного излучения Laser power	40 Вт

Моделированием температуры на поверхности кремния при лазерной обработке с помощью программного пакета COMSOL Multiphysics получены зависимости температуры в зоне нагрева от времени воздействия излучения при различных начальных температурах подложки и мощности лазерного излучения (рис. 1) и ее распределение на поверхности

подложки и внутри отверстий. С повышением температуры подложки, средняя температура в зоне воздействия излучения достигала температуры плавления кремния быстрее на 10 %, чем при нормальном состоянии.

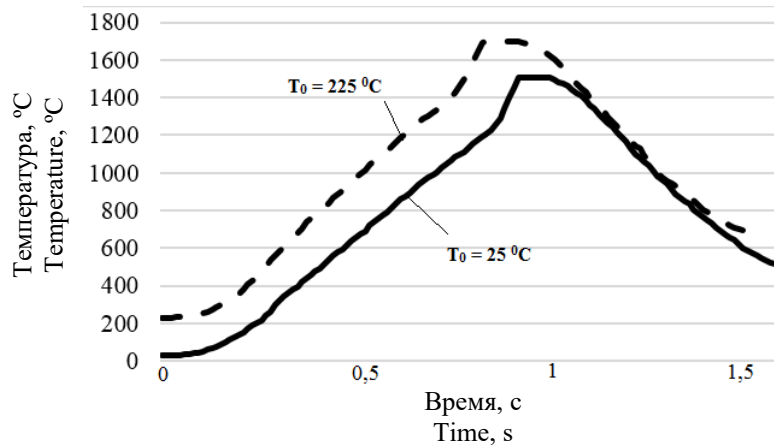


Рис. 1. Средняя температура в зоне воздействия излучения при комнатной температуре и повышенной температуре

Fig. 1. Average temperature in the area of exposure to radiation at room temperature and increased initial temperature

Для заключения об эффективности обработки необходимо учитывать, как влияет начальная температура на конусообразность отверстий. Конусообразность C – это отношение разности диаметров отверстий к толщине подложки, вычисляется по следующей формуле [4]:

$$C = \frac{D_{\text{вх}} - D_{\text{вых}}}{h}, \quad (2)$$

где $D_{\text{вх}}$ – входный диаметр отверстия, $D_{\text{вых}}$ – выходный диаметр отверстия, h – толщина подложки.

Конусообразность является универсальным параметром для оценки качества полученного отверстия в кремнии. Для качественного отверстия конусообразность C не должна превышать 0,1. Создание отверстия с таким значением C является серьезной технической задачей. Кроме того, снижение конусообразности отверстий увеличивает сложность процесса и время изготовления [5].

Выбор и применение процесса изготовления, а также определение достаточных по качеству отверстий TSV достигается моделированием. Компьютерное моделирование позволяет сократить время и ресурсы для получения оптимального режима обработки отверстий. Диаметр отверстия можно определить по тепловому контуру $T = 1415\text{ °C}$ с помощью 3D-модели в COMSOL Multiphysics (рис. 2) и вычислить конусообразность отверстий, полученную при различных температурах подложки (табл. 2).

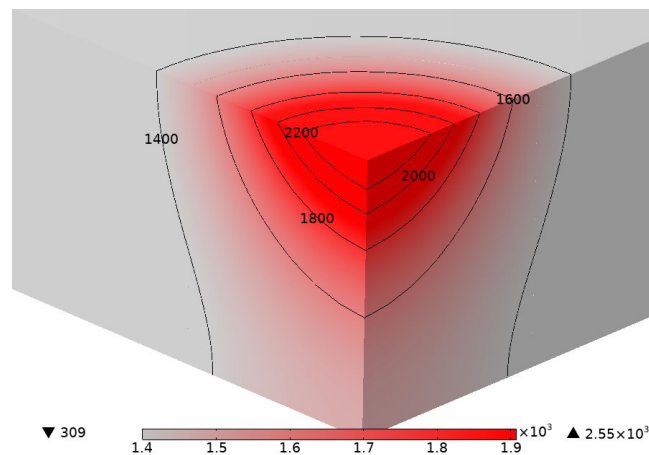


Рис. 2. Тепловое распределение внутри подложки
Fig. 2. Thermal distribution inside the substrate

Таблица 2. Параметры формирования отверстий в подложке
Table 2. Parameters of through-silicon-via formation

Время воздействия лазера, с Laser exposure time, s	Начальная температура, °C Initial temperature, °C	Входной диаметр, мкм Inlet diameter, μm	Выходной диаметр, мкм Outlet diameter, μm	Конусообразность Hole taper
1	25	225	140	0,34
	225	210	90	0,5
2	25	230	275	0,18
	225	190	250	0,24

В обоих случаях температура в области воздействия лазерного излучения достигала температуры плавления кремния в течение длительности излучения 1–2 с. В результате моделирования получены графики распределения температуры по расстоянию от центра излучения при воздействии излучения за 1 с (рис. 3) с различными начальными температурами T_0 .

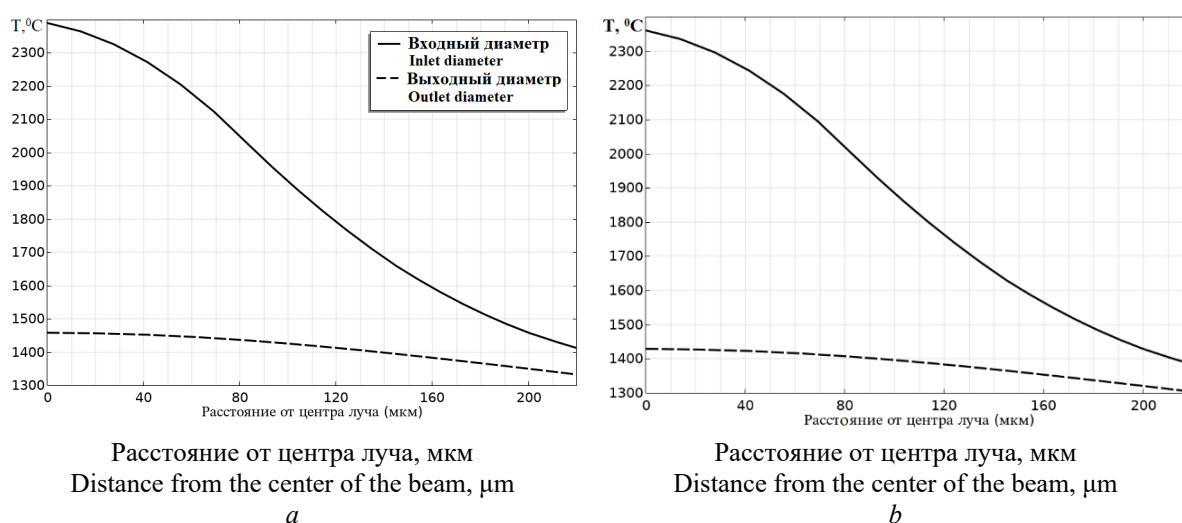


Рис. 3. Распределение температуры по расстоянию от центра излучения при воздействии излучения за 1 с: $a - T_0 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$; $b - T_0 = 225 \text{ }^\circ\text{C}$
Fig. 3. Temperature distribution over distance from the center of radiation when radiating for 1 s: $a - T_0 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$; $b - T_0 = 225 \text{ }^\circ\text{C}$

Поскольку при моделировании не учитывается удаление расплавленных материалов из отверстия в подложке, то процесс теплопередачи сильно зависит от тепла, переданного излучением в объект, не принимая во внимание прямое воздействие излучения на внутреннюю часть подложки. Если время воздействия достаточно мало (менее 2 с), то это не слишком влияет на результаты моделирования. При большем времени воздействия излучения (от 2,5 с и более) диаметры входного отверстия примерно на 35 % больше диаметра луча. В результате моделирования установлено, что если время воздействия излучения достаточно мало, то температура вне зоны нагрева практически не увеличивается, следовательно, тепло не передается по поверхности подложки.

Методика исследования

Устройство лазерной обработки состоит из лазерного источника с коллиматором выходного пучка, блока управления лазерным источником, оптической системы фокусировки и отклонения лазерного луча и координатной системы по осям X, Y, Z с установленным на ней образцом для обработки [5]. В качестве лазерного оборудования использован станок Yueming SMA0604-B-A (Китай), который оснащен поворотным устройством, механизмом автоматического подъема рабочего стола, газовым лазером (CO_2). Диаметр луча составлял 0,1 мм, мощность излучения – 40 Вт. Внешний вид лазерной головки и схема лазерной прошивки отверстий приведены на рис. 4.

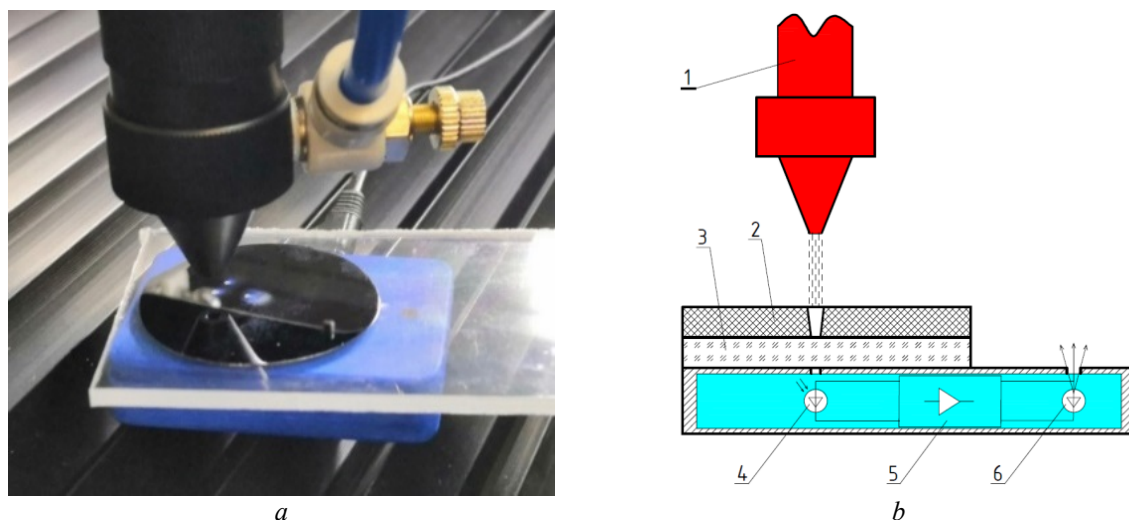


Рис. 4. Внешний вид (а) и схема (b) лазерной прошивки отверстий: 1 – лазер; 2 – кремниевая подложка; 3 – плексиглас; 4 – фотодиод; 5 – модуль усилителя; 6 – светодиод

Fig. 4. Appearance (a) and diagram (b) of laser hole piercing: 1 – laser; 2 – silicon substrate; 3 – plexiglass; 4 – photodiode; 5 – amplifier module; 6 – LED

Для контроля момента прохода излучения через подложку применен фотодиод, который через модуль усилителя подает сигнал на светодиод. Для определения размеров отверстий на кремневых пластинах использован USB-цифровой микроскоп Supereyes B008, который подключается к компьютеру. Для снижения разности температур между двумя сторонами подложки и исключения ее растрескивания в процессе прошивки, подложка в ряде опытов подогревалась до 200 °С.

Результаты исследований и их обсуждение

Получены экспериментальные данные диаметров отверстий в кремниевой подложке в зависимости от энергии лазерного излучения и начальной температуры подложки (табл. 3). На рис. 5 показаны зависимости конусообразности отверстий от времени воздействия излучения. В первом случае кремниевая подложка помещалась на резистивный нагреватель с подогревом до 200 °С, а во втором случае прошивка отверстий происходила при нормальных условиях.

Таблица 3. Результаты измерения диаметра отверстия
Table 3. Results of measuring the hole diameter

Время обработки, с Processing time, s	1		2	
	Температура, °С Temperature, °С	25	200	25
Входный диаметр, мкм Inlet diameter, μm	218	297	207	340
Выходный диаметр, мкм Outlet diameter, μm	156	110	179	225
Конусообразность (экспериментальный результат) Hole taper (experimental result)	0,25	0,75	0,11	0,46
Конусообразность (моделирование) Hole taper (simulation)	0,34	0,5	0,18	0,24

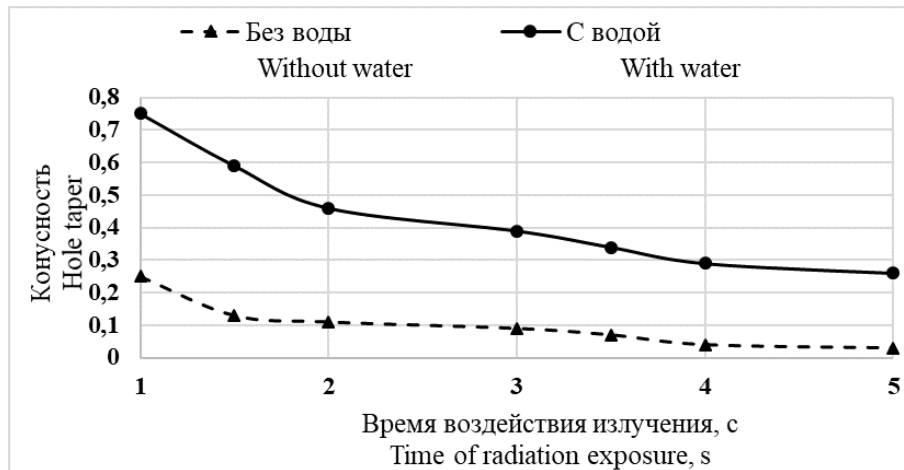


Рис. 5. Зависимости конусообразности отверстий от времени воздействия излучения
Fig. 5. Dependences of the taper of the holes on the time of exposure to radiation

Из экспериментальных результатов и моделирования можно сделать вывод, что с увеличением времени воздействия лазерного излучения коэффициент C уменьшается. Также можно сделать вывод, что при обработке кремниевой подложки с подогревом до 200 °С конусообразность отверстий в ней становится больше: при времени 1 с коэффициент C увеличивается в 3 раза и в 4,2 раза при обработке за 2 с. Однако при этом исключается растрескивание подложки из-за высокого градиента температур на ее лицевой и обратной сторонах.

При моделировании не учитываются все факторы, которые могут влиять на результат теплопередачи, например, удаление оплавленной части кремния, изменение коэффициента поглощения излучения материалом и динамический эффект лазерного излучения. Поэтому в данном случае появилось отклонение от экспериментального результата до 20 %. Однако компьютерное моделирование является достаточно эффективным средством для анализа и оптимизации параметров лазерного излучения для экспериментального применения.

С другой стороны, увеличение времени взаимодействия излучения приводит к увеличению диаметра входного отверстия за счет большей энергии излучения, что ухудшает соотношение размеров сквозных отверстий. Таким образом, оптимальным режимом формирования отверстий в кремнии является воздействие лазерного излучения длительностью 2 с при нормальной температуре.

Заключение

Лазерный нагрев является перспективным методом формирования отверстий в кремнии при сборке 3D-электронных модулей с высокой плотностью соединений из-за его высокой удельной энергии и способности локального нагрева. Моделированием тепловых полей в программном пакете COMSOL Multiphysics 5.6 при лазерной обработке кремниевых подложек определены параметры лазерного излучения для получения минимальной конусообразности отверстий в подложках 3D-электронных модулей. Оптимальная длительность воздействия лазерного излучения с длиной волны 10,64 мкм составляет не более 2 с при конусообразности отверстий 0,1–0,2. Результаты исследований показывают, что с увеличением длительности воздействия лазерного излучения соотношение диаметров входного к выходному отверстию растет. Для повышения качества отверстий необходимо учитывать такие параметры лазерного излучения, как его мощность, длину волны и режим работы.

Список литературы

1. Мухина Е., Башта П. 3D-сборка: технология сквозных отверстий в кремнии. *Электроника, Наука, Технология, Бизнес*. 2009;2:92-93.
2. Вакс Е.Д., Миленький М.Н., Сапрыкин Л.Г. *Практика прецизионной лазерной обработки*. Москва: Техносфера; 2013.
3. Вейко В.П., Либензон М.Н., Червяков Г.Г. *Взаимодействие лазерного излучения с веществом* Москва: Физматлит; 2008.
4. Ланин В.Л., Фам В.Т., Чан Н.Д. Лазерное формирование отверстий в неметаллических подложках. *Электронная обработка материалов*. 2020;56(1);76-83.
5. Григорьянц А.Г., Жиганов И.И., Мискоров А.И. *Технологические процессы лазерной обработки*. Москва: Изд-во МГТУ им. И. Э. Баумана; 2006.

References

1. Mukhina E., Bashta P. [3D assembly: through-hole technology in silicon]. *Electronics, Science, Technology, Business*. 2009;2:92-93. (In Russ.)
2. Vaks E.D., Milenky M.N., Saprykin L.G. [*Practice of precision laser processing*]. Moscow: Technosphaera; 2013. (In Russ.)
3. Veiko V.P., Libenzon M.N., Chervyakov G.G. [*Interaction of laser radiation with matter*]. Moscow: Fizmatlit; 2008. (In Russ.)
4. Lanin V.L., Pham V.T., Tran N.D. [Laser formation of holes in non-metallic substrates]. *Electronic material processing*. 2020;56(1);76-83. (In Russ.)
5. Grigoryants A.G., Zhiganov I.I., Miskorov A.I. [*Technological processes of laser processing*]. Moscow: Publishing house of MSTU im. I. E. Bauman; 2006. (In Russ.)

Вклад авторов

Все авторы в равной степени внесли вклад в написание статьи.

Authors' contribution

All authors equally contributed to the writing of the article.

Сведения об авторах

Ланин В.Л., д.т.н., профессор, профессор кафедры электронной техники и технологии Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Фам В.Т., магистрант кафедры электронной техники и технологии Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Лаппо А.И., аспирант кафедры электронной техники и технологии Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Information about the authors

Lanin V.L. D.Sc., Professor, Professor at the Electronic Engineering and Technology Department of the Belarus State University of Informatics and Radioelectronics.

Fam V.T., Undergraduate student at the Electronic Engineering and Technology Department of the Belarusian State University of of Informatics and Radioelectronics.

Lappo A.I., Postgraduate student at the Electronic Engineering and Technology Department of the Belarusian State University of of Informatics and Radioelectronics.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
тел. +375-29-757-28-23;
e-mail: vlanin@bsuir.by
Ланин Владимир Леонидович

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka str., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics;
tel. +375-29-757-28-23;
e-mail: vlanin@bsuir.by
Lanin Vladimir Leonidovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2021-19-3-66-74>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 004.94: 004.9.032.26

ВЕРИФИКАЦИЯ ЧИСЛЕННЫХ МЕТОДОВ И МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ, РАЗРАБОТАННЫХ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ МИГРАЦИИ РАДИОНУКЛИДОВ В ПРИРОДНЫХ ДИСПЕРСНЫХ СРЕДАХ

П.К. ШАЛЬКЕВИЧ¹, С.П. КУНДАС

¹*Международный государственный экологический институт имени А.Д. Сахарова
Белорусского государственного университета (г. Минск, Республика Беларусь)*

Поступила в редакцию 3 марта 2021

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2021

Аннотация. Возможность моделирования вертикальной миграции радионуклидов успешно реализована в первых версиях программного комплекса (ПК) SPS (Simulation of Processes in Soil) и основывается на численном решении математической модели взаимосвязанного тепло-влажноперевода в одномерной постановке. Однако для решения задачи комплексной оценки состояния биосферы в условиях ее радиационного загрязнения и лучшего приближения результатов моделирования к реальным процессам был разработан ПК SPS v2.0, в одном из программных модулей которого авторами реализована новая математическая модель, описывающая пространственную миграцию радионуклидов в почве (3D-модель). Численное решение этой математической модели основано на применении метода конечных элементов (МКЭ) и выполнении аналитической аппроксимации коэффициентов теплопроводности и давления жидкости, что обеспечивает возможность применения при моделировании технологий параллельных вычислений. Математическая модель, используемая в ПК SPS v2.0, а также численные методы ее решения требуют верификации, которая и проводится в представленной статье. Верификация разработанных численных методов проводилась с использованием математического ПК Comsol Multiphysics и программного модуля в составе ПК SPS v2.0 с последующим сравнением результатов расчетов. Различие в результатах расчетов, полученных с помощью перечисленных программных средств, составляет менее 5 %. Следовательно, численные методы программно реализованы корректно и обладают точностью решения, сравнимой с численными методами, применяемыми в современных программных пакетах для математического моделирования. Проведена также экспериментальная верификация математической модели, для которой использовались результаты экспериментальных измерений метеорологических условий, распределения влаги и температуры в почве. Эти данные сравнивались с результатами моделирования, полученными в ПК SPS v2.0. Установлено, что погрешность расчета анализируемых параметров не превышает 5 %, что позволяет применять разработанную модель для решения практических задач в рассматриваемой предметной области.

Ключевые слова: математическое моделирование, миграция радионуклидов, численные методы, метод конечных элементов, верификация.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Шалькевич П.К., Кундас С.П. Верификация численных методов и математической модели, разработанных для моделирования миграции радионуклидов в природных дисперсных средах. Доклады БГУИР. 2021; 19(3): 66-74.

VERIFICATION OF NUMERICAL METHODS AND MATHEMATICAL MODEL DEVELOPED FOR SIMULATION OF RADIONUCLIDES MIGRATION IN NATURAL DISPERSE ENVIRONMENTS

PAVEL K. SHALKEVICH¹, SEMJON P. KUNDAS

¹International Sakharov Environmental Institute of Belarusian State University (Minsk, Belarus)

Submitted 3 March 2021

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2021

Abstract. Simulation of radionuclides vertical migration was successfully implemented in the first versions of SPS (Simulation of Processes in Soil) software and was based on a numerical solution of the mathematical model of interconnected heat and moisture transfer in one dimension. But in order to solve problems of a comprehensive assessment of the state of the biosphere under radionuclides pollution and better approximation of simulation results to real processes, authors developed SPS v2.0 software. One of the modules of SPS v2.0 uses new mathematical model that describes the spatial migration of radionuclides in soil (3D-model). The numerical solution of this mathematical model is based on the application of the finite element method and the analytical approximation of thermal conductivity and liquid pressure coefficients. Such approach makes possible to use parallel computing technologies for simulation. The mathematical model used in SPS v2.0, as well as numerical methods for solving it, require verification, which is carried out in this article. Verification of the developed numerical methods was carried out using Comsol Multiphysics software and SPS v2.0 module with the following comparison of the calculation results. The difference in the calculation results obtained using the listed software is less than 5 %, therefore, the numerical methods are correctly implemented in SPS v2.0 and have a solution accuracy comparable to the numerical methods used in modern software. For the mathematical model verification were used the results of experimental measurements of meteorological conditions, distribution of moisture and temperature in soil, which were compared with the simulation results obtained in SPS v2.0. The comparison shows that the error in the calculation of the analyzed parameters does not exceed 5 %, which allows the developed model to be used for solvation of practical problems in the subject area.

Keywords: mathematical modeling, radionuclide migration, numerical methods, finite element method, heat and moisture transfer.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Shalkevich P.K., Kundas S.P. Verification of numerical methods and mathematical model developed for simulation of radionuclides migration in natural disperse environments. Doklady BGUIR. 2021; 19(3): 66-74.

Введение

Программный комплекс (ПК) SPS (Simulation of Processes in Soil) [1] был разработан для моделирования миграции радионуклидов в природных дисперсных средах. В первых версиях ПК SPS была возможность моделирования только вертикальной миграции радионуклидов в почве, которая реализовывалась путем численного решения в одномерной постановке математической модели, предложенной в [1], представляющей собой систему уравнений переноса тепла и влагопереноса, решаемую относительно температуры и давления жидкости, и систему уравнений конвективной диффузии и кинетики сорбции.

Однако для приближения результатов моделирования к реальным процессам [2] и с целью решения задачи комплексной оценки состояния биосферы [3] авторами был разработан ПК SPS v2.0, в одном из программных модулей которого реализована математическая модель, описывающая процесс распространения тепла, влаги и растворимых в ней загрязняющих веществ в природных дисперсных средах, разработанная для моделирования пространственной миграции радионуклидов в почве [3]. Численное решение этой математической модели основано на применении метода конечных элементов (МКЭ), который

позволяет выполнить аналитическую аппроксимацию коэффициентов теплопроводности и давления жидкости, что, в свою очередь, обеспечивает возможность применения при моделировании технологий параллельных вычислений [2]. Верификации примененных численных методов, а также самой математической модели и посвящена представленная статья.

Верификация численных методов, примененных для компьютерной реализации разработанной математической модели

Отличительной особенностью предложенного авторами метода численного решения задачи переноса влаги и растворимых в ней веществ в природных дисперсных средах является применение аналитической аппроксимации коэффициентов теплопроводности и давления жидкости в трехмерной постановке на основе МКЭ [2, 3] с предварительным расщеплением общей задачи миграции загрязняющих веществ на физические процессы.

Таким образом, учитывая, что целесообразность и перспективность применения МКЭ для численного решения уравнений взаимосвязанного тепловлагопереноса не вызывает сомнений [1, 4–6], была проведена верификация применяемых численных методов для решения системы уравнений конвективной диффузии и кинетики сорбции путем решения системы дифференциальных уравнений [3, 7, 8]:

$$\begin{cases} C \frac{\partial \theta_{liq}}{\partial t} = \nabla \cdot (\theta_{liq} \mathbf{D} \nabla C - \mathbf{u} C) - \theta_{liq} \lambda C - \rho_b \frac{\partial a}{\partial t}, \\ \rho_b \frac{\partial a}{\partial t} = \rho_b \beta (K_d C - a) \end{cases}, \quad (1)$$

где C – концентрация вещества в растворе, $\text{кг}/\text{м}^3$; θ_{liq} – объемное влагосодержание, $\text{м}^3/\text{м}^3$; \mathbf{D} – тензор гидродинамической дисперсии, $\text{м}^2/\text{с}$; t – время, с ; \mathbf{u} – вектор скорости переноса вещества в почве потоком жидкости, $\text{м}/\text{с}$; λ – постоянная распада, определяющая изменение концентрации за счет радиоактивного распада: $\partial C/\partial t$; ρ_b – плотность твердой фазы, $\text{кг}/\text{м}^3$; a – концентрация вещества в адсорбированном состоянии, $\text{кг}/\text{м}^3$; β – скорость сорбции, с^{-1} ; K_d – коэффициент распределения между веществом, растворимым в жидкости, и твердой фазой, $\text{м}^3/\text{кг}$.

Верификация проводилась с использованием математического ПК COMSOL Multiphysics [5] и созданных программных средств (на базе SPS v2.0) и последующим сравнением результатов расчета. Для этого были построены две трехмерные области: область № 1, размеры которой $0,5 \times 0,5 \times 0,5$ м, и область № 2, размеры которой $1,5 \times 1,5 \times 1,0$ м. При этом область № 1 расположена внутри области № 2, соприкасаясь с ней пятью гранями (рис. 1). В области № 1 концентрация загрязняющего вещества в начальный момент времени ($t = 0$) задавалась равной 100 %, в области № 2 концентрация загрязняющего вещества в этот момент равнялась нулю. Тип почвы в областях № 1 и 2 одинаковый. Следовательно, распределение концентрации растворимых и адсорбированных веществ будет иметь следующий вид: для области № 1: $C(x, y, z, 0) = 1$, $a(x, y, z, 0) = K_d C$; для области № 2: $C(x, y, z, 0) = 0$, $a(x, y, z, 0) = K_d C$.

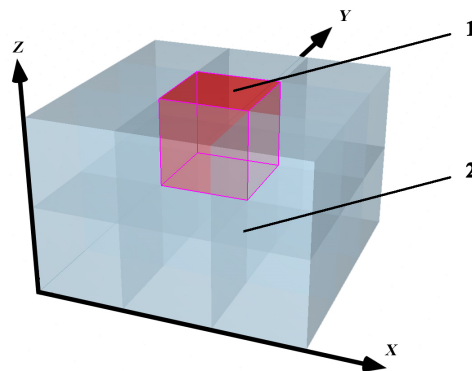


Рис. 1. Трехмерные области: 1 – область № 1, 2 – область № 2
Fig. 1. Three-dimensional areas: 1 – area № 1, 2 – area № 2

Граничные условия на поверхностях, разделяющих области № 1 и 2, определим следующим выражением [3]:

$$-(\theta_{liq} \mathbf{D} \nabla C - \mathbf{u} C) = 0. \quad (2)$$

Перенос растворимых веществ моделировался до момента времени $t = 365$ дней, при этом расчетная область разбивалась на ≈ 4000 конечных элементов, а параметры системы уравнений конвективной диффузии и кинетики сорбции (1) имели следующие значения: $\theta_{liq} = 0,4 \text{ м}^3/\text{м}^3$; $\mathbf{u} = 2 \cdot 10^{-8} \text{ м/с}$; $\mathbf{D} = 5 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2/\text{с}$; $\tau = 0,7$; $a_x = 0,002 \text{ м}$; $\rho_b = 1200 \text{ кг/м}^3$; $K_d = 0,001 \text{ м}^3/\text{кг}$; $\beta = 10^{-6} \text{ с}^{-1}$ [3].

Результаты решения системы уравнений конвективной диффузии и кинетики сорбции показаны на рис. 2, 3.

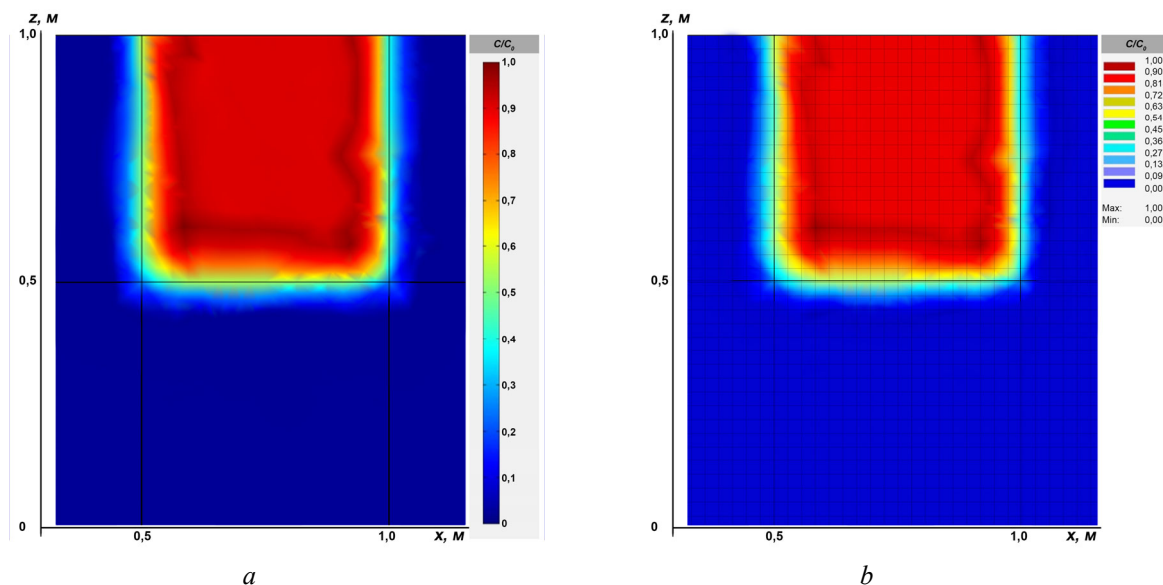


Рис. 2. Результаты моделирования переноса растворимых веществ в плоскости ZX:
a – полученные с помощью ПК COMSOL Multiphysics; *b* – полученные с помощью ПК SPS v2.0
Fig. 2. The results of modeling the migration of contaminants in the ZX plane:
a – obtained using COMSOL Multiphysics; *b* – obtained using SPS v2.0

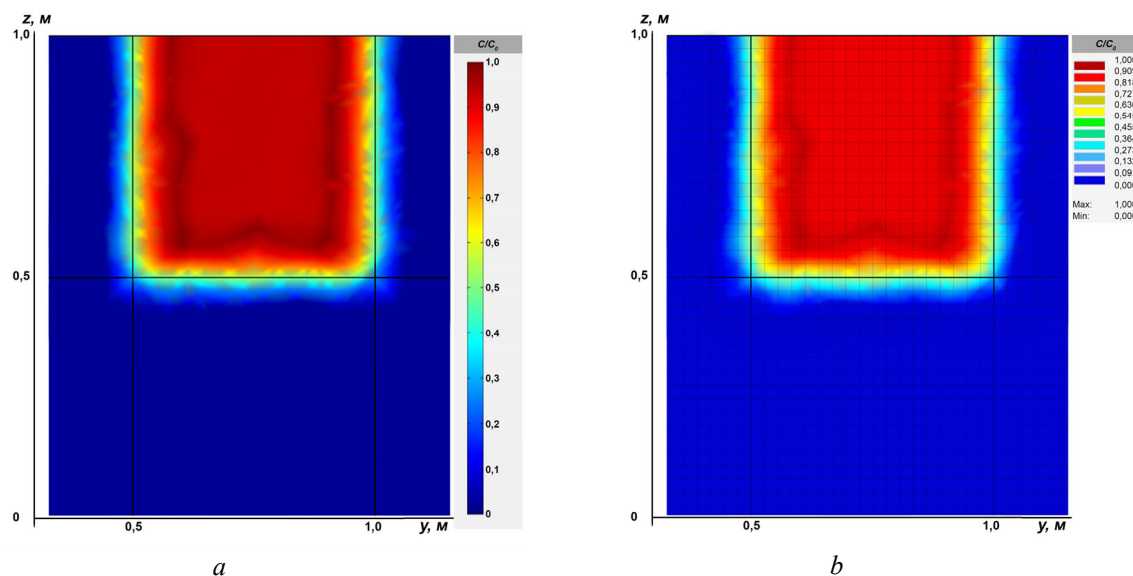


Рис. 3. Результаты моделирования переноса растворимых веществ в плоскости ZY:
a – полученные с помощью ПК COMSOL Multiphysics; *b* – полученные с помощью ПК SPS v2.0
Fig. 3. The results of modeling the migration of contaminants in the ZY plane:
a – obtained using COMSOL Multiphysics; *b* – obtained using SPS v2.0

Таким образом, был получен прогноз распределения концентрации загрязняющего вещества в заданных трехмерных областях. На рис. 4, 5 показано сравнение результатов, полученных с помощью разработанных программных средств и широко апробированного коммерческого программного пакета для моделирования COMSOL Multiphysics. Из указанного сравнения видно, что различие в результатах расчетов составляет менее 5 %.

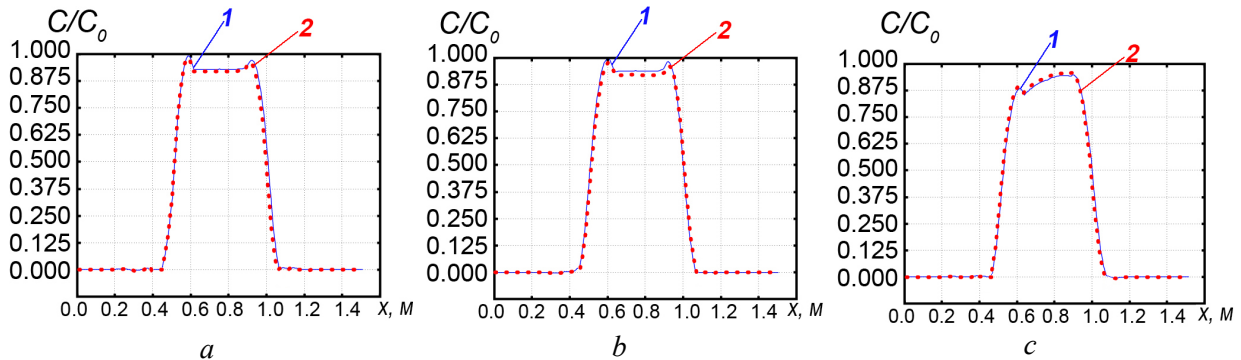


Рис. 4. Результаты расчетов распределения концентрации загрязняющего вещества, полученные с помощью ПК COMSOL Multiphysics (кривые 1) и ПК SPS v2.0 (кривые 2) в плоскости ZX:

a – при $z = 1,0$ м; *b* – при $z = 0,75$ м; *c* – при $z = 0,5$ м

Fig. 4. The results of calculating the contaminant concentration distribution obtained using COMSOL Multiphysics (curves 1) and SPS v2.0 (curves 2) in ZX plane:

a – when $z = 1,0$ m; *b* – when $z = 0,75$ m; *c* – when $z = 0,5$ m

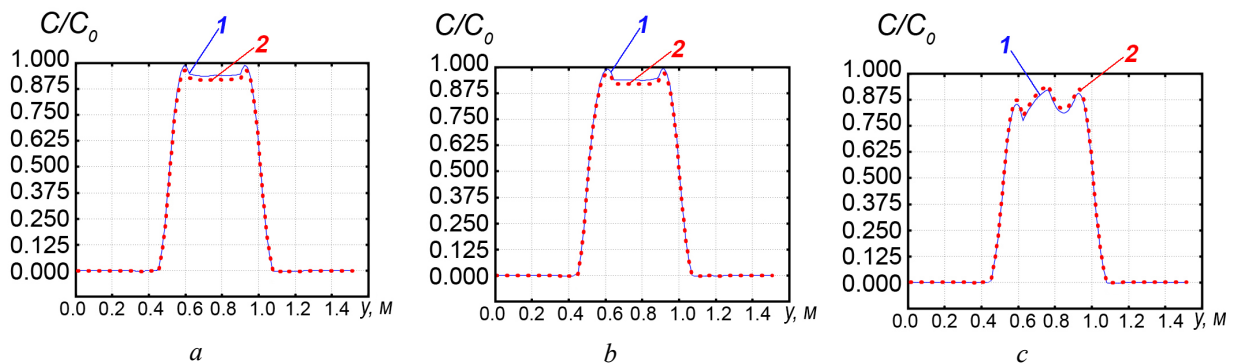


Рис. 5. Результаты расчетов распределения концентрации загрязняющего вещества, полученные с помощью ПК COMSOL Multiphysics (кривые 1) и ПК SPS v2.0 (кривые 2) в плоскости ZY:

a – при $z = 1,0$ м; *b* – при $z = 0,75$ м; *c* – при $z = 0,5$ м

Fig. 5. The results of calculating the contaminant concentration distribution obtained using COMSOL Multiphysics (curves 1) and SPS v2.0 (curves 2) in ZY plane:

a – when $z = 1,0$ m; *b* – when $z = 0,75$ m; *c* – when $z = 0,5$ m

Следовательно, используемые численные методы программно реализованы корректно и обладают точностью решения, сравнимой с численными методами, применяемыми в современных программных пакетах математического моделирования. Необходимо отметить, что на сегодняшний день [1] ПК COMSOL Multiphysics является наиболее эффективной программой для решения систем дифференциальных уравнений численными методами.

Верификация предложенной математической модели взаимосвязанного тепло-влажноперевода

Для проведения верификации математической модели взаимосвязанного тепло-влажноперевода [3] использовались результаты экспериментальных измерений метеорологических условий, распределения влаги и температуры в почве, приведенные в работе [9]. Необходимо также отметить, что согласно метеорологическим наблюдениям на 243 день выпадали дождевые осадки, интенсивностью 0,01 м в день.

Для проверки адекватности разработанной математической модели взаимосвязанного тепло-влажноперевода моделировалось изменение влагосодержания и температуры почвы в течение одиннадцати дней, для которых были известны климатические характеристики. При этом в качестве верхних граничных условий к уравнениям переноса тепла и влаги задавалось изменение температуры и относительной влажности воздуха. На нижней границе моделируемой области – равенство нулю потоков тепла и влаги. В начальный момент времени $t = 234$ день года по профилю почвы задавались распределения температур и влаги в соответствии с экспериментальными данными [9].

В результате моделирования получено изменение температуры и влагосодержания почвы на глубинах 0,01 и 0,02 м в течение одиннадцати дней, показанное на рис. 6, 7 (кривые 2). На рис. 6, 7 видно, что погрешность расчетов моделируемых параметров не превышает 5 %, что позволяет применять разработанную модель для решения практических задач в области охраны окружающей среды.

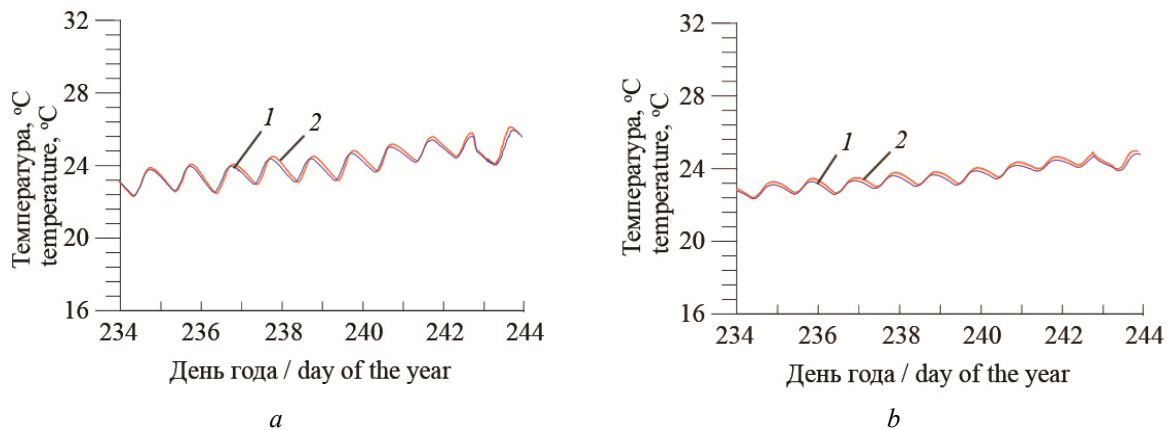


Рис. 6. Изменение температуры почвы в течение одиннадцати дней, измеренное экспериментально (кривые 1) и полученное с помощью предложенной математической модели (кривые 2):
 a – на глубине 0,01 м; b – на глубине 0,02 м

Fig. 6. Temperature change during eleven days, measured experimentally (curves 1) and obtained using the proposed mathematical model (curves 2): a – at a depth of 0,01 m; b – at a depth of 0,02 m

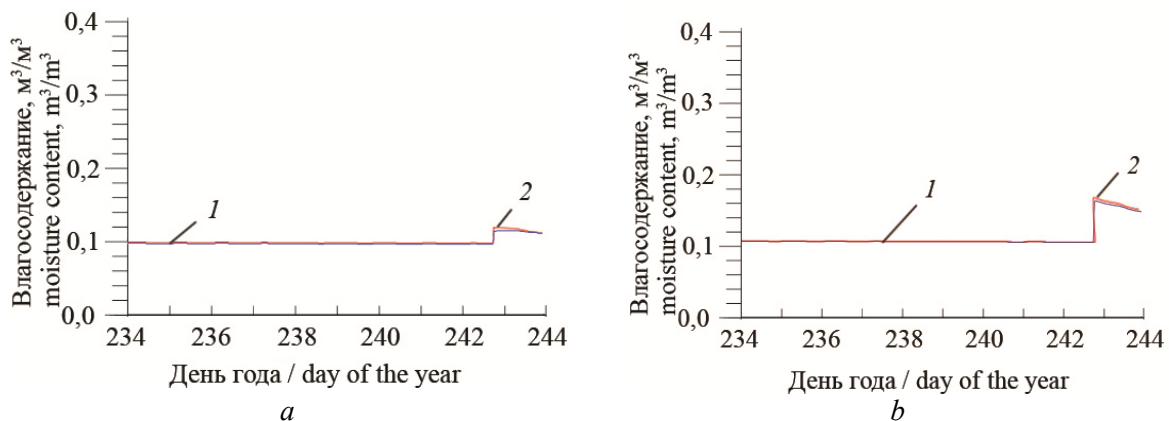


Рис. 7. Изменение объемного влагосодержания почвы в течение одиннадцати дней, измеренное экспериментально (кривые 1) и полученное с помощью предложенной математической модели (кривые 2): a – на глубине 0,01 м; b – на глубине 0,02 м

Fig. 7. Moisture content change during eleven days, measured experimentally (curves 1) and obtained using the proposed mathematical model (curves 2): a – at a depth of 0,01 m; b – at a depth of 0,02 m

Однако, учитывая то, что предложенная математическая модель позволяет решать задачи моделирования в трехмерной постановке с учетом соответствующих граничных условий, была также проведена ее верификация с использованием результатов экспериментальных измерений влагосодержания почвы в эксперименте, описанном в работе [10].

Указанный эксперимент (рис. 8) проводился в 2009 году и заключался в посеве урожая кукурузы с интервалом между рядами, равном 0,6 м, причем для каждого из двух рядов была установлена система орошения на глубине 0,35 м. Посев урожая осуществлялся в промежутке с 110 по 115 день года, а сбор урожая – в промежутке с 263 по 268 день года. Для проверки адекватности разработанной математической модели взаимосвязанного тепловлагопереноса [3] моделировалось изменение влагосодержания почвы в течение 68 дней начиная с 169 дня года. При этом в качестве верхних и нижних граничных условий задавались условия, соответствующие средам, показанным на рис. 8. В начальный момент времени по профилю почвы задавалось распределение влаги в соответствии с экспериментальными данными на 169 день года. Необходимо отметить, что первое орошение проводилось в течение 7,5 часов на 170 день года, а последующие орошения проводились три раза в неделю (понедельник, среда, пятница) в течение 3 часов каждое начиная с 173 дня года.

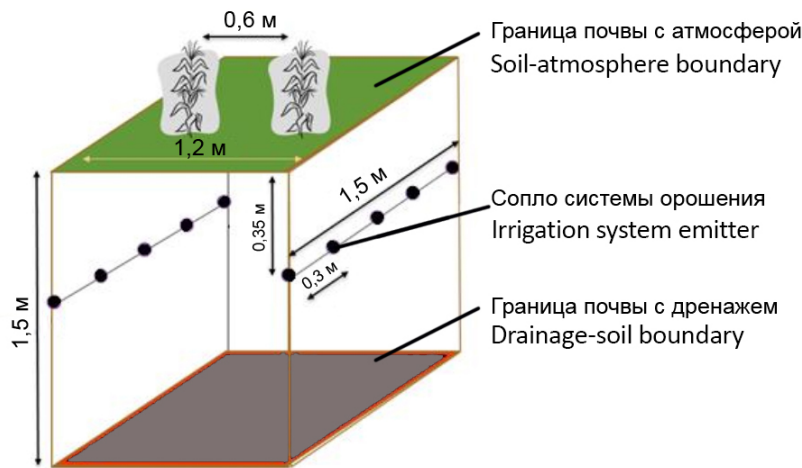


Рис. 8. Схематическое изображение эксперимента, проведенного в работе [9]
Fig. 8. Schematic representation of the experiment carried out in [9]

На рис. 9 приведено сравнение полученных результатов моделирования с экспериментальными данными для 202 и 237 дней года. На рисунке доверительный интервал обозначен кругом серого цвета.

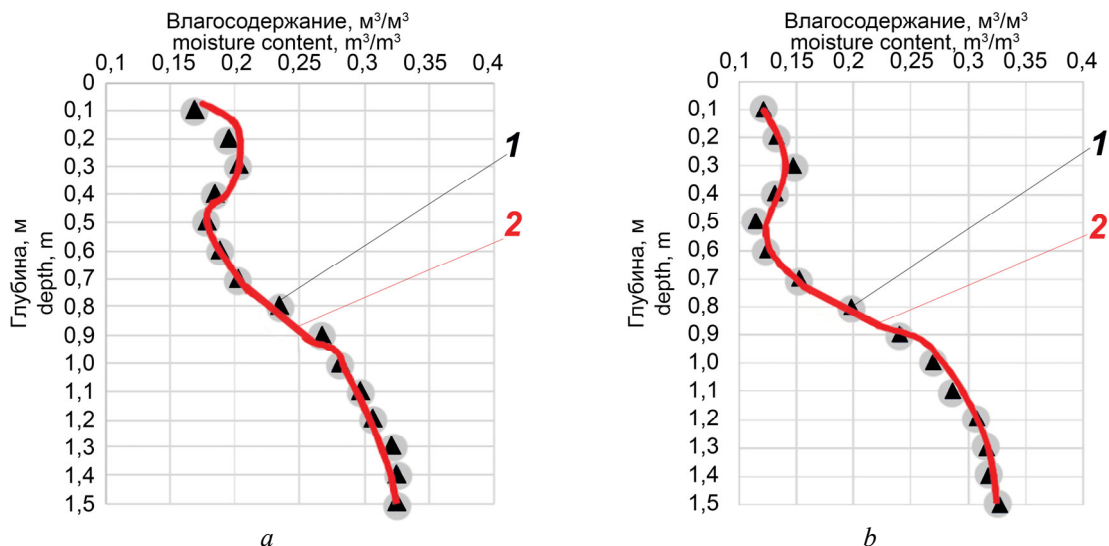


Рис. 9. Значения влагосодержания в почве, измеренные экспериментально (фигуры 1) и полученные с помощью предложенной математической модели (кривые 2): а – на 202 день года; б – на 237 день года
Fig. 9. Values of moisture content in the soil, measured experimentally (shapes 1) and obtained using the proposed mathematical model (curves 2): a – on the 202nd day of the year; b – on the 237th day of the year

Примечательно, что влагосодержание почвы на глубинах до 0,8 м на 237 день значительно ниже, чем на 202 день. Это обусловлено сезонным изменением климатических параметров и гидравлическими параметрами почвы [10].

На рис. 9 видно, что погрешность расчетов анализируемых параметров не превышает 5 %, так как смоделированные значения попадают в доверительный интервал, обозначенный серым цветом. Следовательно, разработанная модель адекватна реальным процессам, протекающим в почве.

Заключение

Верификация разработанных численных методов решения уравнений неизоэнтальпического влагопереноса, конвективной диффузии и кинетики сорбции показала, что их точность соответствует лучшим зарубежным разработкам в этой области, реализованным в математическом пакете COMSOL Multiphysics. Экспериментальная верификация разработанной модели неизоэнтальпического переноса влаги и растворимых в ней веществ в природных дисперсных средах свидетельствует о ее адекватности реальному процессу и показывает, что отклонение значений получаемых результатов не превышает 5 %. Это свидетельствует о возможности эффективного практического использования ПК SPS v2.0 для решения задач моделирования миграции радионуклидов в природных дисперсных средах.

Список литературы

1. Кундас С.П., Гишкелюк И.А., Коваленко В.И., Хилько О.С. *Компьютерное моделирование миграции загрязняющих веществ в природных дисперсных средах*. Минск: МГЭИ им. А.Д. Сахарова; 2011.
2. Шалькевич П.К., Кундас С.П., Гишкелюк И.А. Технология параллельных вычислений задачи тепло-влажностного переноса в программном комплексе SPS. *Информатика*. 2015; 45.
3. Шалькевич П.К. *Модель и алгоритмы для прогнозирования миграции радионуклидов в природных дисперсных средах с применением технологий параллельных вычислений*. Минск: МГЭИ им. А.Д. Сахарова БГУ; 2019.
4. *ANSYS Theory Manual*. ANSYS Release. SAS IP, Inc. 2001.
5. *COMSOL Multiphysics. User's Guide*. COMSOL AB. 2012.
6. Сегерлинд Л. *Применение метода конечных элементов*. Москва: Мир; 1979.
7. Гринчик Н.Н. *Процессы переноса в пористых средах, электроплитах и мембранах*. Минск: АНК ИТМО АНБ; 1991.
8. Кундас С.П., Гринчик Н.Н., Гишкелюк И.А., Адамович А.Л. *Моделирование процессов термо-влажностного переноса в капиллярно-пористых средах*. Минск: ИТМО НАН Беларуси; 2007.
9. Alvalá R.C.S., Gielow R., Rocha H.R., Freitas H.C., Lopes J.M., Manzi A.O., Randow C., Dias M.A.F.S., Cabral O.M.R., Waterloo M.J. Intradiurnal and seasonal variability of soil temperature, heat flux, soil moisture content, and thermal properties under forest and pasture in Rondônia. *Journal of geophysical research*. 2002;107(20).
10. Honari M., Ashrafzadeh A., Khaledian M., Vazifedoust M., Mailhol J.C. Comparison of HYDRUS-3D soil moisture simulations of subsurface drip irrigation with experimental observations in the South of France. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 2017;143(7).

References

1. Kundas S.P., Gishkelyuk I.A., Kovalenko V.I., Hilko O.S. [Computer simulation of the migration of pollutants in natural dispersed environments]. Minsk: Minsk: MGEI im. A.D. Saharova; 2011.
2. Shalkevich P.K., Kundas S.P., Gishkelyuk I.A. [Parallel computing technology for the heat and moisture transfer problem in the SPS software package]. *Informatica=Informatics*. 2015; 45.
3. Shalkevich P.K. [Model and algorithms for predicting the migration of radionuclides in natural dispersed media using parallel computing technologies]. Minsk: MGEI im. A.D. Saharova BGU; 2019.
4. *ANSYS Theory Manual*. ANSYS Release. SAS IP, Inc. 2001.
5. *COMSOL Multiphysics. User's Guide*. COMSOL AB. 2012.
6. Segerlind L. [Application of the finite element method]. Moscow: Mir, 1979.
7. Grinchik N.N. [Transfer processes in porous environment, electric stoves and membranes]. Minsk: ANK ИТМО АНБ; 1991.

8. Kundas S.P., Grinchik N.N., Gishkelyuk I.A., Adamovich A.L. [*Modeling the processes of thermal and moisture transfer in capillary-porous environment*]. Minsk: ITMO NAN Belarusi; 2007.
9. Alvalá R.C.S., Gielow R., Rocha H.R., Freitas H.C., Lopes J.M., Manzi A.O., Randow C., Dias M.A.F.S., Cabral O.M.R., Waterloo M.J. Intradurnal and seasonal variability of soil temperature, heat flux, soil moisture content, and thermal properties under forest and pasture in Rondônia. *Journal of geophysical research*. 2002;107(20).
10. Honari M., Ashrafzadeh A., Khaledian M., Vazifedoust M., Mailhol J.C. Comparison of HYDRUS-3D soil moisture simulations of subsurface drip irrigation with experimental observations in the South of France. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 2017;143(7).

Вклад авторов

Шалькевич П.К. выполнил верификацию используемых численных методов и разработанной математической модели миграции радионуклидов в природных дисперсных средах, принимал участие в разработке ПК SPS V2.0.

Кундас С.П. определил цель и задачи проведенных исследований, сформулировал введение и заключение, выполнил научное редактирование статьи, руководил разработкой и развитием ПК SPS, ПК SPS V2.0.

Authors' contribution

Shalkevich P.K. performed a verification of the numerical methods and the mathematical model of radionuclides migration in natural disperse environments, took part in development of SPS V2.0 software.

Kundas S.P. defined the purpose and objectives of the research, formulated an introduction and conclusion, edited the article, supervised the development of SPS and SPS V2.0 software.

Сведения об авторах

Шалькевич П.К., к.т.н., доцент кафедры энергоэффективных технологий Международного государственного экологического института имени А.Д. Сахарова Белорусского государственного университета.

Кундас С.П., д.т.н., профессор.

Information about the authors

Shalkevich P.K., PhD, Associate Professor of Energy Efficient Technologies Department of International Sakharov Environmental Institute of Belarusian State University.

Kundas S.P., D.Sci, Professor.

Адрес для корреспонденции

220070, Республика Беларусь,
Минск, ул. Долгобродская, 23,
Международный государственный
экологический институт имени А. Д. Сахарова
Белорусского государственного университета;
тел. +375-17-230-68-97;
e-mail: pavel.shalkevich@gmail.com
Шалькевич Павел Константинович

Address for correspondence

220070, Republic of Belarus,
Minsk, Dolgobrodskaya str., 23,
International Sakharov Environmental Institute
of Belarusian State University;
tel. +375-17-230-68-97;
e-mail: pavel.shalkevich@gmail.com
Shalkevich Pavel Konstantsinovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2021-19-3-75-80>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.37; 004.457

АНАЛИЗ ПРОГРАММ ДЛЯ РАСЧЕТА СИСТЕМНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ РАДИОПРИЕМНЫХ ТРАКТОВ

Д.В. АРХИПЕНКОВ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)*

Поступила в редакцию 22 февраля 2021

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2021

Аннотация. При проектировании радиотехнических изделий на ранних стадиях одной из важнейших решаемых задач является определение эффективного варианта исполнения системы/устройства путем анализа всех возможных доступных исполнений. Поэтому разработка таких систем/устройств представляет собой сложный и трудоемкий процесс, который в себе подразумевает бесконечно большое количество итераций расчетов и моделирований различных вариантов в поисках оптимально-эффективного. В данной статье рассмотрены программы: AppCAD от компании Agilent и ADISimRF от компании Analog Devices. Данные программы имеют большой функционал, множество рассчитываемых системных характеристик тракта, но в каждой из них существуют недостатки, например, отсутствие редактируемой базы данных интегральных микросхем, отсутствие расчетов динамического диапазона по интермодуляции третьего порядка приемного тракта, невозможность оптимизации по нелинейным искажениям и т. д. Целью статьи является разработка оригинальной программы для расчета радиоприемных трактов, которая по функционалу не уступает зарубежным аналогам и обладает рядом полезных для расчетов уточнений. В статье представлены формулы для расчета коэффициента шума аналогово-цифрового преобразователя (АЦП) и произведен сравнительный анализ полученных результатов с реальным значением. Коэффициент шума радиоприемного тракта уточнен с помощью включения в формулу коэффициента обратных потерь и коэффициента шума АЦП. Программа, разработанная автором статьи, имеет редактируемую элементную базу, работа с которой упрощает и ускоряет расчет устройства. Описан алгоритм работы программы, разработанной автором, и приведен расчет системных характеристик тракта для сравнения с зарубежными аналогами.

Ключевые слова: расчет радиоприемного тракта, АЦП, коэффициент шума АЦП, интермодуляция третьего порядка.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Архипенков Д.В. Анализ программ для расчета системных характеристик сверхширокополосных радиоприемных трактов. Доклады БГУИР. 2021; 19(3): 75-80.

ANALYSIS OF PROGRAMS FOR CALCULATION OF THE SYSTEM CHARACTERISTICS OF ULTRA-WIDE RANGE RECEIVING PATHS

DMITRY V. ARKHIPENKOV

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 22 February 2021

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2021

Abstract. When designing radio engineering products, at the early stages, one of the most important tasks to be solved is to determine the effective version of the system/device by analyzing all possible available versions. Therefore, the development of such systems / devices is a complex and time-consuming process, which involves an infinitely large number of iterations of calculations and simulations of various options in search of an optimal and efficient one. This article describes the programs: AppCAD from Agilent and ADISimRF from Analog Devices. These programs have a large functionality, a lot of calculated system characteristics of the path, but each of them has shortcomings, for example, the lack of an editable database of integrated circuits (IC), the lack of dynamic range calculations for third-order intermodulation of the receiving path, the inability to optimize for nonlinear distortions, etc. The purpose of the article is to develop an original program for calculating radio receiving paths, which is not inferior in functionality to foreign analogues and has a number of useful refinements for calculations. The article presents formulas for calculating the noise figure of an analog-to-digital converter (ADC) and makes a comparative analysis of the results obtained with the real value. The noise figure of the radio receiving path is refined by including the reverse loss coefficient and the ADC noise figure in the formula. The program developed by the author of the article has an editable element base, which simplifies and accelerates the calculation of the device. The algorithm of the program developed by the author is described, and the calculation of the system characteristics of the path for comparison with foreign analogues is given.

Keywords: calculation of the radio receiving path, ADC, ADC noise figure, third-order intermodulation.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Arkhipenkov D.V. Analysis of programs for calculation of the system characteristics of ultra-wide range receiving paths. Doklady BGUIR. 2021; 19(3): 75-80.

Введение

На ранних стадиях проектирования изделий решается задача определения эффективного варианта реализации радиоприемной/радиопередающей системы путем анализа всех возможных вариантов. Поэтому разработка таких систем представляет собой сложный и трудоемкий процесс.

Большой ассортимент технических средств современной вычислительной техники, развитие программного обеспечения, автоматизация программирования, неограниченные ресурсы вычислительных систем, интеллектуальные интерфейсы и т. п. предоставляют возможность проектировщикам перенести на компьютер рутинные виды деятельности. Поэтому использование виртуальных средств моделирования и проектирования позволяет упростить и ускорить процесс проектирования и оптимизации, повысить точность и надежность разрабатываемых изделий. Такие компании, как Analog Devices, Agilent, Keysight и др., выпускают программы для проектирования систем со своими особенностями: методами расчета и моделирования, базой данных (БД), различным количеством рассчитываемых системных характеристик. С их помощью инженеры могут моделировать поведение сигнальных трактов, состоящих из ВЧ интегральных микросхем.

Таким образом, проектирование с помощью средств вычислительной техники позволяет сократить сроки разработки изделия при одновременном увеличении их сложности.

Анализ программ расчета приемного тракта

В настоящее время многие математические пакеты позволяют произвести расчет параметров радиоприемных устройств. Наряду с ними ведущие компании выпускают свои простые/узконаправленные программные обеспечения для выполнения данных функций. Поэтому произведем расчет структуры радиоприемного тракта (рис. 1) [1], например, в AppCAD (№ 1) и ADISimRF (№ 2) (результаты представлены на рис. 2, 3). Выбор данных программ обусловлен наличием их в свободном доступе. Для увеличения количества рассчитываемых системных характеристик расчеты проводятся в нескольких программах.

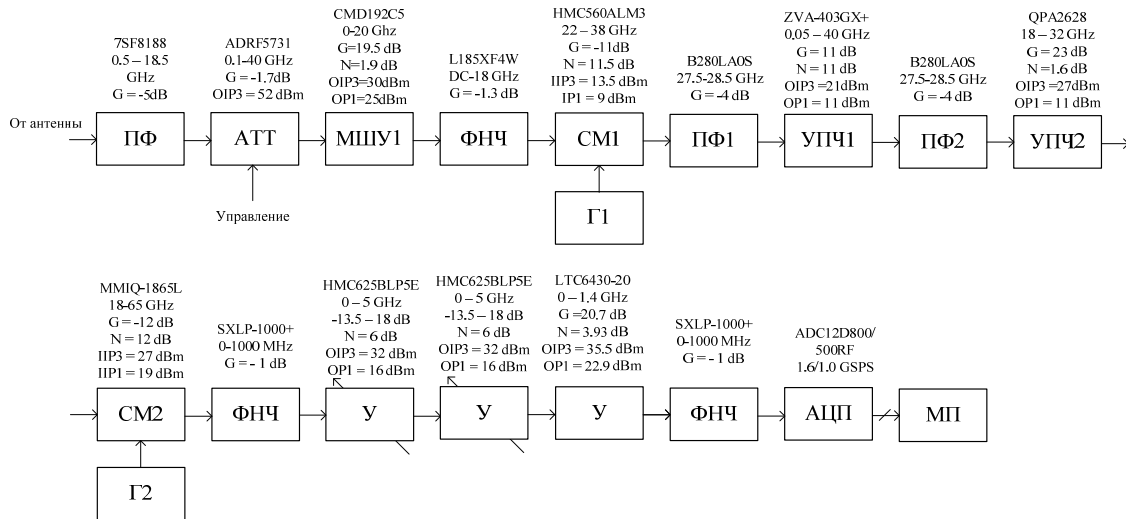


Рис. 1. Структура радиоприемного тракта
Fig. 1. The structure of the radio receiving device

Input Power	-82	dBm	Gain =	35,20	dB	Input IP3 =	-4,14	dBm
Analysis Temperature	25	°C	Noise Figure =	11,80	dB	Output IP3 =	31,06	dBm
Noise BW	10	MHz	Noise Temp =	4099,25	*K	Input IM level =	-237,72	dBm
Ref Temperature	25	°C	SNR =	10,18	dB	Input IM level =	-155,72	dBc
S/N (for sensitivity)	10	dB	MDS =	-92,18	dBm	Output IM level =	-202,52	dBm
Noise Source (Ref)	290	*K	Sensitivity =	-82,18	dBm	Output IM level =	-155,72	dBc
			Noise Floor =	-162,18	dBm/Hz	SFDR =	58,69	dB

Рис. 2. Результаты расчетов радиоприемного тракта в программе № 1
Fig. 2. The results of calculations of the radio receiving path in the program № 1

Input			Analysis		
Number of Stages	15		Output Power (rms)	-46.8	dBm
Input Power	-82	dBm	Output Voltage (rms)	1.02	mVrms
Analysis Bandwidth	10	MHz	Output Voltage (pp)	2.89	mVpp
PEP-to-RMS Ratio	0	dB	OP1dB	18.7	dBm
P1dB Backoff Warning	0	dB	IP1dB	-15.5	dBm
Peak Backoff Warning	0	dB	Power Gain	35.2	dB
Min S/N for Demod	10	dB	Voltage Gain	35.2	dB
			Noise Figure	11.8	dB
			Output NSD	-127	dBm/Hz
			Output NSD	99.9	nV/rtHz
			Output Noise Floor	-57	dBm
			SNR	10.2	dB
			Input Rx Sensitivity	-82.2	dBm
			OIP3	29.63	dBm
			IIP3	-5.6	dBm
			IMD3 ((Pin-3dB) per tone)	-158.9	dBc
			SFDR	57.6	dB
			ACLR (est.)	-10	dB
			Pwr Consumption	0	W

Рис. 3. Результаты расчетов радиоприемного тракта в программе № 2
Fig. 3. The results of calculations of the radio receiving path in the program № 2

Сравнивая результаты расчетов, можно заметить, что параметры OIP3, IIP3, SFDR, Noise Floor различаются. В связи с этим целью данной статьи является разработка оригинальной программы на основе методики, предложенной в [2], которая по функционалу не уступает зарубежным аналогам и обладает рядом полезных для расчетов уточнений.

Среди недостатков программы № 1, разработанной Agilent, можно выделить: отсутствие элементной базы; при отсутствии параметра IIP3 предлагается использовать значение 100 дБм. Программа № 2, разработанная Analog Devices, имеет такие же недостатки, как и программа № 1, за исключением того, что имеется БД собственных микросхем.

На рис. 4 приведены результаты расчетов радиоприемного тракта в программе, разработанной автором статьи. Отличительными особенностями программы являются:

коэффициент шума структуры радиоприемного тракта, уточненный обратными потерями (Return Loss) и коэффициентом шума АЦП; расчет динамического диапазона по IP3; редактируемая база микросхем на основе файла csv. Предусмотрены опции для подсветки каскада с наибольшим вкладом в общий коэффициент шума и IP3.

Рис. 4. Результаты расчетов радиоприемного тракта в разработанной программе
Fig. 4. Results of calculations of the radio receiving path in the developed program

В связи с тем, что в разных литературных источниках, например, [3–5], по исследованию коэффициента шума АЦП представлены различные формулы (1)–(3), то целесообразно привести некоторые выкладки по расчету коэффициента шума и обосновать выбор формулы, которая и была реализована в разработанной программе.

$$NF_{ADC} = 20 \cdot \lg(V_{p-p} \cdot 10^6) + 59,25[\text{дБ}] - 6,02 \cdot N - 10 \cdot \lg(f_s), \quad (1)$$

где V_{p-p} – напряжение полной шкалы АЦП; N – количество разрядов АЦП; f_s – частота дискретизации АЦП.

$$NF_{ADC} = 10 \cdot \lg\left(\frac{V_{p-p}^2 [\text{В}]}{8 \cdot R_{IN} [\text{Ом}]} \cdot 1000\right) - \left(SNR_{ADC} [\text{дБ}] + 10 \cdot \lg\left(\frac{f_s [\text{Гц}]}{2}\right)\right) - kTB, \quad (2)$$

где R_{IN} – входное сопротивление АЦП; SNR_{ADC} – сигнал/шум АЦП; $kTB = -174 \text{ dBm/Hz}$.

$$NF_{ADC} = 10 \cdot \lg\left(1 + \frac{V_{p-p}^2 [\text{В}]}{2^{2 \cdot N} \cdot 6 \cdot f_s \cdot R_0 \cdot T \cdot \kappa}\right), \quad (3)$$

где R_0 – стандартное сопротивление 50 Ом; T – температура окружающей среды (293 К); $\kappa = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$.

Используя формулы (1)–(3) можно рассчитать коэффициент шума для АЦП и сравнить со значением, представленным в datasheet. Например, для ADS4149 фирмы Texas instr. коэффициент шума указан $NF_{ADC} = 25,1 \text{ дБ}$ при $V_{p-p} = 2 \text{ В}$, $R_{IN} = 200 \text{ Ом}$, $f_s = 250 \text{ MSPS}$, $SNR_{ADC} = 71,9 \text{ дБ}$, $N = 16 \text{ bit}$. Подставив данные значения в формулы (1)–(3), получим: $NF_{ADC1} = 4,974 \text{ дБ}$, $NF_{ADC2} = 25,1103 \text{ дБ}$ и $NF_{ADC3} = 6,1 \text{ дБ}$. Для АЦП AD9208 $NF_{ADC} = 24,5 \text{ дБ}$ по datasheet, при параметрах $V_{p-p} = 2,04 \text{ В}$, $R_{IN} = 200 \text{ Ом}$, $f_s = 3000 \text{ MSPS}$, $SNR_{ADC} = 61,8 \text{ дБ}$, $N = 14 \text{ bit}$. Подставив значения в формулы (1)–(3), получим: $NF_{ADC1} = 6,391 \text{ дБ}$, $NF_{ADC2} = 24,5905 \text{ дБ}$ и $NF_{ADC3} = 7,21 \text{ дБ}$. Как видно из вычислений, результат расчета по формуле (2) соответствует значению из datasheet, а вот остальные формулы вызывают сомнения в своей корректности.

В разработанной программе расчет IP3 производится по принципу суперпозиции, т. е. каскады, у которых не представлен данный параметр, объединяются с последующим каскадом/каскадами, для которых представлен данный параметр. Коэффициенты передач данных каскадов перемножаются по мощности (складываются в дБ) для данных блоков.

На рис. 5 представлен алгоритм разработанной программы для расчета системных характеристик радиоприемного тракта. При запуске программы у пользователя есть на выбор ввести данные либо выбор предложенных элементов из БД. После заполнения всех полей программа конвертирует данные и заполняет структуру. Из полученных данных производится анализ заполненных полей. Далее производится расчет коэффициента шума, IP3 и каскадов, вносящих максимальный вклад в общий коэффициент шума и IP3. При проверке структуры входных данных программа проверяет на заполнение поля «чувствительность», при ее отсутствии выдает предупреждение о «некорректном расчете и необходимости заполнить данное поле», иначе производит расчет ДД IP3. Программа также рассчитывает MDS, Noise floor, Output power/voltage, OP1/IP1 и общий коэффициент усиления тракта. Все полученные рассчитанные данные заполняются в выходной структуре, значения которой выводятся в приложении.

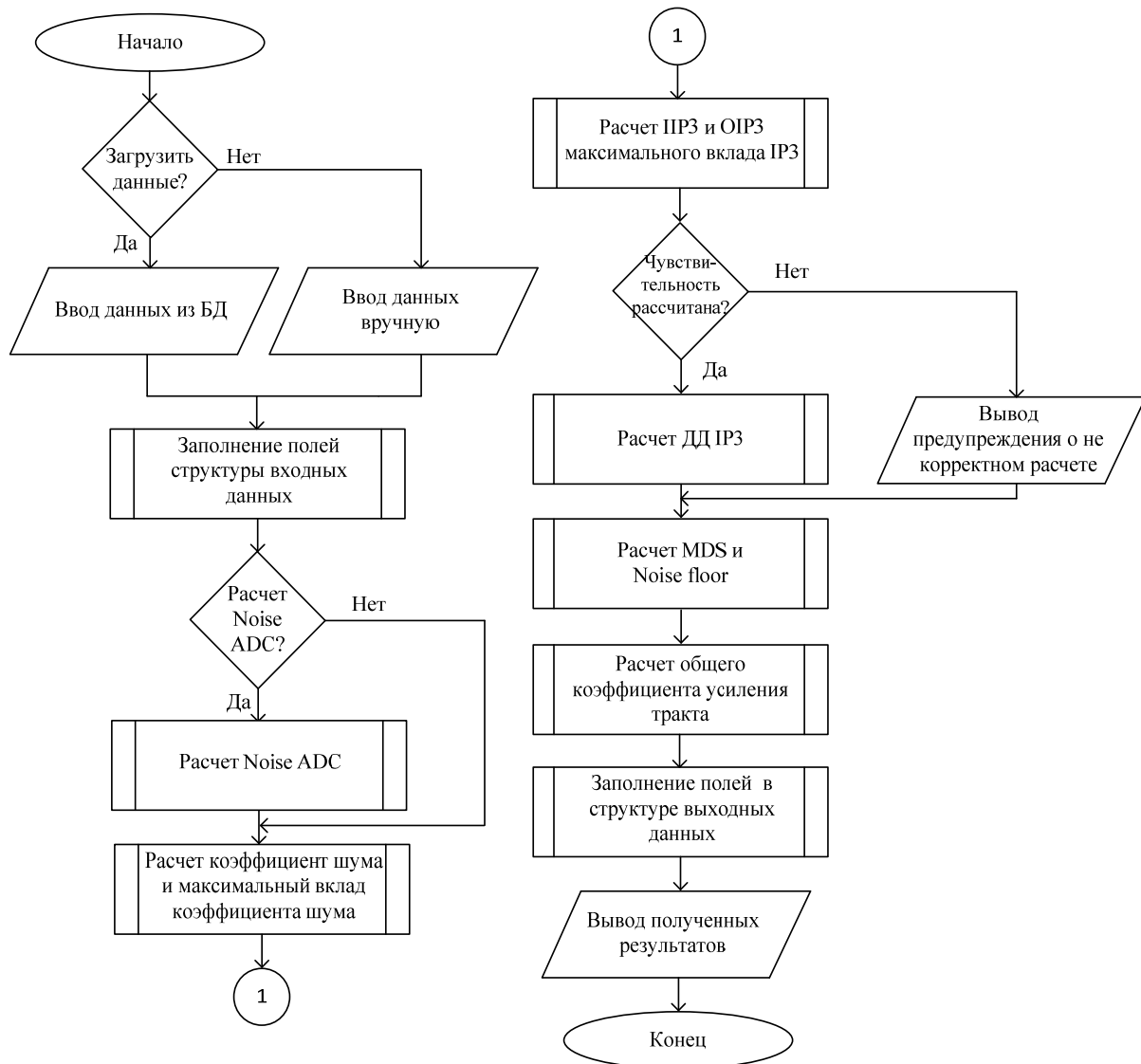


Рис. 5. Алгоритм разработанной программы для расчета системных характеристик радиоприемного тракта

Fig. 5. The algorithm of the developed program for calculating the system characteristics of the radio receiving path

Согласно представленному алгоритму был произведен расчет рассматриваемого в статье радиоприемного тракта.

Заключение

В статье представлен сравнительный анализ программ моделирования радиоприемных трактов на основе интегральных микросхем. По итогам моделирования и сравнения полученных результатов системных характеристик было принято решение о разработке оригинальной программы, которая может быть полезна разработчикам радиоприемных трактов как альтернативный аналог зарубежным. Данная программа обладает рядом особенностей: редактируемой БД; уточненным коэффициентом шума (с помощью коэффициента шума АЦП и обратных потерь); производит расчет динамического диапазона по интермодуляции третьего порядка. Данные особенности позволяют повысить точность расчетов и ускорить процесс вычисления системных характеристик радиоприемного тракта.

Список литературы

1. Архипенков Д.В., Забеньков И.И., Солонович С.С. Способы структурно-функциональной реализации сверхширокодиапазонных приемных трактов. *Доклады БГУИР*. 2020;18(7):23-30.
2. Клич С.М., Кривенко А.С., Носикова Г.Н. и др. *Проектирование радиоприемных устройств*. Под редакцией А.П. Сиверса. Москва: Советское радио; 1976.
3. Забеньков И.И., Исакович Н.Н., Жданов С.Л., Еньков Д.А., Забеньков А.И. Проектирование цифровых приемных устройств. *Доклады БГУИР*. 2006;1(13):44-54.
4. Воробьев О.В., Прасолов А.А. Сравнение методов повышения динамического диапазона АЦП цифровых радиоприемных устройств. *Труды учебных заведений связи*. 2018;4(2):61-68.
5. Neu T. Direct RF conversion: from vision to reality. *Texas Instruments*. 2015:1-8.

References

1. Arkhipenkov D.V., Zabenkov I.I., Salanovich S.S. [Methods of structural and functional implementation of ultra-wide range receiving paths]. *Doklady BGUIR = Doklady BGUIR*. 2020; 18(7):23-30. (In Russ.)
2. Klitsch S.M., Krivenko A.S., Novikova G.N. et al. [Design of radio receiving devices]. Edited by A.P. Sievers. Moscow: Sovetskoe Radio; 1976. (In Russ.)
3. Zabenkov I.I., Isakovich N.N., Zhdanov S.I., Yenkov D.A., Zabenkov A.I. [Digital receivers design]. *Doklady BGUIR = Doklady BGUIR*. 2006;1(13):44-54. (In Russ.)
4. Vorobiev O.V., Prasolov A.A. [Comparison of methods for increasing the dynamic range of ADC in digital radio receivers]. *Trudi uchebnih zavedenii = Trudi uchebnih zavedenii*. 2018;4(2):61-68.
5. Neu T. Direct RF conversion: from vision to reality. *Texas Instruments*. 2015:1-8.

Сведения об авторах

Архипенков Д.В., аспирант кафедры информационных радиотехнологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Information about the authors

Arkhipenkov D.V., Postgraduate student at the Department of Information Radiotechnologies of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь
г. Минск, ул. П. Бровки, 6,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники;
тел.: +375-29-260-74-76;
e-mail: rembolt94@gmail.com
Архипенков Дмитрий Владимирович

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka str., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
tel.: +375-29-260-74-76;
e-mail: rembolt94@gmail.com
Arkhipenkov Dmitry Vladimirovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2021-19-3-81-88>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.317.38

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ И МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЕЙ МОЩНОСТИ В ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ ОТ 37,5 ДО 178,6 ГГц

А.В. ГУСИНСКИЙ, М.М. КАСПЕРОВИЧ, В.А. БОГУШ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(Минск, Республика Беларусь)*

Поступила в редакцию 15 марта 2021

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2021

Аннотация. Для удовлетворения потребности в метрологическом обеспечении измерений мощности в диапазоне частот от 37,5 до 178,6 ГГц была разработана установка, предназначенная для проведения автоматизированных измерений, калибровок и проверок ваттметров с высокой точностью и возможностью адаптации под различные типы исследуемых устройств. В данной работе представлен состав, схема и общий принцип работы установки. Дано описание структуры изотермических калориметрических преобразователей автокомпенсационного типа с сухой нагрузкой и телом сравнения, являющихся основой установки. Представлены реализованные алгоритмы преобразования и замещения мощности СВЧ мощностью постоянного тока разработанных калориметрических ваттметров. Описаны меры, принятые на стадии изготовления, по минимизации источников неопределенности измерений. Для оценки точности измерения поглощаемой мощности составлена математическая модель коэффициента преобразования. В указанную математическую модель введены поправки, позволяющие повысить точность измерения воспроизводимой мощности миллиметрового диапазона длин волн. Приведены полученные основные метрологические и технические характеристики калориметрических ваттметров и устройств сличения установки. Полученные метрологические и технические характеристики соответствуют современному уровню эталонного оборудования.

Ключевые слова мощность, сверхвысокие частоты, калориметрический измеритель мощности, коэффициент преобразования, ваттметр, калибровка, поверка.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Гусинский А.В., Касперович М.М., Богуш В.А. Повышение точности и метрологическое обеспечение измерителей мощности в диапазоне частот от 37,5 до 178,6 ГГц. Доклады БГУИР. 2021; 19(3): 81-88.

IMPROVING THE ACCURACY AND METROLOGICAL SUPPORT OF POWER METERS IN THE FREQUENCY RANGE FROM 37.5 TO 178.6 GHz

ALEXANDER V. GUSINSKY, MARINA M. KASPEROVICH, VADIM A. BOGUSH

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 15 March 2021

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2021

Abstract. To satisfy the needs for metrological support of power measurements in the frequency range from 37.5 to 178.6 GHz, the device has been developed and designed for automated measurements, calibrations and verification of wattmeters with high accuracy and the ability to adapt to various types of devices under investigation. This paper presents the composition, diagram and general principle of the device. A description of the structure of isothermal calorimetric converters of autocompensation type with dry load and reference body, which are the basis of the device, is given. The implemented algorithms for converting and replacing microwave power with direct current power of the developed calorimetric wattmeters are presented. The measures taken at the manufacturing stage to minimize sources of measurement uncertainty are described. To assess the accuracy of measuring the absorbed power, a mathematical model of the conversion factor has been compiled. Corrections have been introduced into this mathematical model to improve the measurement accuracy of the reproducible microwave power. The obtained basic metrological and technical characteristics of calorimetric wattmeters and comparison equipment of the device are presented. The obtained metrological and technical characteristics correspond to the current level of standard equipment.

Keywords: power, ultrahigh frequencies, calorimetric power meter, conversion factor, wattmeter, calibration, verification.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Gusinsky A.V., Kasperovich M.M., Bogush V.A. Improving the accuracy and metrological support of power meters in the frequency range from 37.5 to 178.6 GHz. Doklady BGUIR. 2021; 19(3): 81-88.

Введение

В настоящее время измерители мощности СВЧ в Республике Беларусь обеспечены возможностью проведения поверки и калибровки в диапазоне частот до 37,5 ГГц (в том числе в диапазоне частот от 25,86 до 37,5 ГГц). Это достигается благодаря использованию Национального эталона единицы мощности, в создании которого авторами было принято участие, в частности, при разработке алгоритмов функционирования эталона и его программного обеспечения. Эталон позволяет проводить измерения воспроизводимой мощности электромагнитных колебаний в диапазоне от 0,1 до 100 мВт с доверительной относительной погрешностью воспроизведения мощности электромагнитных колебаний от 1,2 до 2,5 %.

Имеющиеся в эксплуатации измерители мощности в диапазоне частот от 37,5 ГГц не обеспечены поверкой и калибровкой из-за отсутствия эталонных средств измерений, что создает сложности в обеспечении точности и достоверности измерений. Для реализации операций поверки и калибровки необходимы рабочие эталоны, обладающие расширенной неопределенностью (погрешностью) измерения воспроизводимой мощности не более $\pm 2,0$ %.

Авторами была разработана структура построения установки для калибровки и проверки ваттметров в диапазоне частот от 37,5 до 178,6 ГГц на основе калориметрических преобразователей автокомпенсационного типа с сухой нагрузкой и телом сравнения.

Структурная схема и принцип действия установки для калибровки и поверки ваттметров

Установка представляет собой измерительную систему, имеющую в своем составе четыре аналогичных по принципу действия подсистемы оборудования для работы в четырех частотных диапазонах: 37,5 – 53,57 ГГц, 53,57 – 78,33 ГГц, 78,33 – 118,1 ГГц и 118,1 – 178,6 ГГц, которые соответствуют сечениям каналов волноводов 5,2×2,6 мм, 3,6×1,8 мм, 2,4×1,2 мм и 1,6×0,8 мм соответственно. Каждая подсистема включает в себя генератор сигналов, устройство сличения, эталонный калориметрический ваттметр, персональный компьютер, а также векторный анализатор цепей [1, 2]. Структурная схема разработанной установки приведена на рис. 1.

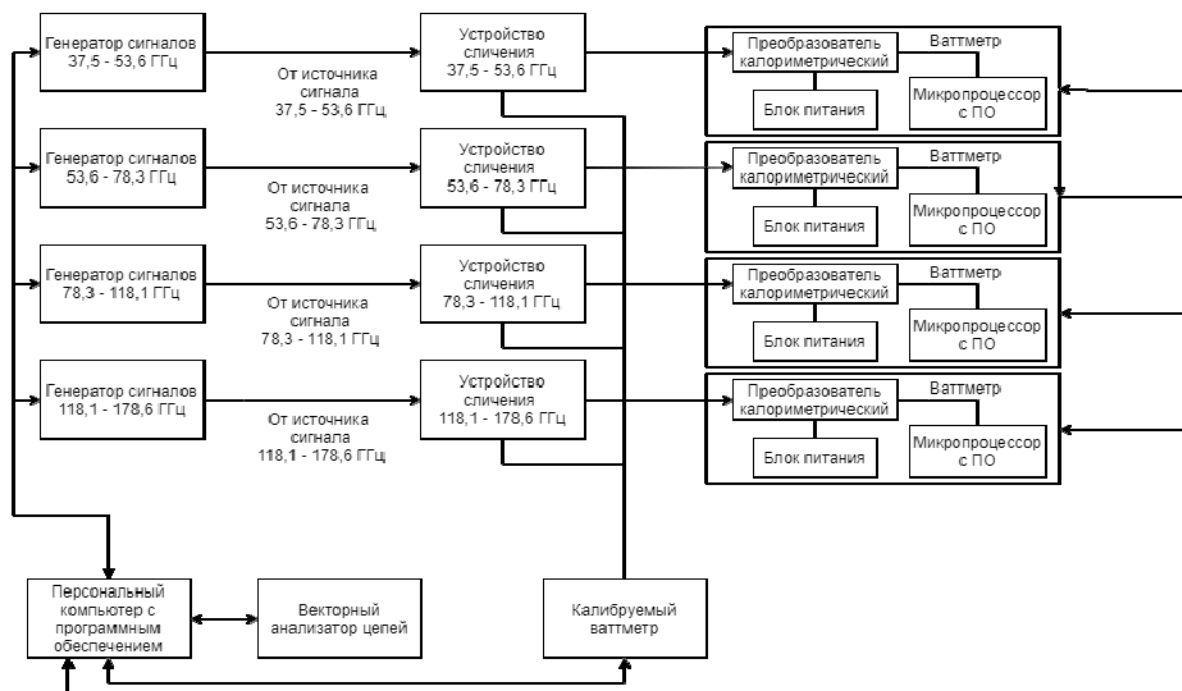


Рис. 1. Структурная схема установки для калибровки и поверки ваттметров
Fig. 1. Block diagram of the installation for calibration and verification of wattmeters

Генераторы сигналов являются источниками СВЧ-мощности, имеют цифровое управление всеми внутренними элементами, ответственными за установку параметров и режимов работы, а также цифровой отсчет устанавливаемых параметров.

Устройство сличения служит для передачи размера единицы мощности и состоит из вентилей и направленного ответвителя.

Векторные анализаторы цепей используются для уменьшения погрешности (неопределенности), вносимой рассогласованием в измерительном тракте.

Персональный компьютер с разработанным программным обеспечением (ПО) предназначен для автоматизации процесса проведения калибровки или проверки. ПО позволяет организовать измерительную систему из всех устройств, участвующих в процессе воспроизведения и передачи единицы мощности электромагнитного сигнала, т. е. полностью автоматизировать процессы калибровки и поверки. ПО имеет модульную структуру, что дает возможность адаптировать систему под любое исследуемое устройство.

Каждый эталонный калориметрический ваттметр состоит из выносного калориметрического преобразователя и блока управления и индикации (БУиИ). Все ваттметры эталонной установки для различных поддиапазонов миллиметрового диапазона длин волн имеют в своей основе единый физический принцип: замещение измеряемой мощности СВЧ известной мощностью постоянного тока. Калориметрические преобразователи представляют собой калориметрическую изотермическую систему автокомпенсационного типа с сухой нагрузкой и телом сравнения.

На БУиИ возложены следующие функции:

- управление процессом измерений;
- выработка сигналов, подаваемых на калориметрические преобразователи, прием и обработка сигналов, поступающих от преобразователей;
- математическая обработка данных в соответствии с принятым алгоритмом измерений;
- вычисление результатов измерений и передача их для отображения на дисплее блока, а также через интерфейсы USB или RS-232 на внешние устройства;
- выработка напряжений питания для элементов, узлов и устройств, находящихся в данном блоке и преобразователях.

Преобразователь содержит узел преобразования и блок предварительных усилений (рис. 2). В узле преобразования расположены два конструктивно идентичных тонкостенных волновода: измерительный и образцовый. Волноводы изготовлены из нержавеющей стали, обеспечивающей хорошую устойчивость коэффициента затухания во времени, обладают значительно меньшей теплопроводностью и большей механической прочностью, чем традиционно используемая медь. В оба волновода помещены объемные поглощающие клинья из материала на основе карбонильного железа. В части волновода, где размещены поглотители, для выравнивания теплового градиента и повышения теплоотдачи в термочувствительные элементы установлены накладки из медной фольги. Дополнительные термораспределительные элементы в виде медных перемычек позволяют выравнивать возникающий нежелательный тепловой градиент вдоль волноводов. Для уменьшения тепловых шумов системы плата блока предварительных усилителей размещена в непосредственной близости от термочувствительных элементов, но отделена экраном с низкой теплопроводностью.

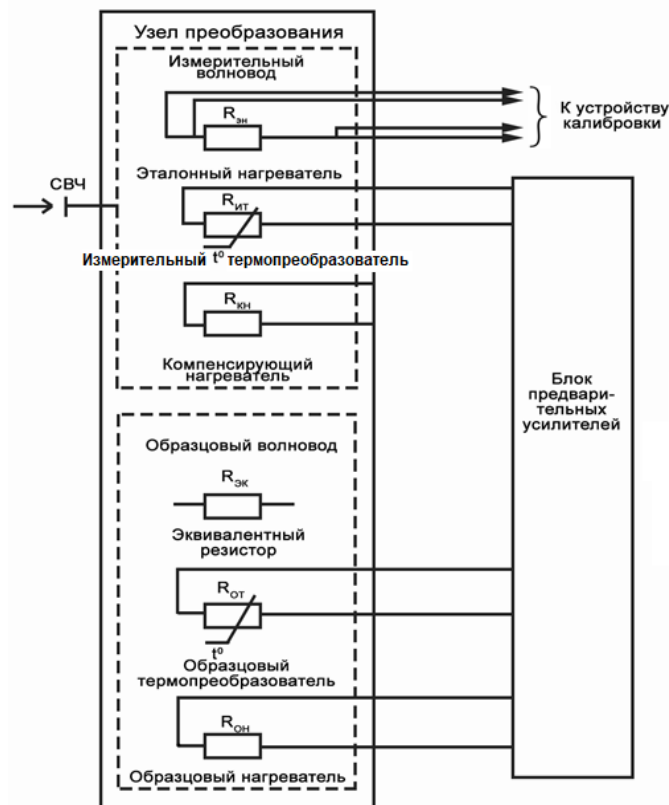


Рис. 2. Структурная схема калориметрического преобразователя
Fig. 2. The block diagram of a calorimetric transducer

Непосредственно на накладки каждого волновода установлены два нагревательных резистора и чувствительный измерительный платиновый терморезистор. Терморезисторы, размещенные на волноводах, включены в мостовую схему для исключения из результата измерения влияния собственной температуры системы. Для снижения влияния на результаты измерения неэквивалентности сопротивлений рабочего и опорного плеча мостовой схемы

используются равноразмерные проводники. Вся конструкция помещена в многослойный экранирующий корпус. Для тепловой развязки крепежные элементы выполнены из теплоизоляционного материала. Многослойные экраны заполнены перлитом, значительно снижающим тепловую конвекцию.

До подачи СВЧ мощности на вход преобразователя при помощи образцового нагревателя $R_{ОН}$, подключенного по четырехпроводной схеме, температура образцовой нагрузки (опорного волновода) смещается в точку, несколько превышающую ту, которая была бы вызвана максимальной измеряемой мощностью. При этом производится непрерывное измерение падения напряжения на образцовом элементе $R_{ОН}$ и вычисляется реально рассеиваемая мощность.

С БУиИ на образцовый $R_{ОТ}$ и измерительный $R_{ИТ}$ термопреобразователи подается заранее рассчитанное напряжение, необходимое для формирования эквивалентного рабочего тока на платиновых термопреобразователях $R_{ОТ}$ и $R_{ИТ}$. Мощность, рассеиваемая на $R_{ОТ}$ и $R_{ИТ}$, определяется значением поданного тока и дополнительно подогревает измерительный и образцовый волноводы. Два напряжения, сформированных с помощью рабочего тока платиновых терморезисторов $R_{ОТ}$ и $R_{ИТ}$, подаются на дифференциальный усилитель, на выходе которого формируется напряжение, пропорциональное разнице температур между образцовым и измерительным волноводом. Данное напряжение поступает на вход ошибки ПИД-регулятора.

Выход ПИД-регулятора управляет источником напряжения компенсирующего нагревателя $R_{КН}$. ПИД-регулятор осуществляет непрерывное изменение напряжения (и соответственно мощности нагрева компенсирующего нагревателя) для компенсации разницы температур между образцовым и измерительным волноводом и приводит разницу температур к нулю. Производится непрерывное измерение напряжения на компенсирующем нагревательном резисторе $R_{КН}$ и вычисление мощности, на нем рассеиваемой. При отсутствии СВЧ мощности калориметрическая система выдерживается в течение времени, необходимого до полной стабилизации системы. В таком состоянии мощность, выделяемая на платиновых терморезисторах $R_{КТ}$ и $R_{ОТ}$ при установившейся эквивалентной температуре, равна. Разность мощностей, рассеиваемых на нагревательных резисторах $R_{КН}$ и $R_{ОН}$, определяет мощность смещения $P_{см}$, которая запоминается в БУиИ как поправка и корректируется при помощи функции «установка нуля».

После подачи СВЧ мощности в измерительный волновод, происходит преобразование энергии СВЧ мощности в тепловую путем рассеяния в согласованной нагрузке. Рассеянная мощность дополнительно подогревает измерительный волновод и резисторы, размещенные на нем. В результате возникает разница температур, и петля ПИД-регулятора выходит из равновесия. Регулятор запускает процесс компенсации перегрева, уменьшая мощность, выделяемую на компенсирующем нагревателе $R_{КН}$. Через некоторое время система возвращается в состояние равновесия, мощность СВЧ, замещенная системой, вычисляется по формуле

$$P'_{СВЧ} = P_{обр} + P_{см} - P'_{комп}. \quad (1)$$

где $P'_{СВЧ}$ – мощность СВЧ, замещенная системой, Вт;

$P_{обр}$ – мощность на образцовом нагревательном резисторе, Вт;

$P_{см}$ – мощность смещения, Вт;

$P'_{комп}$ – мощность, рассеянная на компенсирующем нагревательном резисторе при поданной СВЧ мощности, Вт.

Однако не вся мощность СВЧ сигнала, поданного на вход калориметрической системы, передается в резистивную систему и замещается мощностью постоянного тока [3]. Измеряемая поглощаемая мощность СВЧ $P_{СВЧ}$, Вт, описывается как

$$P_{СВЧ} = \frac{P_{инд}}{K_{П}}, \quad (2)$$

где $P_{инд}$ – показание индикаторного устройства, Вт;

$K_{П}$ – коэффициент преобразования, отн. ед.

Точность измерения мощности калориметрическими ваттметрами

В общем виде коэффициент преобразования разработанных калориметрических преобразователей K_{Π} , отн. ед., может быть представлен как

$$K_{\Pi} = \frac{k_{\text{пт}}}{k_{\text{ч}}}, \quad (3)$$

где $k_{\text{пт}}$ – коэффициент преобразования по постоянному току, отн. ед.;
 $k_{\text{ч}}$ – частотно зависимый корректировочный коэффициент, отн. ед.

Коэффициент преобразования по постоянному току является корректировочным для показаний ваттметра при его калибровке мощностью постоянного тока. Определяется экспериментально, для чего используется эталонный нагреватель с точно известным сопротивлением $R_{\text{ЭН}}$. Коэффициент по постоянному току описывается выражением

$$k_{\text{пт}} = \frac{(P_{\text{инд}} + \delta_{\text{дет}} + \delta_{\text{ПИД}} + \delta_{\text{инд}}) \cdot (R_{\text{ЭН}} + \delta_R)}{U_{\text{к}}^2}, \quad (4)$$

где $P_{\text{инд}}$ – показание калибруемого блока, Вт;
 $\delta_{\text{дет}}$ – поправка на неточность детектирования мощности, Вт;
 $\delta_{\text{ПИД}}$ – поправка на неточность индикатора ПИД-регулятора, Вт;
 $\delta_{\text{инд}}$ – поправка из-за конечного разрешения показаний БУИИ, Вт;
 $R_{\text{ЭН}}$ – сопротивление эквивалентного нагревательного резистора, Ом;
 δ_R – поправка на показание средства измерения сопротивления, Ом.

При подаче СВЧ мощности на вход преобразователя основная часть мощности рассеивается в согласованной нагрузке в виде тепла. Часть мощности отражается от входа преобразователя, от согласованной нагрузки, часть рассеивается в волноводе в результате затухания. При этом затухание волны в волноводе вызвано поглощением СВЧ мощности в стенках волновода и превращением ее в теплоту, которая, в свою очередь, частично рассеивается в окружающую среду, ограниченную экраном, а частично, из-за теплопроводности, передается в калориметрическую систему и детектируется. Также имеет место неэквивалентность замещения, связанная с различным распределением тепловых источников при поглощении мощности СВЧ и при подаче замещающей мощности в нагреватель калориметра. Изменение градиента температуры приводит к изменению величины теплоотдачи калориметрической системы, так как теплоотдача в каждой точке зависит от температуры в этой точке. Поскольку контроль производится в точке размещения терморезистора, то мощность СВЧ и замещающая мощность постоянного тока могут быть неэквивалентны [4–6]. Для корректировки вышеперечисленных эффектов применяется частотно зависимый коэффициент, определяемый расчетно-экспериментальным методом на этапе изготовления, и вычисляется по формуле

$$k_{\text{ч}} = \frac{k'_{\text{нэ}} \cdot \left| \frac{1 - S_{22} \cdot \Gamma}{S_{21}} \right|^2}{1 - |\Gamma|^2 - \nu \cdot \alpha}, \quad (5)$$

где $k'_{\text{нэ}}$ – коэффициент неэквивалентности, учитывающий неэквивалентность замещения мощности СВЧ и мощности сигнала постоянного тока, отн. ед.;

S_{22} – коэффициент отражения отрезка волновода со стороны подключения к калориметрическому преобразователю, отн. ед.;

S_{21} – коэффициент передачи отрезка волновода, отн. ед.;

$|\Gamma|$ – модуль коэффициента отражения входа преобразователя, отн. ед.;

ν – коэффициент, учитывающий часть мощности рассеянной в волноводе на участке волновода между внутренней оболочкой и насадкой, содержащей поглощающую нагрузку, в виде потока тепла, отн. ед.;

α – коэффициент, характеризующий затухание мощности СВЧ, подводимой к калориметру, в передающем тракте, отн. ед.

Итоговые результаты определения метрологических характеристик разработанных и изготовленных ваттметров приведены в табл. 1. Характеристики устройств сличения приведены в табл. 2.

Таблица 1. Основные технические и метрологические характеристики калориметрических ваттметров
Table 1. Main technical and metrological characteristics of the developed calorimetric wattmeters

Диапазон частот, ГГц Frequency range, GHz	Диапазон измеряемых мощностей, мВт Measured power range, mW	КСВН*, не более VSWR**, no more	Суммарная стандартная неопределенность, % Total standard uncertainty, %	Нелинейность функции преобразования, % Conversion function nonlinearity, %
37,50 – 53,57	0,1–20	1,15	0,80	1,5
53,57 – 78,33	0,1–20	1,15	0,80	1,0
78,33 – 118,1	0,1–20	1,15	1,0	1,0
118,1 – 178,6	0,1–20	1,15	1,0	2,0

* Коэффициент стоячей волны по напряжению

** Voltage standing wave ratio

Таблица 2. Основные технические характеристики разработанных устройств сличения
Table 2. Main technical characteristics of the developed comparison devices

Диапазон частот, ГГц Frequency range, GHz	Среднее значение переходного ослабления, дБ Average value of transient attenuation, dB	Направленность, не менее, дБ Directivity, not less, dB	КСВН первичного канала, не более VSWR of primary channel, no more	КСВН вторичного канала, не более VSWR of secondary channel, not more
37,50 – 53,57	3,0 ± 1,0	35,0	1,1	1,15
53,57 – 78,33	3,0 ± 1,0	35,0	1,1	1,15
78,33 – 118,1	3,0 ± 1,0	35,0	1,15	1,15
118,1 – 178,6	3,0 ± 1,0	35,0	1,15	1,15

Заключение

Разработана автоматизированная установка для калибровки и проверки ваттметров в диапазоне частот от 37,5 до 178,6 ГГц с использованием калориметрических преобразователей автокомпенсационного типа с сухой нагрузкой и телом сравнения, которые вместе с устройством сличения образуют калибраторы мощности для различных поддиапазонов частот. Авторами проведен анализ источников неопределенностей измерений разработанных калориметрических ваттметров. Выбраны методы их уменьшения, определены составляющие, которые могут быть учтены в виде поправок. В результате за счет качественной реализации конструкции преобразователей и коррекции показаний с помощью поправочных коэффициентов получена высокая точность при измерении воспроизводимой мощности СВЧ, соответствующая мировому уровню эталонных измерителей мощности.

Список литературы

1. Гусинский А.В. Измерительный комплекс поверки и калибровки измерителей мощности в миллиметровом диапазоне длин волн. *Доклады БГУИР*. 2019;6(124):50-54.
2. Луферов А.Н., Гусинский А.В., Кострикин А.М., Ворошень А.В., Гурский С.С., Боженков В.В., Дерябина М.Ю., Гурский А.Л. Измерительный комплекс для поверки и калибровки измерителей мощности в диапазоне частот 78,33–118,1 ГГц. *Стандартизация*. 2014;3:50-53.
3. Билько М.И., Томашевский А.К. *Измерение мощности на СВЧ*. Москва: Радио и связь; 1986.
4. Ахизер А.Н., Данильченко В.П., Сенько А.П., Терехов М.В., Гордеев К.К., Калиберда Л.Г. Тержова В.П. Государственный специальный эталон единицы мощности электромагнитных колебаний в волноводных трактах в диапазоне частот 53,57 – 78,33 ГГц. *Измерительная техника*. 1979;7:3-5.
5. Бурак И.Ф., Гусинский А.В., Шаров Г.А., Ворошень А.В., Луферов А.Н. *Измерение мощности СВЧ в диапазоне сантиметровых и миллиметровых волн*. Москва: Горячая линия – Телеком; 2018.
6. Fantom A. *Radio Frequency and Microwave Power Measurement*. London: Peter Peregrinus Ltd.; 1990.

References

1. Gusinsky A.V. [Measuring complex of testing and calibration of power meters in the millimeter range of waves length]. *Doklady BGUIR = Doklady BGUIR*. 2019;6(124):50-54. (In Russ.)
2. Luferov A.N., Gusinsky A.V., Kostrikin A.M., Voroshen A.V., Gursky S.S., Bozhenkov V.V., Deryabina M.Yu., Gursky A.L. [Measuring complex for verification and calibration of power meters in the frequency range 78.33 – 118.1 GHz]. *Standardization*. 2014;3:50-53. (In Russ.)
3. Bilko M.I., Tomashevsky A.K. [*Microwave power measurement*]. Moscow: Radio i svjaz'; 1986. (In Russ.)
4. Akhiezer A.N., Danilchenko V.P., Senko A.P., Terekhov M.V., Gordeev K.K., Kaliberda L.G., Terzhova V.P. [State special standard for the unit of power of electromagnetic oscillations in waveguide paths in the frequency range 53.57 – 78.33 GHz]. *Izmeritel'naya tekhnika*. 1979;7:3-5. (In Russ.)
5. Burak I.F., Gusinsky A.V., Sharov G.A., Voroshen A.V., Luferov A.N. [*Measurement of microwave power in the range of centimeter and millimeter waves*]. Moscow: Goryachaya liniya – Telekom; 2018. (In Russ.)
6. Fantom A. *Radio Frequency and Microwave Power Measurement*. London: Peter Peregrinus Ltd.; 1990.

Вклад авторов

Гусинский А.В. разработал структуру установки, предложил пути повышения точности калориметрических преобразователей.

Касперович М.М. выполнила анализ данных, провела исследования параметров.

Богуш В.А. осуществил постановку целей и задач проведения исследований.

Authors' contribution

Gusinsky A.V. developed the structure of the installation, suggested ways to improve the accuracy of calorimetric converters.

Kasperovich M.M. performed data analysis, conducted parameter studies.

Bogush V.A. set goals and objectives for research.

Сведения об авторах

Гусинский А.В., к.т.н., доцент, начальник Центра 1.9 НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Касперович М.М., м.т.н., научный сотрудник Центра 1.9 НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Богуш В.А., д.ф.-м.н., профессор, ректор Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Information about the authors

Gusinsky A.V., PhD, Associate Professor, Head of the Center 1.9 of R&D Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Kasperovich M.M., M.Sc, Researcher of the Center 1.9 of R&D Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Bogush V.A., D.Sc., Professor, Rector of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники;
тел. +375-17-293-84-42;
e-mail: avggus@mail.ru
Гусинский Александр Владимирович

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka str., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronic;
tel. +375-17-293-84-42;
e-mail: avggus@mail.ru
Gusinsky Alexander Vladimirovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2021-19-3-89-95>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 004.056.55

ПРИМЕР ВНУТРЕННЕЙ ФУНКЦИИ ДЛЯ СХЕМЫ SPONGE, ПОСТРОЕННОЙ НА ОСНОВЕ ОБОБЩЕННОЙ МЕТОДОЛОГИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ AES

Р.М. ОСПАНОВ, Е.Н. СЕЙТКУЛОВ, Б.Б. ЕРГАЛИЕВА, Н.М. СИСЕНОВ

Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева,

НИИ Информационной безопасности и криптологии (г. Нур-Султан, Казахстан)

Поступила в редакцию 18 марта 2021

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2021

Аннотация. Целью данной статьи является построение внутренней функции, лежащей в основе схемы “Sponge” для построения криптографических хеш-функций. Внутренняя функция в схеме “Sponge” является преобразованием фиксированной длины или перестановкой, оперирующей с фиксированным числом битов, составляющих внутреннее состояние функции. Существуют различные конструктивные подходы к проектированию функции. Наиболее распространенным является подход, при котором используется перестановка, основанная на симметричном блочном алгоритме шифрования с константами в качестве ключа. В данной статье строится внутренняя функция с помощью обобщенной методологии проектирования AES. Эта методология позволяет легко проектировать блочные шифры для зашифровывания больших блоков открытого текста с помощью небольших компонентов, представляя обрабатываемые данные в виде многомерных массивов. Внутренняя функция является блочным шифром, который обрабатывает 2048 битов, представляемых в виде 9-мерного массива из 512 4-битовых элементов размера $2 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2$. Каждый раунд шифрования состоит из трех преобразований (S-блоки, линейное преобразование и перестановка), аналогичных трем раундовым преобразованиям AES SubBytes, MixColumns и ShiftRows. Построенная функция может быть использована в качестве внутренней функции в модифицированной схеме “Sponge” построения криптографических хеш-функций.

Ключевые слова: криптография, хеш-функция, Sponge, схема, модификация, шифрование, МДР код, S-блок, перестановка, линейное преобразование, AES.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарности. Данная работа выполнена при финансовой поддержке грантового финансирования МЦРИАП РК, № AP06851124.

Для цитирования. Оспанов Р.М., Сейткулов Е.Н., Ергалиева Б.Б., Сисенов Н.М. Пример внутренней функции для схемы Sponge, построенной на основе обобщенной методологии проектирования AES. Доклады БГУИР. 2021; 19(3): 89-95.

EXAMPLE OF INTERNAL FUNCTION FOR SPONGE SCHEME BUILT ON THE BASIS OF THE GENERALIZED AES DESIGN METHODOLOGY

RUSLAN M. OSPANOV, YERZHAN N. SEITKULOV, BANU B. YERGALIYEVA,
NURBEK M. SISENOV

*Gumilyov Eurasian National University,
Research Institute of Information Security and Cryptology (Nur-Sultan, Kazakhstan)*

Submitted 18 March 2021

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2021

Abstract. The purpose of this article is to construct an internal function underlying the “Sponge” scheme for constructing cryptographic hash functions. An internal function in the “Sponge” scheme is a fixed-length transformation or permutation that operates on a fixed number of bits that make up the internal state of the function. There are various constructive approaches to function design. The most common approach is to use a permutation based on a symmetric block encryption algorithm with constants as the key. This article builds an internal function using the generalized AES design methodology. This methodology makes it easy to design block ciphers to encrypt large blocks of plaintext with small components, representing the processed data as multidimensional arrays. The internal function is a block cipher that processes 2048 bits, represented as a 9-dimensional array of 512 4-bit elements with size $2 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2$. Each round of encryption consists of three transformations (S-blocks, linear transformation, and permutation), similar to the three round transformations of AES SubBytes, MixColumns, and ShiftRows. The constructed function can be used as an internal function in the modified “Sponge” scheme for constructing cryptographic hash functions.

Keywords: cryptography, hash function, Sponge, scheme, modification, encryption, MDS code, S-box, permutation, linear transformation, AES.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

Gratitude. This work was carried out with the financial support of grant funding from MDDIAI RK, No. AP06851124.

For citation. Ospanov R.M., Seitkulov Ye.N., Yergaliyeva B.B., Sisenov N.M. Example of internal function for Sponge scheme built on the basis of the generalized AES design methodology. Doklady BGUIR. 2021; 19(3): 89-95.

Введение

Схему “Sponge” [1] для построения криптографического алгоритма хеширования можно описать как последовательность следующих основных преобразований¹, в результате которых вычисляется хеш-значение заданного сообщения:

1. Дополнение (padding), при котором входное сообщение дополняется некоторым количеством битов так, чтобы длина дополненного сообщения была кратна заданной длине блока сообщения.

2. Инициализация состояния, при котором задается некоторое начальное значение состояния.

3. «Фаза впитывания» (absorbing phase), при котором сообщение сжимается итеративно.

4. «Фаза выжимания» (squeezing phase), при котором в результате требуется хеш-значение сообщения извлекается.

¹ Bertoni G., Daemen J., Peeters M., Van Assche G. *Cryptographic sponge functions, Version 0.1*. January 14, 2011. URL.: <https://keccak.team/files/CSF-0.1.pdf>.

Существующие различные модификации схемы отличаются друг от друга различными способами дополнения, вариантами реализации инициализации состояния. Но основным и важным компонентом схемы “Sponge” является внутренняя функция, являющаяся преобразованием фиксированной длины или перестановкой, оперирующей с фиксированным числом битов, составляющих внутреннее состояние функции.

Существуют различные конструктивные подходы к проектированию функции. Наиболее распространенным является подход, при котором используется перестановка, основанная на симметричном блочном алгоритме шифрования с константами в качестве ключа. Так, например, в алгоритме Кескак перестановка построена как итерационный блочный шифр, подобный Noekeon и Rijndael, в котором раундовые ключи заменяются некоторыми простыми раундовыми константами. В алгоритме SPONGENT используется перестановка, представляющая собой модифицированную версию блочного шифра PRESENT. В алгоритмах Luffa, JH используется перестановка, основанная на блочном шифре с константами в качестве ключа. В алгоритме PHOTON используется AES-подобная перестановка. В алгоритме Bash используется перестановка, относящаяся к классу симметричных криптографических схем LRX (Logical-Rotation-Xor). В алгоритме ACE используется перестановка, представляющая собой бесключевой блочный шифр Simeck с уменьшенным количеством раундов. В алгоритмах SPN-Hash, GAGE, KNOT, SYCON, Ascon-Hash, Coral используются перестановки, итеративно применяющие раундовые преобразования SPN вида (подстановочно-перестановочные сети). В алгоритмах Esch256, Esch384 (SPARKLE) используются перестановки, основанные на ARX подходе и тесно связанные с блочным шифром Sparx. В алгоритме Rijndael256-Hash используется перестановка, основанная на блочном шифре Rijndael256, в котором ключом является константа 0. В алгоритме SIV-TEM-PHOTON-hash используется перестановка, основанная на блочном шифре TEM-PHOTON с константами в качестве ключа. В алгоритме SKINNY используются перестановки, основанные на семействе настраиваемых (tweakable) блочных шифров. В алгоритмах PHOTON-Beetle, ORANGISH используется AES-подобная 256-битная перестановка PHOTON256. В данной статье рассматривается внутренняя функция, построенная на основе обобщенной методологии проектирования AES².

Обобщенная методология проектирования AES

Криптографический алгоритм блочного симметричного шифрования AES представляет 128-битный блок зашифровываемого открытого текста в виде двумерного байтового массива размера 4×4 и производит преобразования над отдельными байтами массива и независимыми строками и столбцами массива. Алгоритм построен с помощью подстановочно-перестановочной сети и использует МДР код для обеспечения диффузии. МДР код в AES применяется к столбцам массива в четных раундах и к строкам в нечетных раундах (нумерация раундов начинается с 0). В работе Hongjun Wu³ обобщили метод проектирования AES, представляя блок зашифровываемого открытого текста в виде d -мерного массива $\prod_{i=0}^{d-1} \alpha_i$ ($\alpha_i \geq 2$) m -битовых элементов ($m \in \mathbb{N}$), так чтобы было легко проектировать блочные шифры для зашифровывания больших блоков открытого текста с помощью небольших компонентов. МДР код применяется к ряду элементов $(r \bmod d)$ -го измерения в r -м раунде (нумерация раундов начинается с 0). Например, для зашифровывания 512-битного блока открытого текста можно увеличить размерность AES до 3, представляя входные данные в виде трехмерного байтового массива размера $4 \times 4 \times 4$. Тогда МДР код будет применяться к ряду байтов $(r \bmod 3)$ -го измерения в r -м раунде. А для зашифровывания 2048-битного блока открытого текста можно увеличить размерность до 4, представляя входные данные в виде четырехмерного байтового массива размера $4 \times 4 \times 4 \times 4$. И МДР код будет применяться к ряду байтов $(r \bmod 4)$ -го измерения в r -м раунде. На основе этой обобщенной методологии проектирования AES построена внутренняя функция

² Daeman J., Rijmen V. *AES Proposal: Rijndael*. 2003. URL.: <https://csrc.nist.gov/csrc/media/projects/cryptographic-standards-and-guidelines/documents/aes-development/rijndael-ammended.pdf>.

³ Hongjun Wu. *The Hash Function JH*. 2011. URL.: https://www3.ntu.edu.sg/home/wuhj/research/jh/jh_round3.pdf.

криптографической хеш-функции JH. Внутренняя функция в JH является блочным шифром, который обрабатывает 1024 битов, представляемых в виде 8-мерного массива из 256 4-битовых элементов размера $2 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2$. Раундовыми ключами шифра являются константы, сгенерированные с помощью 6-размерного блочного шифра. Каждый раунд состоит из трех преобразований: S-блоки, линейное преобразование и перестановка (подобны трем раундовым преобразованиям AES SubBytes, MixColumns и ShiftRows). Структура внутренней функции предполагает несколько вариантов путем изменения размерности. Например, в случае размерности 9 можно зашифровать 2048-битный блок. Далее рассмотрим детально конструкцию внутренней функции на основе обобщенной методологии проектирования AES с размерностью 9.

Структура функции

Внутренняя функция F итеративно использует S-блоки, линейное преобразование и перестановку, а также константы, определенные так же, как в [4]. Обрабатывается 2048 битов, представляемых в виде 9-мерного массива из 512 4-битовых элементов размера $2 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2$.

S-блоки.

Внутренняя функция F использует два 4-битовых S-блока S_0 и S_1 , заданные табл. 1, 2.

Таблица 1. Блоки S_0

x	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	A	B	C	D	E	F
$S_0(x)$	9	0	4	B	D	C	3	F	1	A	2	6	7	5	8	E

Таблица 2. Блоки S_1

x	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	A	B	C	D	E	F
$S_1(x)$	3	C	6	D	5	7	1	9	F	2	0	4	B	A	E	8

Линейное преобразование L .

Внутренняя функция F использует линейное преобразование L , реализующее (4, 2, 3) МДР код над $GF(2^4)$, где умножение определяется как умножение двоичных многочленов по модулю неприводимого многочлена $x^4 + x + 1$. L преобразовывает пару 4-битовых слов $X = (x_0, x_1, x_2, x_3)$, $Y = (y_0, y_1, y_2, y_3)$ следующим образом:

$$L(x_0, x_1, x_2, x_3, y_0, y_1, y_2, y_3) = (x_0 + (y_1 + x_2), x_1 + (y_2 + x_3 + x_0), x_2 + (y_3 + x_0) + (y_0 + x_1), x_3 + (y_0 + x_1), y_0 + x_1, y_1 + x_2, y_2 + x_3 + x_0, y_3 + x_0)$$

Перестановка P .

Внутренняя функция F использует перестановку P . P – перестановка 512 элементов, являющаяся композицией трех перестановок 512 элементов $P = p_0 \circ p_1 \circ p_2$.

p_0 – перестановка 512 элементов, определяемая следующим образом:

$$p_0(x_i) = x_i, i = 0, \dots, 255,$$

$$p_0(x_{2i+0}) = x_{2i+1}, i = 128, \dots, 255,$$

$$p_0(x_{2i+1}) = x_{2i+0}, i = 128, \dots, 255.$$

p_1 – перестановка 512 элементов, определяемая следующим образом:

$$p_1(x_i) = x_{2i}, i = 0, \dots, 255,$$

$$p_1(x_{i+256}) = x_{2i+1}, i = 0, \dots, 255.$$

p_2 – перестановка 512 элементов, определяемая следующим образом:

$$p_2(x_{4i+0}) = x_{4i+0}, i = 0, \dots, 127,$$

$$p_2(x_{4i+1}) = x_{4i+1}, i = 0, \dots, 127,$$

$$p_2(x_{4i+2}) = x_{4i+3}, i = 0, \dots, 127,$$

$$p_2(x_{4i+3}) = x_{4i+2}, i = 0, \dots, 127.$$

Раундовое преобразование R .

Внутренняя функция F использует раундовое преобразование R , выполняемое над 2048-битовыми словами. Раундовое преобразование $R(A, C)$ определяется на основе определенных выше S-блоков S_0 и S_1 , линейного преобразования L и перестановки P следующим образом.

Пусть $A = (a_0 \parallel a_1 \parallel \dots \parallel a_{511})$ – 2048-битовое слово, где a_i ($i = 0, \dots, 511$) – 4-битовые слова.

Пусть $C = (C_0 \parallel C_1 \parallel \dots \parallel C_{511})$ – 512-битовое слово.

1. К слову A применяются S -блоки S_0 и S_1 . Для каждого $i = 0, \dots, 511$ a_i заменяется на $a'_i = S_0(a_i)$, если $C_i = 0$, или a_i заменяется на $a'_i = S_1(a_i)$, если $C_i = 1$.

2. К полученному слову $A' = (a'_0 \parallel a'_1 \parallel \dots \parallel a'_{511})$ применяется линейное преобразование L . Для каждого $i = 0, \dots, 255$ пара 4-битовых слов (a'_{2i}, a'_{2i+1}) заменяется на $(a''_{2i}, a''_{2i+1}) = L(a'_{2i}, a'_{2i+1})$.

3. К полученному слову $A'' = (a''_0 \parallel a''_1 \parallel \dots \parallel a''_{511})$ применяется перестановка P .

Раундовые константы.

Внутренняя функция F использует в качестве раундовых констант 512-битовые слова $C_r, r = 0, 1, \dots, 47$, определяемые следующим образом.

C_0 – целая часть числа $(\sqrt{2} - 1) \times 2^{512}$.

Для генерации остальных констант используются преобразование P_0 и перестановка P_0 .

P_0 – перестановка 128 элементов, аналогичная перестановке P , является композицией трех перестановок 128 элементов $P_0 = p'_0 \circ p'_1 \circ p'_2$.

p'_0 – перестановка 128 элементов, определяемая следующим образом:

$p'_0(x_i) = x_i, i = 0, \dots, 63,$

$p'_0(x_{2i+0}) = x_{2i+1}, i = 32, \dots, 63,$

$p'_0(x_{2i+1}) = x_{2i+0}, i = 32, \dots, 63.$

p'_1 – перестановка 128 элементов, определяемая следующим образом:

$p'_1(x_i) = x_{2i}, i = 0, \dots, 63,$

$p'_1(x_{i+64}) = x_{2i+1}, i = 0, \dots, 63.$

p'_2 – перестановка 128 элементов, определяемая следующим образом:

$p'_2(x_{4i+0}) = x_{4i+0}, i = 0, \dots, 31,$

$p'_2(x_{4i+1}) = x_{4i+1}, i = 0, \dots, 31,$

$p'_2(x_{4i+2}) = x_{4i+3}, i = 0, \dots, 31,$

$p'_2(x_{4i+3}) = x_{4i+2}, i = 0, \dots, 31.$

R_0 – преобразование, выполняемое над 512-битовыми словами, аналогичное преобразованию R . R_0 определяется следующим образом.

Пусть $A = (a_0 \parallel a_1 \parallel \dots \parallel a_{127})$ – 512-битовое слово, где a_i ($i = 0, \dots, 127$) – 4-битовые слова.

1. К слову A применяется S -блок S_0 . Для каждого $i = 0, \dots, 127$ a_i заменяется на $a'_i = S_0(a_i)$.

2. К полученному слову $A' = (a'_0 \parallel a'_1 \parallel \dots \parallel a'_{127})$ применяется линейное преобразование L . Для каждого $i = 0, \dots, 63$ пара 4-битовых слов (a'_{2i}, a'_{2i+1}) заменяется на $(a''_{2i}, a''_{2i+1}) = L(a'_{2i}, a'_{2i+1})$.

3. К полученному слову $A'' = (a''_0 \parallel a''_1 \parallel \dots \parallel a''_{127})$ применяется перестановка P_0 .

Константы $C_r = R_0(C_{r-1}), r = 1, 2, \dots, 47$.

Внутренняя функция F выполняет над входными битами следующие преобразования.

1. Входные 2048 битов $A = (a_0 \parallel a_1 \parallel \dots \parallel a_{2047})$ группируются по 4 бита. Получается 512 4-битовых слов (512 полубайтов) $Q_0 = (q_{0,0} \parallel q_{0,1} \parallel \dots \parallel q_{0,511})$, где

$q_{0,2i} = a_i \parallel a_{i+512} \parallel a_{i+1024} \parallel a_{i+1536}, i = 0, \dots, 255,$

$q_{0,2i+1} = a_{i+256} \parallel a_{i+768} \parallel a_{i+1280} \parallel a_{i+1792}, i = 0, \dots, 255.$

2. Далее 48 раз применяется раундовое преобразование R с раундовыми константами C_r , получая в результате $Q_{r+1} = R(Q_r, C_r), r = 0, 1, \dots, 47$.

3. Полученные в результате последнего раунда 512 4-битовых слов (512 полубайтов) $Q_{48} = (q_{48,0} \parallel q_{48,1} \parallel \dots \parallel q_{48,511})$ разгруппировываются. Получаются выходные 2048 битов $B = (b_0 \parallel b_1 \parallel \dots \parallel b_{2047})$, где

$b_i \parallel b_{i+512} \parallel b_{i+1024} \parallel b_{i+1536} = q_{48,2i}, i = 0, \dots, 255,$

$b_{i+256} \parallel b_{i+768} \parallel b_{i+1280} \parallel b_{i+1792} = q_{48,2i+1}, i = 0, \dots, 255.$

Заключение

В данной статье рассмотрен новый вариант внутренней функции, лежащей в основе перспективной современной схемы построения криптографических хеш-функций “Sponge” («криптографическая губка»). Рассматриваемый пример внутренней функции построен на основе обобщенной методологии проектирования AES. Внутренняя функция является блочным шифром, который обрабатывает 2048 битов, представляемых в виде 9-мерного массива из 512 4-битовых элементов размера $2 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2$. Каждый раунд шифрования состоит из трех преобразований (S-блоки, линейное преобразование и перестановка), аналогичных трем раундовым преобразованиям AES SubBytes, MixColumns и ShiftRows. Построенная функция может быть использована в качестве внутренней функции из заданного множества внутренних функций в модифицированной схеме “Sponge” построения криптографических хеш-функций [2–5].

Список литературы

1. Bertoni G., Daemen J., Peeters M., Van Assche G. *Sponge Functions*. ECRYPT Hash Workshop, 2007.
2. Оспанов Р.М., Сейткулов Е.Н., Арапов Н.К., Ергалиева Б.Б. Модификация схемы построения криптографических хеш-функций SPONGE. *Вестник КазННТУ*. 2020;5(141):520-525.
3. Оспанов Р.М., Сейткулов Е.Н. Киберщит: О различных реализациях схемы построения криптографических хеш-функций “Sponge”. *Материалы Международной научно-практической Web-конференции «Военно-техническое обеспечение деятельности вооруженных сил: мировой опыт и тенденции развития»*. Нур-Султан: Из-во НУО; 2020: 305-308.
4. Оспанов Р.М., Сейткулов Е.Н. О способах проектирования внутренней функции для схемы построения криптографических хеш-функций SPONGE. *Вестник КазННТУ*. 2020;5(141):645-650.
5. Оспанов Р.М. Киберщит: О внутренней функции в схеме построения криптографических хеш-функций “Sponge”. *Материалы Международной научно-практической Web-конференции «Военно-техническое обеспечение деятельности вооруженных сил: мировой опыт и тенденции развития»*. Нур-Султан: Из-во НУО; 2020: 351-353.

References

1. Bertoni G., Daemen J., Peeters M., Van Assche G. *Sponge Functions*. ECRYPT Hash Workshop, 2007.
2. Ospanov R.M., Seitkulov Ye.N., Arapov N.K., Yergaliev B.B. [Modification of the scheme for constructing cryptographic hash functions SPONGE]. *Bulletin of KazNTU*. 2020;5(141):520-525. (In Russ.)
3. Ospanov R.M., Seitkulov Ye.N. [Cybershield: On various implementations of the “Sponge” cryptographic hash function construction scheme]. *Materials of the International Scientific and Practical Web-Conference “Military-technical support of the armed forces: world experience and development trends”*. Nur-Sultan: From NUD; 2020: 305-308. (In Russ.)
4. Ospanov R.M., Seitkulov Ye.N. [On the ways of designing an internal function for the scheme for constructing cryptographic hash functions SPONGE]. *Bulletin of KazNRTU*. 2020;5(141):645-650 (In Russ.)
5. Ospanov R.M. [Cybershield: On the internal function in the scheme for constructing cryptographic hash functions “Sponge”]. *Materials of the International Scientific and Practical Web-conference “Military-technical support of the activities of the armed forces: world experience and development trends”*, Nur-Sultan: From NUD. 2020: 351-353. (In Russ.)

Вклад авторов

Оспанов Р.М. осуществил постановку задачи для проведения исследования, подготовил рукопись статьи.

Сейткулов Е.Н. определил цели исследования, разработал общую концепцию.

Ергалиева Б.Б. разработала обобщенную методологию проектирования AES.

Сисенов Н.М. описал структуру внутренней функции F , подготовил заключение.

Authors' contribution

Ospanov R.M. carried out the formulation of the problem for the study, prepared the manuscript of the article.

Seitkulov Ye.N. defined the objectives of the study, the development of a general concept.

Yergalieva B.B. developed a generic AES design methodology.

Sisenov N.M. described the structure of the internal function F, prepared the conclusion of the article.

Сведения об авторах

Оспанов Р.М., научный сотрудник НИИ ИБиК ЕНУ им. Л.Н. Гумилева.

Сейткулов Е.Н., к.ф.-м.н., профессор, директор НИИ ИБиК ЕНУ им. Л.Н. Гумилева.

Ергалиева Б.Б., младший научный сотрудник НИИ ИБиК ЕНУ им. Л.Н. Гумилева.

Сисенов Н.М., младший научный сотрудник НИИ ИБиК ЕНУ им. Л.Н. Гумилева.

Information about the authors

Ospanov R.M., Researcher of the Institute IS&C at the Gumilyov ENU.

Seitkulov Ye.N., PhD, Professor, Director of the Institute IS&C at the Gumilyov ENU.

Yergalieva B.B., Junior Researcher of the Institute IS&C at the Gumilyov ENU.

Sisenov N.M., Junior Researcher of the Institute IS&C at the Gumilyov ENU.

Адрес для корреспонденции

010000, Республика Казахстан, г. Нур-Султан,
ЕНУ им. Л.Н. Гумилева;
тел.: +7-7172-70-95-00;
e-mail: erj@mail.ru
Сейткулов Ержан Нураханович

Address for correspondence

010000, Republic of Kazakhstan, Nur-Sultan,
Gumilyov ENU;
tel.: +7-7172-70-95-00;
e-mail: erj@mail.ru
Seitkulov Yerzhan Nurakhanovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2021-19-3-96-103>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 654.939

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ОПЫТНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ КОМПЛЕКСА ОХРАНЫ ПРОТЯЖЕННЫХ ПЕРИМЕТРОВ ВМ 8018

Л.Л. УТИН¹, А.В. ПАВЛОВСКИЙ², А.А. ОЛЬХОВИК², А.В. МАКАТЕРЧИК¹

¹Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)

²Научно-исследовательский институт электронных вычислительных машин
(г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 25 марта 2021

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2021

Аннотация. В последние годы технические средства охраны периметра получают все большее распространение, что обусловлено их возрастающей эффективностью защиты от несанкционированного доступа злоумышленников к охраняемым объектам. Высокая конкуренция производителей подобных средств привела к появлению множества технических решений средств обнаружения (СО), работающих на разных физических принципах и предназначенных для решения специфических задач. Основное назначение СО – обеспечить обнаружение фактов проникновения нарушителей через охраняемое препятствие. Учитывая, что способы проникновения нарушителей разнообразны (разрушение ограждений, перелаз через ограждение, подкоп под ограждение и т. д.), создание эффективной системы охраны с использованием только одного типа СО является проблемной задачей. При этом автономное использование множества типов СО приводит к тому, что в дежурном помещении будет находиться большое количество технических средств, которые увеличивают не только временные и финансовые затраты на их обслуживание, но и повышают требования к компетенции дежурного персонала. С целью разрешения вышеуказанных проблем в НИИ ЭВМ разработан комплекс ВМ 8018, предназначенный для автоматизации процесса охраны протяженных периметров объектов различного назначения, в том числе участков государственной границы, периметров и помещений подразделений границы, протяженных периметров промышленных и военных объектов, а также управления исполнительными устройствами (электроприводами ворот и калиток, освещением и т. п.), ведения видеонаблюдения.

Ключевые слова: средства обнаружения, телеметрическая информация, журналы событий, сбор и обработка информации, падение напряжения.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Утин Л.Л., Павловский А.В., Ольховик А.А., Макатерчик А.В. Анализ результатов опытной эксплуатации комплекса охраны протяженных периметров ВМ 8018. Доклады БГУИР. 2021; 19(3): 96-103.

ANALYSIS RESULTS OF EXPERIMENTAL OPERATION OF THE PROTECTION COMPLEX OF LONG PERIMETERS VM 8018

LEONID L. UTIN¹, ALIAKSANDR V. PAVLOVSKY², ANATOLIY A. OLKHOVIK²,
ALIAKSANDR V. MAKATSERCHYK¹

¹*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)*

²*Research Institute of Electronic Computers (Minsk, Republic of Belarus)*

Submitted 25 March 2021

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2021

Abstract. In recent years, technical means of perimeter security are becoming more widespread, which is due to their increasing efficiency of protection from unauthorized access by intruders to protected facilities. The high competition of manufacturers of such means has led to the emergence of a variety of technical solutions for detection means (hereinafter referred to as DT) operating on different physical principles and designed to solve specific problems. The main purpose of the DT is to ensure the detection of the facts of intruders' penetration through the guarded obstacle. Considering that the methods of intruders' penetration are varied (destruction of fences, climbing over the fence, digging under the fence, etc.), the creation of an effective security system using only one type of DT is a problematic task. At the same time, the autonomous use of many types of DT leads to the fact that there will be a large number of technical means in the duty room, which increase not only the time and financial costs for their maintenance, but also increase the requirements for the competence of the duty personnel. Research Institute of Electronic Computers has developed the complex VM 8018, designed to automate the process of protecting extended perimeters of objects for various purposes, including sections of the state border, perimeters and premises of outposts, extended perimeters of industrial and military facilities, as well as controlling executive devices (electric drives for gates and gates, lighting etc.), video surveillance.

Keywords: detection tools, telemetric information, event logs, information collection and processing, voltage drop.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Utin L.L., Pavlovsky A.V., Olkhovik A.A., Makatserchyk A.V. Analysis results of experimental operation of the protection complex of long perimeters VM 8018. Doklady BGUIR. 2021; 19(3): 96-103.

Введение

Исторически внедрение технических средств для охраны участков государственной границы начало осуществляться достаточно давно. Так, принятая в 1979 году сигнализационная система С-175 «Гардина» позволяла контролировать до 40 участков рубежа по 500 м, разделенных на два фланга общей протяженностью до 20 км. По мере развития технологий совершенствовались системы охраны периметра. В 1985 году был принят комплекс КС-185, который и в настоящее время используется для охраны государственной границы¹.

Повышение спроса на системы охраны, аналогичные рассмотренным выше, способствовало появлению определенной конкуренции у производителей соответствующего оборудования [1]. В настоящее время известно множество компаний, которые занимаются монтажом технических средств охраны, однако поставляемое ими оборудование, как правило, является разработкой иностранных компаний. Несмотря на кажущуюся низкую стоимость предлагаемого оборудования, допуск таких компаний для монтажа систем охраны государственной границы может иметь негативные последствия для государства [2].

¹Терещенко В.В. Деятельность советских государственных и военных органов по созданию и совершенствованию окружной системы пограничных войск (1918–1991 гг.): дис. ... доктора исторических наук. 2015. Tereshchenko V.V. The activities of the Soviet state and military bodies to create and improve the district system of border troops (1918–1991): dis. for the degree of Doctor of Historical Sciences. 2015.

Учитывая вышеизложенное, коллективом разработчиков, имеющих многолетний опыт в создании защищенных ЭВМ, было решено создать первую в Республике Беларусь систему охраны протяженных периметров. Основные усилия при разработке элементов комплекса были направлены на решение задач по обеспечению:

- технических характеристик, соответствующих аналогичным системам, производимым в других государствах;
- совместимости с элементами устаревших комплексов КС-175, КС-185, смонтированных на государственной границе (сигнализационные заграждения, кабельные линии связи, ворота и калитки, замковые устройства);
- возможности оповещения дежурного персонала в режиме реального времени при наступлении событий, связанных со срабатыванием средств обнаружения, пропаданием каналов связи с удаленными блоками, возникновением неисправности средств обнаружения и (или) соединительных линий, а также попытках несанкционированного доступа к оборудованию комплекса;
- защиты информации обо всех событиях, наступивших при функционировании комплекса, как от внешних, так и от внутренних нарушителей [3].

Методика проведения исследования

Для проверки возможностей разработанного комплекса ВМ 8018 была осуществлена его опытная эксплуатация. Учитывая, что эксплуатация осуществлялась за счет финансовых средств организации-изготовителя, испытанию подвергался один образец комплекса, комплектация и назначение элементов которого приведены в табл. 1.

Таблица 1. Состав и назначение элементов комплекса ВМ 8018, используемого на испытании
Table 1. The composition and purpose of the elements of the complex VM 8018 used for testing

Состав оборудования комплекса ВМ8018 Composition of the equipment of the complex VM 8018	Назначение Appointment	Кол-во, шт. Quantity, pc.
Блок обработки информации (БОИ) Information processing unit (IPU)	<ul style="list-style-type: none"> – формирование напряжения для электропитания БЛ; – получение от БЛ, обработка, отображение и передача на АРМ информации о состоянии СО; – получение, отображение и передача на АРМ телеметрической информации от БЛ; – формирование и передача БЛ команд управления исполнительными устройствами (ИУ); – конфигурирование БЛ; – передача информации о сработавших СО в блок световой индикации и блок звуковой сигнализации; – управление внешними звуковыми и световыми устройствами; – ведение и сохранение в энергонезависимой памяти журнала событий 	1
Блок линейный (БЛ) Linear block (LB)	<ul style="list-style-type: none"> – формирование напряжений электропитания СО; – сбор информации о состоянии СО; – выдача сигнала контроля исправности СО; – управление ИУ; – обмен информацией с БОИ 	5
Автоматизированное рабочее место (АРМ) Automated workplace (AWP)	<ul style="list-style-type: none"> – прием и отображение информации от БОИ о состоянии СО; – управление (через БОИ и БЛ) ИУ; – документирование произошедших событий; – диагностика составных частей комплекса; – составление отчетов о произошедших событиях; – сохранение видеoinформации, поступающей от СВН 	1
Система видеонаблюдения (СВН) CCTV system	<ul style="list-style-type: none"> – наблюдение и видеозапись событий (совместно с АРМ) на одном или нескольких охраняемых участках 	1

Окончание таблицы 1
End of table 1

Блок световой индикации (БСИ) Light indication unit (LIU)	– отображение номера охраняемого участка, откуда поступил сигнал тревоги (неисправности)	1
Блок звуковой сигнализации (БЗС) Sound alarm unit (SAU)	– звуковое дублирование сигнала тревоги (возникновения неисправности)	1
Средство обнаружения типа «СКАТ» Detection tool (DT) type “SKAT”	– охрана периметров объектов с использованием проволочного ограждения, при замыкании или обрыве которого выдается сигнал тревоги	4
Средство обнаружения типа «Разряд» Means for detecting the type of “Discharge”	– контроль состояния сигнализационного ограждения, представляющего собой полотно из двух нитей колючей проволоки, растянутых на двух изолированных флангах	2

Схема подключения элементов комплекса и нагрузки представлена на рис. 1.

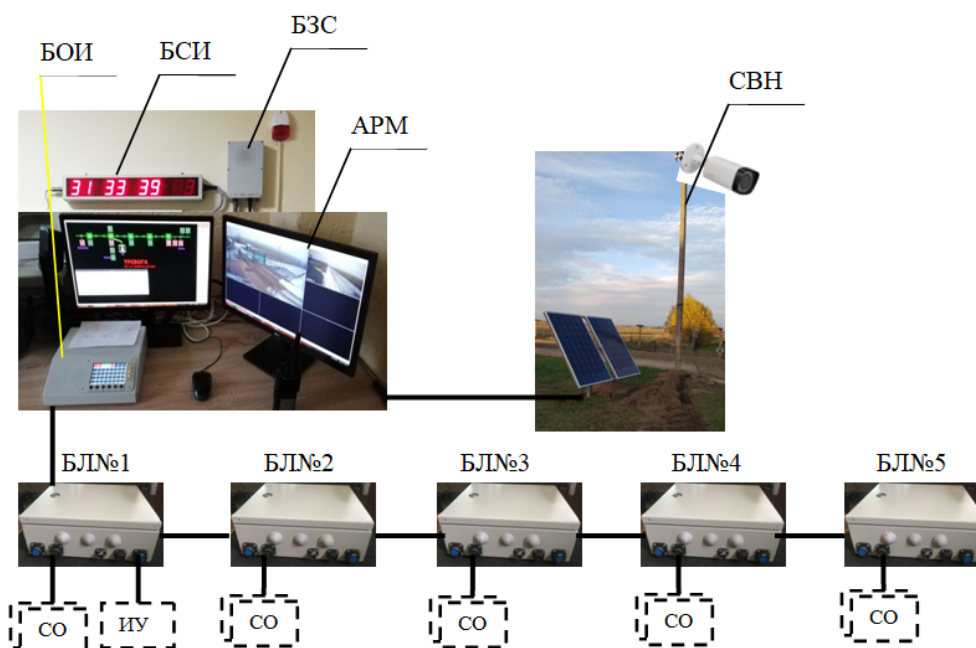


Рис. 1. Условия проведения испытания комплекса VM 8018
Fig. 1. Conditions for testing the complex VM 8018

Для проверки реальных характеристик комплекса VM 8018 в ходе опытной эксплуатации осуществлялось измерение напряжения на входах блоков линейных. При этом проводилось два эксперимента. Условия проведения экспериментов представлены в табл. 2.

Таблица 2. Условия проведения опытной эксплуатации комплекса VM 8018
Table 2. Conditions for trial operation of the complex VM 8018

Условный номер блоков линейных Conditional line block number	Расстояние до БЛ при проведении эксперимента, м Distance to LB during the experiment, m		Тип СО, подключенного к БЛ при проведении эксперимента Type of DT connected to LB during the experiment		Напряжение на входе БЛ при проведении эксперимента, В Voltage at the input of LB during the experiment, V	
	№ 1	№ 2	№ 1	№ 2	№ 1	№ 2
1	12000	2100	ИУ	«СКАТ»	105,1	86,5
2	350	800	«СКАТ»	«Разряд»	103,6	86,2
3	1000	800	«СКАТ»	«Разряд»	102,2	85,5
4	1000	800	«СКАТ»	«СКАТ»	101,2	83,3
5	1000	800	«СКАТ»	«СКАТ»	100,7	82,9

В ходе испытаний были проанализированы возможности оповещения дежурного персонала о наступлении событий, связанных со срабатыванием СО, пропаданием каналов связи с удаленными блоками, возникновением неисправности СО и (или) соединительных линий, а также попытках несанкционированного доступа к оборудованию комплекса [4].

В результате было установлено, что формирование сигнала «ТРЕВОГА» осуществляется за время:

- 3 с – при срабатывании датчика открытия корпуса БЛ;
- от 3,2 до 4 с – при поступлении на БЛ сигнала о срабатывании СО;
- 4 с – при отсутствии на БЛ сигнала от СО, характеризующего неисправность (повреждение) средства или соединительной линии;
- 4 с – при отсутствии на блоке обработки информации сигналов от БЛ.

Полученные данные подтверждают, что комплекс ВМ 8018 позволяет в реальном масштабе времени осуществлять контроль состояния средств обнаружения, исправность каналов связи и соединительных линий вдоль охраняемого участка границы.

В ходе опытной эксплуатации, из-за ограничений по количеству БЛ, не удалось натурным экспериментом подтвердить или опровергнуть заявленную возможность обработки информации, поступающей от СО, размещенных по периметру до 40 км².

С целью доказательства данной характеристики были разработаны математическая модель, алгоритмы ее реализации и компьютерная программа расчета падения напряжения на выходе блока обработки информации, учитывающая следующие факторы:

- удаление первого БЛ от БОИ;
- расстояния между БЛ;
- тип средств обнаружения, подключаемых к БЛ.

Проверка достоверности результатов, получаемых с использованием компьютерной программы, осуществлялась путем моделирования условий проведения двух экспериментов в ходе опытной эксплуатации комплекса (табл. 2). Результаты моделирования представлены в табл. 3.

Таблица 3. Результаты тестирования комплекса
Table 3. The test results of a package

Условный номер БЛ Conditional LB number	Напряжение на входе БЛ при проведении эксперимента, В Voltage at the LB input during the experiment, V		Напряжение на входе БЛ, полученное в ходе моделирования, В Voltage at the LB input obtained during the simulation, V	
	№ 1	№ 2	№ 1	№ 2
1	105,1	86,5	103,8	85,9
2	103,6	86,2	102,6	85,4
3	102,2	85,5	101,6	84,1
4	101,2	83,3	101	83,3
5	100,7	82,9	100,7	82,9

Из табл. 3 видно, что результаты расчетов падения напряжения на входе БЛ, полученные с помощью разработанной компьютерной программы, совпадают с реальными напряжениями, измеренными в ходе опытной эксплуатации комплекса ВМ 8018. Небольшие погрешности в получении результатов могут быть объяснены особенностями характеристик кабеля, проложенного между элементами комплекса (наличие скруток, окисление контактов и т. д.).

Учитывая полученные результаты, разработанную компьютерную программу можно применять для моделирования функционирования элементов комплекса ВМ 8018 для конкретных условий его эксплуатации [5].

Для определения возможностей комплекса ВМ 8018, с помощью компьютерной программы были просчитаны различные варианты его построения. Условия проведения моделирования:

- расстояние между БЛ – 1200 м;
- сопротивление кабеля при температуре 200 °С – 15,85 Ом/км.

В соответствии с характеристиками комплекса он сохраняет свою работоспособность в случае, если напряжение на выходе БОИ не превышает 112 В для питания БЛ, подключенных к одному флангу². Учитывая, что количество БЛ, подключаемых к одному флангу не превышает 20, цель моделирования состояла в определении рационального построения комплекса при заданных условиях эксплуатации. Результаты моделирования представлены в табл. 4².

Таблица 4. Результаты моделирования возможностей комплекса при подключении к блокам линейным различной нагрузки

Table 4. The results of the simulation of the complex when connecting different loads

Проверяемое устройство Testing device	Применение средств обнаружения типа сухой контакт Application of dry contact detectors	Использование СО типа «СКАТ», установленного на: Using of DT like “SKAT” installed on:		
		20 БЛ 20 LB	15 БЛ 15 LB	10 БЛ 10 LB
БОИ	110,90	163,17	111,56	111,02
БЛ 1	109,50	151,41	99,94	61,38
БЛ 2	101,55	140,13	91,16	55,33
БЛ 3	94,02	129,34	82,90	49,88
БЛ 4	86,91	119,04	75,17	45,04
БЛ 5	80,21	109,23	68,00	40,83
БЛ 6	73,94	99,94	61,38	37,27
БЛ 7	68,08	91,16	55,33	34,39
БЛ 8	62,64	82,90	49,88	32,21
БЛ 9	57,62	75,17	45,04	30,74
БЛ 10	53,01	68,00	40,83	30,00
БЛ 11	48,83	61,38	37,27	–
БЛ 12	45,06	55,33	34,39	–
БЛ 13	41,72	49,88	32,21	–
БЛ 14	38,79	45,04	30,74	–
БЛ 15	36,28	40,83	30,00	–
БЛ 16	34,18	37,27	–	–
БЛ 17	32,51	34,39	–	–
БЛ 18	31,26	32,21	–	–
БЛ 19	30,42	30,74	–	–
БЛ 20	30,00	30,00	–	–

Из табл. 4 видно, что при подключении 20 БЛ, удаленных друг от друга на расстояние 1200 м, комплекс ВМ 8018 сохраняет свою работоспособность (столбец 2 табл. 4). При этом расстояние до крайнего БЛ составляет 23 км, что соответствует заявленным параметрам. Однако при подключении к 20 БЛ нагрузки типа «СКАТ» комплекс функционировать не сможет из-за превышения допустимого уровня напряжения на выходе блока обработки информации (столбец 3 табл. 4). При моделировании было установлено, что при уменьшении расстояния между БЛ до 600 м комплекс обеспечит надежное функционирование на расстоянии 16,6 км.

В ходе дальнейшего моделирования было установлено, что при уменьшении количества подключаемых БЛ возможности комплекса улучшаются. Так, при подключении 15 БЛ возможно обеспечить надежное функционирование комплекса на расстоянии 18,3 км (столбец 4 табл. 4). При этом максимальное расстояние от БОИ до 1 БЛ, при котором сохраняется работоспособность комплекса, составляет 1500 м. В случае подключения 10 БЛ максимальное расстояние от БОИ до 1 БЛ, при котором сохраняется работоспособность комплекса, составляет 9 км. При этом расстояние до крайнего БЛ составит 19,9 км.

² Комплекс охраны протяженных периметров объектов различного назначения ВМ 8018. Руководство по эксплуатации: ЮИТС.465259.001РЭ Введ. 03.01.2020. 72 с. Complex of protection of extended perimeters of various objects ВМ8018 Operation manual: YUITS.465259.001RE Int. 03/01/2020. 72 p.

Результаты моделирования показали, что при использовании на одном охраняемом фланге от 10 до 15 БЛ, к каждому из которых будет подключены средства обнаружения типа «СКАТ», будет обеспечено устойчивое функционирование комплекса ВМ 8018. Следовательно, такие варианты комплектации комплекса являются рациональными.

Результаты и их обсуждение

В ходе проведенной опытной эксплуатации комплекса ВМ 8018 было выявлено, что по своим техническим характеристикам он не уступает лучшим российским аналогам. При этом технические решения, реализованные при разработке и создании комплекса ВМ 8018, позволяют обеспечить управление с одного помещения множеством исполнительных устройств, получать информацию от разнотипных средств обнаружения, размещенных вдоль периметра охраняемого объекта, а также осуществлять видеонаблюдение участков границы для выяснения причин срабатывания средств обнаружения при поступлении сигнала тревоги или по команде дежурного.

При изготовлении комплекса реализованы доступные для понимания интерфейсы взаимодействия между машиной и человеком, которые не требуют наличие высокой квалификации у дежурного персонала. Кроме того, в комплексе реализованы аппаратные и программные средства защиты информации от внешних и внутренних нарушителей [6].

Проведенное моделирование особенностей применения комплекса при различной конфигурации оборудования позволило выявить оптимальный состав количества блоков линейных, подключаемых к одному флангу.

Список литературы

1. Луцевич О.И., Виноградов А.Е., Гришко В.Д., Шумяко П.П. *Сигнализационный комплекс КС-185. Часть II. Средства обнаружения: учебно-методическое пособие.* – Минск: УО «ВА РБ»; 2009.
2. Утин Л.Л., Остромухов Е.Л. Анализ возможных способов активизации компьютерных закладок. *Управление защитой информации.* 2003;7(4):423-427.
3. Утин Л.Л., Касанин С.Н., Мацылевич А.Р., Федорцов А.В. Адаптивное управление средствами защиты информации от инсайдерских атак в информационных системах специального назначения. *Вестник связи.* 2016;3(137):41-46.
4. Утин Л.Л., Остромухов Е.Л., Солонович А.М. Перспективные направления совершенствования систем охраны протяженных периметров. *Материалы 25-й научно-практической конференции «Комплексная защита информации»,* Москва, 15-17 сентября 2020 г. Москва; 2020: 218-220.
5. Утин Л.Л., Павловский А.В., Солонович А.М. Обзор возможностей отечественного комплекса нового поколения для охраны протяженных периметров тезисы. *Материалы 12-й Республиканской научно-практической конференции «Актуальные проблемы обеспечения общественной безопасности в Республике Беларусь: Теория и практика»,* Минск, 21 мая 2020 г. Минск: УО «ВА РБ»; 2020: 267-269.
6. Утин Л.Л., Остромухов Е.Л., Павловский А.В., Солонович А.М. К вопросу совершенствования систем охраны протяженных периметров. *Материалы 9-й Республиканской научно-практической конференции «Обеспечение пограничной безопасности и охрана государственной границы Республики Беларусь: Теория и практика»,* Минск, 19 февраля 2020 г. Минск: УО «ИПС»; 2020.

References

1. Lutsevich O.I., Vinogradov A.E., Grishko V.D., Shumyako P.P. [Signaling complex KS-185. Part II. Detection tools: Training manual]. Minsk: UO "VA RB"; 2009. (In Russ.)
2. Utin L.L., Ostromukhov E.L. [Analysis of possible ways to activate computer bookmarks]. *Information Security Management.* 2003;7(4):423-427. (In Russ.)
3. Utin L.L., Kasanin S.N., Matsylevich A.R., Fedortsov A.V. [Adaptive management of information protection means from insider attacks in special-purpose information systems]. *Vestnik Svyazi.* 2016;3(137):41-46. (In Russ.)

4. Utin L.L., Ostromukhov E.L., Solonovich A.M. [Perspective directions of improvement of security systems of extended perimeter]s. *Materials of the 25 scientific and practical conference "Complex information protection"*, Moscow, September 15-17, 2020. Moscow; 2020: 218-220. (In Russ.)
5. Utin L.L., Pavlovsky A.V., Solonovich A.M. [Review of the capabilities of the domestic complex of a new generation for the protection of extended perimeters theses]. *Materials of the 12 Republican scientific and practical conference "Actual problems of ensuring public safety in the Republic of Belarus: Theory and Practice"*, Minsk, May 21, 2020. Minsk: UO "VA RB"; 2020: 267-269. (In Russ.)
6. Utin L.L., Ostromukhov E.L., Pavlovsky A.V., Solonovich A.M. [On the issue of improving the security systems of extended perimeters]. *Materials of the 9 Republican scientific and practical conference "Ensuring border security and protecting the state border of the Republic of Belarus: Theory and Practice"*, Minsk, February 19, 2020. Minsk: UO "IPS", 2020. (In Russ.)

Вклад авторов

Утин Л.Л. принимал участие в проведении экспериментов, подготовил рукопись статьи для опубликования.

Павловский А.В. разработал комплекс ВМ 8018, участвовал в обработке данных опытной эксплуатации.

Ольховик А.А. осуществил постановку задачи на проведение исследований, организовал опытную эксплуатацию комплекса ВМ 8018.

Макатерчик А.В. оказал помощь в оформлении статьи и теоретическом обосновании экспериментов.

Authors' contribution

Utin L.L. took a part in conducting experiments, prepared the manuscript of the article for publication.

Pavlovsky A.V. developed complex VM 8018, took a part in the processing of experimental data.

Olkhovik A.A. organized trial operation of the complex VM 8018, set a task for research.

Makatscherchyk A.V. helped in execution of the article and theoretical justification of experiments.

Сведения об авторах

Утин Л.Л., к.т.н., доцент, начальник кафедры связи военного факультета Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Павловский А.В., заместитель начальника управления ОАО «НИИ ЭВМ».

Ольховик А.А., заместитель директора – главный инженер ОАО «НИИ ЭВМ».

Макатерчик А.В., начальник цикла кафедры связи военного факультета Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Information about the authors

Utin L.L., PhD, Associate Professor, Head of the Communications Department of the Military Faculty of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Pavlovsky A.V., Deputy Head of Department of JSC "NIIEVM".

Olkhovik A.A. Deputy Director – Chief Engineer of OJSC "NIIEVM".

Makatscherchyk A.V., Head of the Cycle at the Department of Communications of the Military Faculty of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники;
тел. +375-17-293-88-04;
e-mail: utin@bsuir.by
Утин Леонид Львович

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki str., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics;
tel. + 375-17-293-88-04;
e-mail: utin@bsuir.by
Utin Leanid Lvovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2021-19-3-104-109>

Original paper

UDC 537.531:621.039.537

ELECTROMAGNETIC RADIATION SHIELDING COMPOSITE COATINGS BASED ON POWDERED ALUMINA AND IRON OXIDE

DEIVIS ISAIAS PENIALOSA OVALIES, OLGA V. BOIPRAV,
MIRASLAU V. TUMILOVICH, LEONID M. LYNKOU

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Belarus)

Submitted 1 April 2021

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2021

Abstract. The article presents the results of experimental substantiation of the method for improving the shielding properties of composite coatings based on powdered alumina (electrocorundum, alum earth), which consists in modifying the composition of such coatings by adding to it powdered iron oxide. This experimental substantiation consisted in the development of the technique for obtaining composite coatings based on powdered alumina and iron oxide, the manufacture of the experimental samples using the developed technique, measurements of electromagnetic radiation reflection and transmission coefficients values in the frequency range 0.7...17.0 GHz of the manufactured samples; implementation of the comparative analysis of the measured values with the similar values typical for the composite coatings filled with powdered alumina oxides, and composite coatings with the fillers such as powdered iron oxide. The obtained results revealed that by adding powdered iron oxide to the composite coatings based on powdered alumina oxides, it is possible to reduce by 1.0...8.0 dB their electromagnetic radiation transmission coefficient values in the frequency range 0.7...17.0 GHz. In addition, we found that the implementation of the proposed method allows one to decrease by 2.0...20.0 dB the electromagnetic radiation reflection coefficient values in the specified frequency range of the considered composite coatings, if such are applied to metal substrates. We propose to use the composite coatings, obtained on the base of the substantiated method, in order to ensure the electromagnetic compatibility of radio-electronic equipment.

Keywords: alum earth, electrocorundum, electromagnetic radiation, composite coating, iron oxide, shielding.

For citation. Penialosa Ovalies D.I., Boiprav O.V., Tumilovich M.V., Lynkou L.M. Electromagnetic radiation shielding composite coatings based on powdered alumina and iron oxide. Doklady BGUIR. 2021; 19(3): 104-109.

Introduction

The paper [1] presents the results of the study targeted to experimental substantiation of the method for modifying the composition and thereby improving the shielding and radioabsorbing properties of non-combustible composite coatings based on powdered alumina (electrocorundum, alum earth), which consists in adding to such coatings the components characterized by conductive properties, in particular, in fixing fragments of insulated metallized polyethylene film on the surface of such coatings. The results of such study has shown that using the proposed method enables to reduce by 1.0...6.0 dB the electromagnetic radiation (EMR) reflection coefficient values in the frequency ranges 0.9...4.0 GHz and 11.0...17,0 GHz of the composite coatings based on powdered alumina and applied to metal substrates.

The study considered in this paper is developed from the study presented in paper [1]. Its aim was to substantiate experimentally the method for improving the shielding and radioabsorbing properties of composite coatings based on powdered alumina (electrocorundum, alum earth), which consists in modifying the composition of such coatings by adding the powdered materials

characterized by magnetic properties (in privacy, powdered iron oxide [2, 3]). The choice of powdered iron oxide as the material added to the composite coatings based on powdered alumina was due to its lower cost compared to analogues. The study says the powdered iron oxide is more advantageous in comparison with other materials characterized by magnetic properties for being a natural material [4].

To achieve this aim, the following tasks have been solved:

- the technique for the manufacture of composite coatings based on powdered alumina and iron oxide has been developed;
- experimental samples on the basis of composite coating made in accordance with the developed technique, as well as experimental samples have been formed on the basis of the composite coatings, one filled with powdered alumina and another one with powdered iron oxide;
- measurements of EMR reflection and transmission coefficients values of the formed experimental samples have been carried out;
- the comparative analysis of EMR reflection and transmission characteristics, obtained on the basis of the measurements results, has been implemented;
- recommendations for the practical use of the obtained research results have been made.

Experimental method

The developed technique for the manufacture of composite coatings based on powdered alumina and iron oxides includes the following stages.

Stage 1. Establishing the optimal volumetric ratio of powdered alumina, powdered iron oxide and a binder (water-based paint, aqueous alkaline sodium silicate solution or gypsum solution) in the manufactured composite coating in accordance with the method presented in [5], and taking into account that the content of powdered alumina in the composition of such coating should exceed the content of powdered iron oxide.

It was found that the optimal volumetric ratio of these three components is 3.0:2.0:5.0 parts.

Stage 2. Mixing the powdered alumina with the powdered iron oxide in the established optimal volumetric ratio.

Stage 3. Adding the binder to the mixture of powdered alumina and iron oxide.

Stage 4. Uniform distribution of particles of the mixture of powdered alumina and iron oxide over the volume of the binder added to it using a laboratory mixer.

Stage 5. Deposition with a spatula of a layer of the resulting mixture on a substrate surface.

Stage 6. Drying a layer of the mixture applied to the substrate surface under standard conditions [6].

Stage 7. Controlling the layer thickness of the mixture using an electronic micrometer.

Stage 8. If necessary, increase the thickness of the mixture layer by repeating the stages 5–7.

In accordance with the developed technique, the following experimental samples have been formed:

- the composite coating based on powdered electrocorundum, iron oxide and an aqueous alkaline solution of sodium silicate, applied to a cellulose substrate with a layer 3.0 mm thick (reference designation – sample 1);
- the composite coating based on powdered electrocorundum, iron oxide and an aqueous alkaline solution of sodium silicate, applied to a metal substrate with a layer 3.0 mm thick (reference designation – sample 2).

In addition, following the technique similar to the developed one, the following experimental samples have been formed:

- the composite coating based on powdered electrocorundum and an aqueous alkaline sodium silicate solution, applied to a cellulose substrate with a layer 3.0 mm thick (reference designation – sample 3);
- the composite coating based on powdered electrocorundum and an aqueous alkaline sodium silicate solution, applied to a metal substrate with a layer 3.0 mm thick (reference designation – sample 4);
- the composite coating based on powdered iron oxide and an aqueous alkaline sodium silicate solution, applied to a cellulose substrate with a layer 3.0 mm thick (reference designation – sample 5);
- the composite coating based on powdered iron oxide and an aqueous alkaline sodium silicate solution applied to a metal substrate with a layer 3.0 mm thick (reference designation – sample 6).

Measurements of EMR reflection and transmission coefficients values of the formed experimental samples have been carried out in the frequency range 0.7...17.0 GHz using a panoramic meter of reflection and transmission coefficients SNA 0.01–18 in accordance with the method presented in [7, p. 47].

Based on the results of such measurements, EMR reflection and transmission characteristics in the frequency range 0.7...17.0 GHz were obtained. A comparative analysis of the obtained characteristics has been carried out in the order presented in Table 1.

Table 1. The procedure for comparing EMR reflection and transmission characteristics of the experimental samples

Compared characteristics	The purpose of comparing the characteristics
EMR reflection and transmission characteristics of samples 1 and 3	Experimental substantiation of the prospects of using the proposed method to improve EMR shielding properties of composite coatings based on powdered alumina oxides
EMR reflection and transmission characteristics of samples 1 and 5	Experimental substantiation of the obtaining capability on the basis of the proposed method of the composite coatings with EMR shielding properties not worse than those characteristic of the coatings filled with powdered iron oxide or exceeding these properties
EMR reflection characteristics of samples 2 and 4	Experimental substantiation of the prospects of using the proposed method to improve radioabsorbing properties of composite coatings based on powdered alumina oxides
EMR reflection characteristics of samples 2 and 6	Experimental substantiation of the obtaining capability on the basis of the proposed method of the composite coatings with the radioabsorbing properties not worse than those characteristic of the coatings filled with powdered iron oxide or exceeding these properties

Results and their discussion

The frequency dependencies of EMR reflection and transmission coefficients in the range of 0.7...17.0 GHz of manufactured samples 1, 3 and 5 are presented in Fig. 1 and 2.

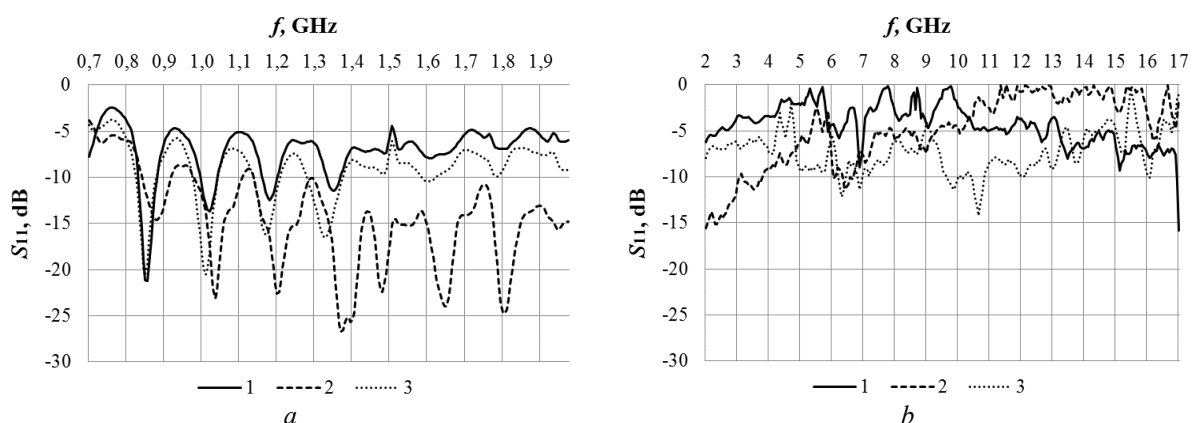


Fig. 1. Frequency dependencies of EMR reflection coefficient in the range 0.7...2.0 GHz (a) and 2.0...17.0 GHz (b) of the samples 1 (curves 1), 3 (curves 2) and 5 (curves 3)

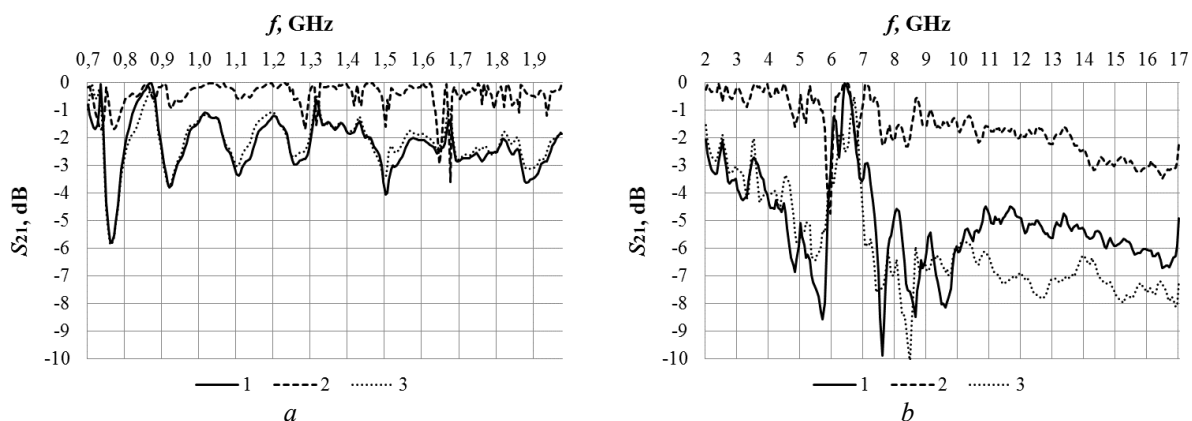


Fig. 2. Frequency dependencies of EMR transmission coefficient in the range 0.7...2.0 GHz (a) and 2.0...17.0 GHz (b) of the samples 1 (curves 1), 3 (curves 2) and 5 (curves 3)

Based on the results of comparing the characteristics shown in Fig. 1 and 2, which was performed in the order presented in Table 1, the following has been established.

1. The addition of powdered iron oxide to the composition of the composite coating filled with powdered alumina enabled to reduce by 1.0...8.0 dB EMR transmission coefficient values in the frequency range 0.7...17.0 GHz of such coating, which is due to an increase of 1.0...15.0 dB of EMR reflection coefficient values [8]. An increase of EMR reflection coefficient values of a composite coating based on powdered alumina as a result of adding powdered iron oxide to the composition of such coating is associated with an increase in its wave resistance [9, p. 142] due to the fact that the relative magnetic permeability of powdered iron oxide is greater than 1 [2, 3].

2. In the frequency ranges 0.7...14.0 GHz and 16.0...16.5 GHz, EMR reflection coefficient values of the composite coating filled with a mixture of powdered alumina and iron oxide, exceed by 1.0...8.0 dB the values of EMR reflection coefficient of the composite coating filled with powdered iron oxide. It could be due to a combination of the following phenomena:

- the energy of electromagnetic waves scattered by particles of the mixture of powdered alumina and iron oxide exceeds the energy of electromagnetic waves scattered by particles of powdered iron oxide, since the size of particles of powdered alumina is larger than the size of particles of powdered iron oxide [10, p. 123];

- interaction of electromagnetic waves, scattered by particles of the mixture of powdered alumina and iron oxide and characterized by a phase similar to the phase of an electromagnetic wave reflected from the "air – composite coating" interface, causes an increase in the amplitude of this wave.

In the frequency ranges 14.0...16.0 GHz and 16.5...17.0 GHz, EMR reflection coefficient values of the composite coating filled with a mixture of powdered alumina and iron oxide, are lower by 1.0...8.0 dB than EMR reflection coefficient values of the composite coating filled with powdered iron oxide. It could be due to the fact that the electromagnetic waves of the specified frequency ranges, scattered by the particles of the mixture of powdered alumina and iron oxide, are characterized by a phase different from the phase of the electromagnetic wave reflected from "air – composite coating" interface. In this regard, as a result of the interaction of the reflected wave with the scattered waves, its amplitude decreases.

EMR transmission coefficient values in the frequency range 0.7...10.0 GHz of the composite coating filled with a mixture of powdered alumina and iron oxide, are practically similar to the values of a similar parameter of the composite coating filled with powdered iron oxide. This feature may be due to a combination of the following phenomena:

- EMR transmission coefficient in the frequency range 0.7...10.0 GHz of the considered composite coatings is determined by the amplitude of the electromagnetic wave reflected from "air – composite coating" interface, the amplitudes of the electromagnetic waves scattered by the particles of the fillers of these coatings, as well as the energy losses of the EMR as a result of its propagation in the coating;

- EMR energy losses associated with its propagation in the composite coating filled with a mixture of powdered alumina and iron oxide are less than EMR energy losses associated with its propagation in the composite coating filled with powdered iron oxide, due to the fact that the value of the relative magnetic permeability of the latter is higher than that of the specified mixture;

- the difference between the magnitude of EMR energy losses associated with its propagation in the composite coating filled with powdered iron oxide, and between the magnitude of EMR energy losses associated with its propagation in the composite coating filled with a mixture of powdered alumina and iron oxide, is practically similar with the difference between the magnitude of the energy of electromagnetic waves scattered by the filler particles of the former and the latter coatings.

In the frequency range of 10.0...17.0 GHz, EMR transmission coefficient values of the composite coating filled with a mixture of powdered alumina and iron oxide, exceed, on average, by 3.0 dB EMR transmission coefficient values of the composite coating filled with powdered iron oxide. This can be associated with an increase in the difference between the amount of EMR energy losses associated with its propagation in the latter coating and the magnitude of the EMP energy losses associated with its propagation in the former coating.

The frequency dependencies of EMR reflection coefficient in the range 0.7...17.0 GHz of manufactured samples 2, 4 and 6 are presented in Fig. 3.

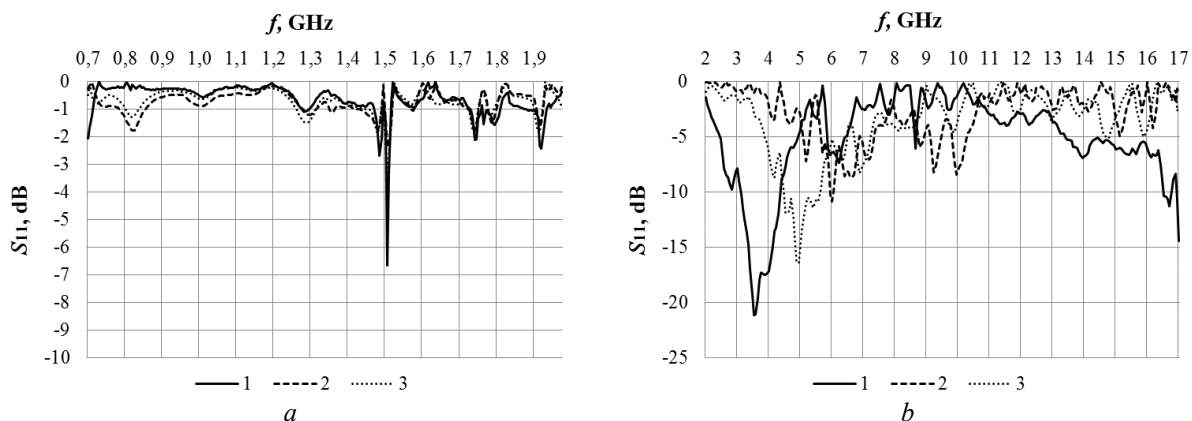


Fig. 3. Frequency dependencies of EMR transmission coefficient in the range 0.7...2.0 GHz (a) and 2.0...17.0 GHz (b) of the samples 2 (curves 1), 4 (curves 2) and 6 (curves 3)

Based on the results of comparison of the characteristics shown in Fig. 3, which was performed in the order presented in Table 1, the following has been established.

1. EMR reflection coefficient values in the frequency ranges 0.7...1.5 GHz, 1.52...2.0 GHz of the composite coating filled with powdered alumina and deposited on a metal substrate are practically similar to the values of the similar parameter of the composite coating a mixture of powdered alumina and iron oxide or powdered iron oxide and deposited on a metal substrate. This can be attributed to the fact that in the specified frequency range EMR reflection coefficient is determined to a greater extent by the amplitude of electromagnetic waves reflected from “composite coating – metal substrate” interface than by the amplitude of electromagnetic waves reflected from “air – composite coating” interface.

2. The addition of powdered iron oxide to the composite coating filled with powdered alumina enables to reduce by 2.0...20.0 dB EMR reflection coefficient values at a frequency of 1.5 GHz and in the frequency ranges 2.0...5.0 GHz, 11.0...17.0 GHz (provided that such coating is deposited on a metal substrate). The specified effect recorded at a frequency 1.51 GHz and in the frequency range 2.0...5.0 GHz, may be due to the phenomenon of natural ferromagnetic resonance associated with the magnetic properties of powdered iron oxide. In turn, the effect recorded in the frequency range 11.0...17.0 GHz may arise from the phenomenon of interaction in antiphase between electromagnetic waves reflected from “air – composite coating” interface and electromagnetic waves reflected from “composite coating – metal substrate” interface. Note that relative to EMR of the frequency range 3.0...4.0 GHz, the composite coating filled with a mixture of powdered alumina and iron oxide and deposited on a metal substrate is characterized by radioabsorbing properties, since its EMR reflection coefficient values in the specified frequency range are equal to or less than -10.0 dB.

3. In the frequency range 4.5...6.0 GHz, EMR reflection coefficient values of the composite coating filled with powdered iron oxide and deposited on a metal substrate is lower by 1.0...10.0 dB than the EMR reflection coefficient values of the composite coating filled with a mixture of powdered alumina and iron oxide and deposited on a metal substrate. This is due to the difference in the frequency value of natural ferromagnetic resonance associated with EMR interaction with each of these coatings.

Conclusion

The obtained results make it possible to conclude that adding 20.0 vol. % of powdered iron oxide to the composition of the composite coating filled with powdered alumina allows improving their EMR shielding properties in the frequency range 0.7...17.0 GHz and radioabsorbing properties in the frequency ranges 2.0...5.0 GHz, 11.0...17.0 GHz. In this case, the property of incombustibility of such coatings is preserved. Note that the cost of 1 kg of iron oxide is comparable to the cost of 1 kg of powdered alumina (electrocorundum, alumina), that is, the use of the proposed method will not lead to an increase in the cost of a composite coating based on such oxides. Composite coatings filled with a mixture of powdered alumina and iron oxide can be used in the manufacturing or improving the technical and operational properties of electromagnetic shields designed to ensure electromagnetic compatibility of radioelectronic equipment.

References

1. Boiprav O.V., Penialosa Ovalies D.I., Tumilovich M.V., Lynkou L.M. [Method for modifying the composition of non-combustible composite coatings based on powdered alumino oxides for electromagnetic shields]. *Pribory=Devices*. 2021;1(247):47-54. (In Russ.)
2. Grebennikov I.S., Savchenko A.G., Zaitseva M.P., Muradova A.G., Yurtov E.V. [Structure and magnetic properties of iron oxide nanopowders and hybrid nanopowders of the “core-shell” type based on them]. *Izvestija Rossijskoj Akademii Nauk. Serija fizicheskaja= Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics*. 2018;82(9):1343-1354. (In Russ.)
3. Matrosova G.S., Bobkov A.A., Sosnina S.A., Polunina I.A. [Modification of iron oxide with ethoxylated surfactants]. *Sorbcionnye i hromatograficheskie processy= Sorbtionnye i Khromatograficheskie Protsessy*. 2010;10(1):93-102. (In Russ.)
4. Mishin D.D. [*Magnetic materials*]. Moscow: Vysshaja shkola; 1991. (In Russ.)
5. Penialosa Ovalies D.I., Lynkou L.M., Boiprav O.V., Tumilovich M.V. [Non-combustible composite coating based on electrocorundum powder for electromagnetic shields] // *Probory=Devices*. 2018;6(216):49-54. (In Russ.)
6. McNaught A.D., Wilkinson A. Standard conditions for gases. IUPAC. Compendium of Chemical Terminology. Oxford, 1997.
7. Neamah M.R.N., Boiprav O.V., Borbotko T.V., Sokolov V.B. [*Radioshielding modular structures based on powder materials*]. Minsk: Bestprint; 2013. (In Russ.)
8. Shapiro D.N. [*Electromagnetic shielding*]. Dolgoprudny: Intellect; 2010. (In Russ.)
9. Slukhotskiy A.E., Nemkov V.S., Pavlov N.A., Bamueer A.V. [*Induction heating installations*]. Leningrad: Energoizdat; 1981. (In Russ.)
10. Alekseev A.G., Shtager E.A., Kozyrev S.V. [*Physical foundations of Stealth technology*]. St. Petersburg: VMM; 2007. (In Russ.)

Authors' contribution

Penialosa Ovalies D.I. has developed the method for manufacturing of composite coatings based on powdered alumina and iron oxides.

Boiprav O.V. has assisted in carrying out measurements, interpreting measurement results, as well as in writing the article.

Lynkou L.M. and Tumilovich M.V. have determined the relevance, aims and objectives of the research, the results of which are presented in the article.

Information about the authors

Penialosa Ovalies D.I., Trainee at the Department of Information Protection of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Boiprav O.V., PhD, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Information Protection of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Tumilovich M.V., D.Sc, Associate Professor, Head of the Department for Training Highly Qualified Personnel of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Lynkou L.M., D.Sc, Professor, Honorary Professor of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Correspondence address

220096, Republic of Belarus, Minsk, P. Brovki str., 6,
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics
e-mail: deivis@bsuir.by;
tel. +375-29-616-83-81
Penialosa Ovalies Deivis Isaias

