
ДОКЛАДЫ БГУИР

Выходит два раза в квартал

Научный журнал издается с января 2003 года

Главный редактор В.А. Богущ

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, М.М. Татур

Редакционный совет:

И.И. Абрамов, В.Е. Агабеков, И.С. Азаров, В.В. Баранов, А.И. Белоус, И.В. Боднарь,
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. Иванюк, В.М. Колешко, Ф.Ф. Комаров, Ф.П. Коршунов,
С.П. Кундас, В.А. Куренев, В.И. Курмашев, Н.И. Листопад, С.В. Лукьянец, В.Е. Матюшков,
Л.И. Минченко, Ф.И. Пантелеенко, В.А. Пилипенко, С.Л. Прищепа, 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

Телеш Е.В. Исследование процесса реактивного ионно-лучевого распыления арсенида галлия с использованием оптической эмиссионной спектроскопии.....	5
Тузлуков В.П. Два подхода к совместному обнаружению сигналов при наличии замираний в канале связи.....	11
Мармыш Д.Е., Бобоед В.И. Метод Монте – Карло для определения и анализа повреждаемости силовой системы.....	21
Павлович Ю.Г., Киринович И.Ф. А/В тестирование как эффективное средство для адаптации пользовательского интерфейса при итерационной модели разработки приложений для мобильных устройств	30
Гулай А.В., Зайцев В.М. Построение интеллектуальной системы как последовательное преобразование модельного ряда ее конструктивных прототипов	37
Барахоев А.Л., Тихон О.И., Тубольцев В.В. Исследование режимов работы высоковольтного источника питания для возбуждения разряда барьерного типа.....	46
Лагуцкий И.А., Давыдов М.В., Кизименко В.В., Богущ В.А. Модель поглощения электромагнитного излучения СВЧ-диапазона биологическими тканями	52

Дубовик И.А., Бойкачев П.В., Исаев В.О., Дмитренко А.А. Методы синтеза согласующих цепей для широкополосных радиотехнических устройств с нестабильным импедансом нагрузки	61
Зеневич А.О., Жданович С.В., Василевский Г.В., Лагуттик А.А., Коваленко Т.Г., Лукашик Т.М. Исследование характеристик мультитатчика на основе оптического волокна.....	70
Радюкевич М.Л., Голиков В.Ф. Комбинированное формирование криптографического ключа с помощью синхронизируемых искусственных нейронных сетей.....	79
Боровиков С.М., Казючиц В.О. Индивидуальное прогнозирование надежности транзисторов большой мощности для электронных устройств медицинского назначения	88
Кравцов А.Г., Тумилович М.В., Пилиневич Л.П. Способ анализа структуры и свойств регенерированных полимерных волокнистых фильтроматериалов для тонкой очистки воздуха	96

Корректурa и верстка Л.В. КОНДАКОВА

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

Подписано в печать 17.02.2021. Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная. Отпечатано на ризографе.

Усл. печ. л. 12,32. Уч.-изд. л. 10,7. Тираж 100 экз. Заказ 27.

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», 2020

DOKLADY BGUIR

Published twice quarterly

The journal has been published since January, 2003

Editor-In-Chief V. A. Bogush

Address of editorial office: P. Brovka str., 6, room 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

Telesh E.V. Investigation of the process of reactive ion-beam sputtering of gallium arsenide using optical emission spectroscopy	5
Tuzlukov V.P. Two approaches to multiuser detection over fading channels.....	11
Marmysh D.E., Babaed U.I. Monte Carlo method for determination and analysis damage to the power system	21
Pavlovich Y.G., Kirinovich I.F. A/B testing as an effective instrument for adaptation of the user interface at the iterative model of developing applications for mobile devices.....	30
Gulay A.V., Zaitsev V.M. Intelligent system construction as consequent transformation of the model range of its functional prototypes	37
Barakhoev A.L., Tikhon O.I., Tuboltsev V.V. Study of the operating modes of the high voltage power source for barrier type discharge excitation	46
Lagutskiy I.A., Davydov M.V., Kizimenko V.V., Bogush V.A. Model of microwave radiation absorption by biological tissues.....	52
Dubovik I.A., Boykachev P.V., Isaev V.O., Dmitrenko A.A. Methods for synthesis of matching circuits for broadband radio devices with unstable load impedance.....	61
Zenevich A.O., Zhdanovich S.V., Vasilevsky H.V., Lagutik A.A., Kovalenko T.G., Lukashik T.M. Research of multisensor characteristics based on optical fiber	70
Radziukevich M.L., Golikov V.F. Combined formation of a cryptographic key using synchronized artificial neural networks	79

Borovikov S.M., Kaziuchyts V.O. Individual prediction of the reliability of high power transistors for electronic devices of medical purposes.....	88
Kravtsov A.G., Tumilovich M.V., Pilinevich L.P. Method for analysis of the structure and properties of regenerated polimer fibrous filter for thin cleaning of air	96



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2021-19-1-5-10>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.382.002:533.9.004.14

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РЕАКТИВНОГО ИОННО-ЛУЧЕВОГО РАСПЫЛЕНИЯ АРСЕНИДА ГАЛЛИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОПТИЧЕСКОЙ ЭМИССИОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

Е.В. ТЕЛЕШ

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

Поступила в редакцию 18 октября 2019

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2021

Аннотация. Целью данной работы являлось исследование процесса реактивного ионно-лучевого распыления арсенида галлия с использованием оптического эмиссионного анализа плазмы в области мишени для определения оптимальных условий формирования собственных оксидов GaAs. Источником ионов являлся плазмотрон на базе ускорителя с анодным слоем, который генерировал поток ускоренных ионов аргона и кислорода с энергией 400–1200 эВ. Мишень была изготовлена из арсенида галлия, легированного теллуром. При распылении GaAs ионами Ar^+ в спектре обнаружены интенсивные линии GaI (2874,2 Å, 2943,6 Å, 4033,0 Å и 4172,1 Å), атомарного аргона ArI, ионов аргона, а также линии FeI. Появление линий железа может быть объяснено распылением полюсных наконечников магнитной системы ионного источника. Увеличение ускоряющего напряжения с 1 до 3 кВ приводит к росту интенсивности пиков атомарного галлия GaI (4172,1 Å) в 2,38 раза, линии GaI (4033,0 Å) – в 3,25 раза, линии GaI (2943,6 Å) – в 3,4 раза, линии GaI (2874,2 Å) – в 5 раз. Установлено, что увеличение парциального давления кислорода приводит к резкому уменьшению пиков GaI (4033,0 Å) и GaI (4172,1 Å) из-за химического взаимодействия галлия и кислорода. Распыление в чистом кислороде снижает интенсивность этих пиков в 8 и 5 раз соответственно. Интенсивность пиков атомарного галлия GaI (2874,2 Å) и GaI (2943,6 Å) снизилась в 2 и 1,78 раза соответственно. При наличии положительного потенциала на мишени интенсивность всех линий атомарного галлия монотонно снижается с увеличением потенциала. В эмиссионном спектре были обнаружены линии атомарного кислорода OI (7774,2 Å) и молекулярных положительных ионов O^+_2 (6418,7 Å, 6026,4 Å, 5631,9 Å и 5295,7 Å). При наличии положительного потенциала на мишени наблюдалось монотонное снижение интенсивности вышеуказанных линий кислорода. Это свидетельствует об интенсификации процессов химического взаимодействия кислорода с элементами мишени и, соответственно, о снижении свободных активных частиц кислорода.

Ключевые слова: собственные оксиды арсенида галлия, реактивное ионно-лучевое распыление, оптическая эмиссионная спектроскопия.

Для цитирования. Телеш Е.В. Исследование процесса реактивного ионно-лучевого распыления арсенида галлия с использованием оптической эмиссионной спектроскопии. Доклады БГУИР. 2021; 19(1): 5-10.

INVESTIGATION OF THE PROCESS OF REACTIVE ION-BEAM SPUTTERING OF GALLIUM ARSENIDE USING OPTICAL EMISSION SPECTROSCOPY

EUGENE V. TELESH

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

Submitted 18 October 2019

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2021

Abstract. The aim of this work was to study the process of reactive ion-beam sputtering of gallium arsenide using optical emission analysis of plasma in the target region to determine the optimal conditions for the formation of intrinsic GaAs oxides. The ion source was a plasmatron based on an anode layer accelerator (UAS), which generated a stream of accelerated argon and oxygen ions with an energy of 400–1200 eV. The target was made from tellurium doped gallium arsenide. Intense GaI lines (2874.2 Å, 2943.6 Å, 4033.0 Å and 4172.1 Å), atomic argon ArI, argon ions, and also FeI lines were detected in the spectrum upon sputtering of GaAs by Ar⁺ ions. The appearance of iron lines can be explained by the sputtering of the pole tips of the magnetic system of the ion source. An increase in the accelerating voltage from 1 to 3 kV leads to an increase in the intensity of the peaks of atomic gallium GaI (4172.1 Å) by 2.38 times, the GaI line (4033.0 Å) by 3.25 times, the GaI line (2943.6 Å) 3.4 times, GaI lines (2874.2 Å) 5 times. It was found that an increase in the partial pressure of oxygen leads to a sharp decrease in the peaks of GaI (4033.0 Å) and GaI (4172.1 Å) due to the chemical interaction of gallium and oxygen. Sputtering in pure oxygen reduces the intensity of these peaks by 8 and 5 times, respectively. The intensities of the peaks of atomic gallium GaI (2874.2 Å) and GaI (2943.6 Å) decreased in 2 and 1.78 times, respectively. In the presence of a positive potential on the target, the intensity of all lines of atomic gallium monotonically decreases with increasing potential. In the emission spectrum, lines of atomic oxygen OI (7774.2 Å) and molecular positive ions O⁺² (6418.7 Å, 6026.4 Å, 5631.9 Å and 5295.7 Å) were detected. In the presence of a positive potential on the target, a monotonic decrease in the intensity of the above oxygen lines was observed. This indicates an intensification of chemical interaction of oxygen with target elements and, accordingly, a decrease in the free active oxygen particles.

Keywords: intrinsic oxides of gallium arsenide, reactive ion beam sputtering, optical emission spectroscopy.

For citation: Telesh E.V. Investigation of the process of reactive ion-beam sputtering of gallium arsenide using optical emission spectroscopy. Doklady BGUIR. 2021; 19(1): 5-10.

Введение

Важной технологической задачей при изготовлении интегральных схем на арсениде галлия является формирование высококачественных диэлектрических слоев различного функционального назначения. В качестве материала пассивирующих слоев и подзатворного диэлектрика в МОП транзисторах применяются собственные оксиды GaAs [1]. Для формирования собственных оксидов используется термическое окисление в кислороде или озоне, анодирование в электролитах или в плазме кислорода и др. При термическом окислении арсенида галлия из-за высоких температур происходит испарение мышьяка, в состав пленок собственного оксида входит в основном Ga₂O₃ [2]. Такие пленки обладают низкой плотностью и, как правило, невысокими диэлектрическими параметрами.

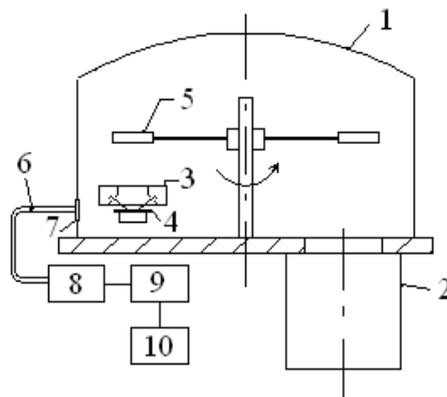
Низкотемпературный метод электрохимического анодирования позволяет достичь высокого качества границы раздела полупроводник – оксид [3]. Однако свежесаженные анодные оксиды обладают высокой пористостью и содержат много воды. При плазменном анодировании при температуре подложек ≤373 К образовывались стехиометрические оксиды и достигались высокие скорости роста [4]. Однако воздействие плазмы кислорода приводит к генерации положительного заряда в диэлектрике и к радиационным повреждениям поверхности полупроводника.

Ранее автором был разработан способ ионно-лучевого синтеза собственных оксидов GaAs, основанный на распылении мишени из GaAs ионами инертного газа и кислорода и

конденсации распыленных частиц на подложке [5]. Он позволяет наносить оксиды GaAs на любые подложки. Для стимуляции процесса химического взаимодействия кислорода с компонентами мишени на последней создается положительный потенциал. Характеристики оксидов зависят от состава рабочего газа, скорости нанесения, величины потенциала на мишени и т. п. Одним из методов диагностики распыленного материала является оптическая эмиссионная спектроскопия (ОЭС) и дальнейший анализ полученных данных по интенсивности спектральных линий при различных режимах ионно-лучевого распыления [6]. Этот метод бесконтактной диагностики неравновесной газоразрядной плазмы обладает высокими чувствительностью и информативностью. Задачей исследований являлось изучение процесса распыления GaAs с применением ОЭС для определения оптимальных условий формирования собственных оксидов GaAs.

Методика проведения эксперимента

Для экспериментальных исследований применялась вакуумная установка Z-400 фирмы LEYBOLD-HERAEUS. Источником ионов являлся плазмотрон на базе ускорителя с анодным слоем (УАС), который генерировал поток ускоренных ионов аргона и кислорода с энергией 400–1200 эВ. Распыляемая мишень была изготовлена из арсенида галлия, легированного теллуром. Поток ионов имел коническую форму, что позволило использовать мишень небольшого диаметра. Система ОЭС включала монохроматор ММ-101, фотоэлектронный умножитель ФЭУ-106, кварцевый световод. Спектр излучения плазмы записывался с помощью самописца КСП-4. Контроль вакуума осуществлялся вакуумметром ВИТ-2. Упрощенная схема подколпачного устройства установки Z-400 представлена на рис. 1.



1 – рабочая камера; 2 – высоковакуумный насос; 3 – источник ионов на основе УАС; 4 – мишень из арсенида галлия; 5 – подложкодержатель; 6 – кварцевый световод; 7 – окно из кварцевого стекла; 8 – монохроматор ММ-101; 9 – фотоэлектронный умножитель ФЭУ-106; 10 – самописец КСП-4

Рис. 1. Упрощенная схема подколпачного устройства установки вакуумного напыления Z-400
1 – working chamber; 2 – high-vacuum pump; 3 – an ion source based on the UAS; 4 – gallium arsenide target; 5 – substrate holder; 6 – quartz light guide; 7 – quartz glass window; 8 – monochromator MM-101; 9 – photomultiplier FEU-106; 10 – KSP-4 recorder

Fig. 1. Simplified diagram of the under-cap plant for vacuum deposition Z-400

Результаты и их обсуждение

Изучено реактивное ионно-лучевое распыление (РИЛР) мишени из GaAs ускоренными ионами аргона и кислорода. Исследовалось влияние энергии ионов, парциального давления кислорода и величины положительного потенциала на мишени на спектр излучения плазмы.

При распылении GaAs ионами Ar^+ в спектре обнаружены интенсивные линии GaI (2874,2 Å, 2943,6 Å, 4033,0 Å и 4172,1 Å), атомарного аргона ArI (4423,99 Å, 4198,32 Å, 4158,59 Å), ионов аргона Ar^+ (4348,06 Å, 4609,56 Å, 4879,87 Å), а также линии FeI (3485,34 Å, 3544,63 Å, 3558,51 Å) (рис. 2, а) [5]. Появление линий железа может быть объяснено

распылением полюсных наконечников магнитной системы ионного источника. Увеличение энергии ионов с 400 до 1200 эВ (соответствует изменению ускоряющего напряжения на аноде ионного источника с 1 до 3 кВ) приводит к росту интенсивности пиков атомарного галлия GaI (4172,1 Å) в 2,38 раза, линии GaI (4033,0 Å) – в 3,25 раза, линии GaI (2943,6 Å) – в 3,4 раза, линии GaI (2874,2 Å) – в 5 раз (рис. 2, b).

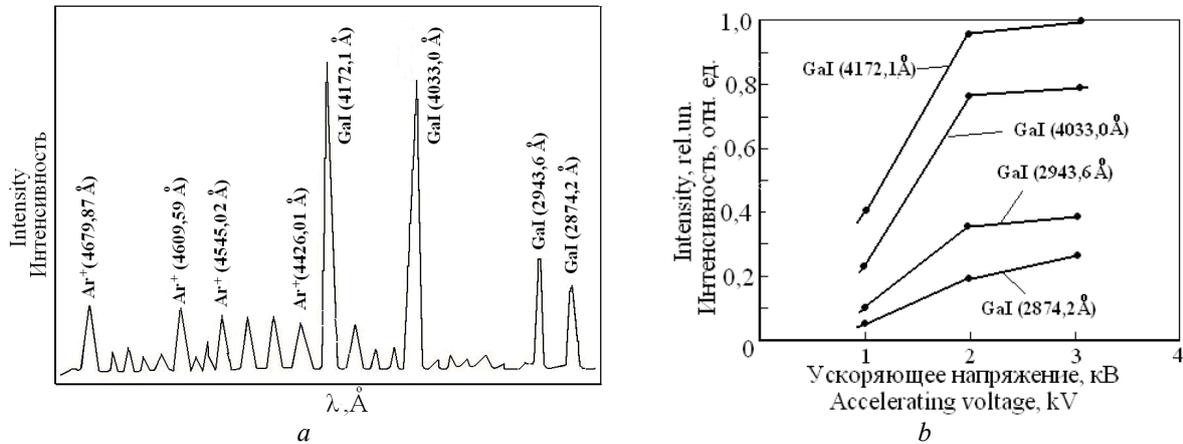


Рис. 2. Спектр излучения плазмы при распылении GaAs ионами аргона (a) и влияние ускоряющего анодного напряжения на на интенсивность пиков атомарного галлия (b)

Fig. 2. Spectrum of plasma radiation during GaAs sputtering by argon ions (a) and the effect of the accelerating anode voltage on the intensity of atomic gallium peaks (b)

Результаты ЭОС при РИЛР арсенида галлия ионами аргона и кислорода приведены на рис. 3, a. Общее рабочее давление составляло $7,98 \cdot 10^{-2}$ Па, ускоряющее напряжение – 2 кВ. Установлено, что увеличение парциального давления кислорода приводит к резкому уменьшению пиков GaI (4033,0 Å) и GaI (4172,1 Å) из-за химического взаимодействия галлия и кислорода. Распыление в чистом кислороде снижает интенсивность этих пиков в 8 и 5 раз соответственно. Интенсивность пиков атомарного галлия GaI (2874,2 Å) и GaI (2943,6 Å) снизилась в 2 и 1,78 раза соответственно [5].

Исследование влияния положительного потенциала на мишени U_M на спектры излучения проводилось при ускоряющем напряжении на аноде 2 кВ и парциальном давлении кислорода $5,32 \cdot 10^{-2}$ Па. Установлено, что интенсивность всех линий атомарного галлия монотонно снижается с увеличением потенциала (рис. 3, b). Следует отметить, что, в отличие от зависимости, приведенной на рис.3, a, сигнал от GaI (2874,2 Å) и GaI (2943,6 Å) уменьшался в большей степени, чем сигналы от GaI (4033,0 Å) и GaI (4172,1 Å).

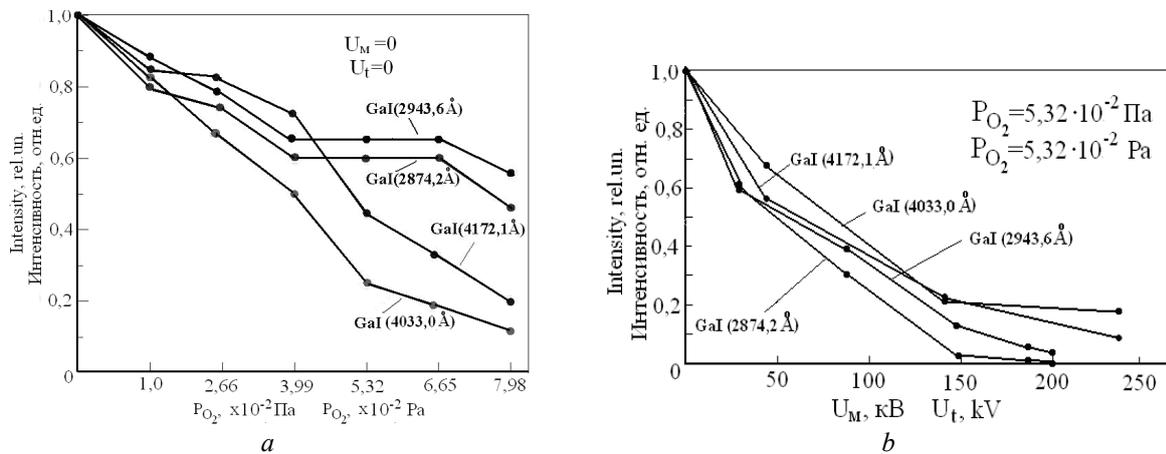


Рис. 3. Влияние парциального давления кислорода в рабочем газе (a) и напряжения на мишени (b) на интенсивности линий атомарного галлия

Fig. 3. The influence of the partial pressure of oxygen in the working gas (a) and the voltage on the target (b) on the intensity of the lines of atomic gallium

Известно, что активными частицами кислородной плазмы могут быть положительные атомарные и молекулярные ионы, озон, возбужденные молекулы и атомы кислорода [6]. Положительные ионы кислорода (молекулярные и атомные) образуются вследствие электронной бомбардировки и процессов перезарядки. Повышенной химической активностью обладают возбужденные молекулы и атомы кислорода, которые возникают при наличии положительного потенциала на распыляемой мишени [7]. Кроме того, имеет место ионизация и возбуждение распыленных атомов мишени в плазме вторичного плазменного разряда, что также будет способствовать более эффективному взаимодействию галлия и мышьяка с кислородом.

При распылении арсенида галлия в атмосфере аргона и кислорода в эмиссионном спектре были обнаружены линии атомарного кислорода OI (7774,2 Å) и молекулярных положительных ионов O₂⁺ (6418,7 Å, 6026,4 Å, 5631,9 Å и 5295,7 Å). При наличии положительного потенциала на мишени наблюдалось монотонное снижение интенсивности вышеуказанных линий кислорода (рис. 4). Это свидетельствует об интенсификации процессов химического взаимодействия кислорода с элементами мишени и, соответственно, о снижении свободных активных частиц кислорода.

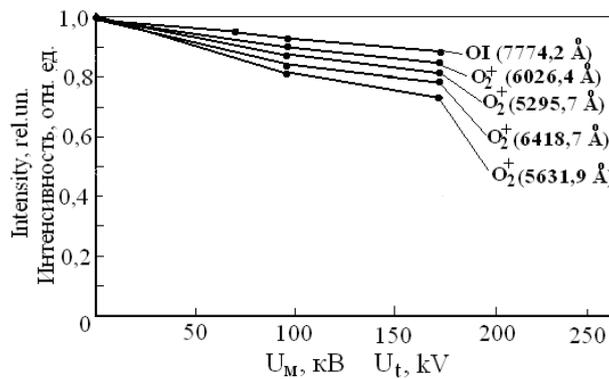


Рис. 4. Влияние напряжения на мишени на интенсивности линий кислорода
Fig. 4. The effect of voltage on targets on the intensity of oxygen lines

Таким образом, наличие положительного потенциала на мишени позволяет значительно уменьшить интенсивность пиков галлия, что способствует получению качественных оксидов арсенида галлия при пониженном парциальном давлении кислорода [5].

Заклучение

При РИЛР мишени из GaAs ионами аргона в эмиссионном спектре наблюдались интенсивные пики атомарных галлия и аргона, ионов аргона, а также линии атомарного железа. Повышение ускоряющего напряжения на аноде с 1 до 3 кВ привело к увеличению интенсивности пиков атомарного галлия в 2,4–5 раз. При распылении мишени в смеси аргона и кислорода в эмиссионном спектре были обнаружены линии атомарного кислорода и его молекулярных положительных ионов. Установлено, что увеличение парциального давления кислорода приводило к резкому уменьшению пиков атомарного галлия из-за химического взаимодействия галлия и кислорода. При наличии положительного потенциала на мишени интенсивность всех линий атомарного галлия резко уменьшалась, что свидетельствует об интенсификации процессов химического взаимодействия кислорода с элементами мишени. Это способствует получению качественных оксидов арсенида галлия при пониженном парциальном давлении кислорода в рабочем газе. Так как ион кислорода имеет меньшую массу, чем ион аргона, то коэффициент распыления атомов мишени ионами аргона будет выше. Поэтому снижение доли кислорода в рабочем газе ведет к повышению скорости нанесения покрытий.

Список литературы

1. Passlack M., Hong M., Mannaerts J.P. C-V and G-V characterization of in-situ fabricated Ga[2]O[3]-GaAs interfaces for inversion/accumulation device and surface passivation applications. *Solid-State Electronics*. 1996; 39:8:1133-1136.
2. Томина Е.В., Миттова И.Я., Сухочев А.С. Термическое окисление арсенида галлия с поверхностью, модифицированной оксидами переходных металлов. *Физика и химия стекла*. 2010;36:2:297-306.
3. Агеев О.А., Солодовник М.С., Смирнов В.А. Исследование режимов локального анодного окисления эпитаксиальных структур арсенида галлия. *Известия ЮФУ. Технические науки*. 2011;4(117):8-13.
4. Лежава Н.Г., Бибилашвили А.П., Герасимов А.Б. Применение собственного оксида арсенида галлия для создания изоляции активных элементов интегральных схем на GaAs. *Письма в ЖТФ*. 2005;31:2:63-66.
5. Достанко А.П., Бордусов С.В., Залесский В.Г.; под ред. Достанко А.П. *Технологические процессы и системы в микроэлектронике: плазменные, электронные, электронно-ионно-лучевые, ультразвуковые*. Минск: Бестпринт; 2009.
6. Достанко А.П., Кундас С.П., Босяков М.Н.; под ред. Достанко А.П. *Плазменные процессы в производстве изделий электронной техники*. В 3-х т. Т. 1. Минск: ФУАинформ; 2000.
7. Достанко А.П., Русецкий А.М., Ануфриев Л.П., Бордусов С.В., Голосов Д.А., Завадский С.М., Ковальчук Н.С., Коробко А.О., Ланин В.Л., Мадвейко С.И., Телеш Е.В.; под ред. Достанко А.П., Ланина В.Л. *Интегрированные технологии микро- и наноструктурированных слоев: монография*. Минск: Бестпринт; 2013.

References

1. Passlack M., Hong M., Mannaerts J.P. C-V and G-V characterization of in-situ fabricated Ga[2]O[3]-GaAs interfaces for inversion/accumulation device and surface passivation applications. *Solid-State Electronics*. 1996;39:8:1133-1136.
2. Tomina Y.V., Mittova I.Y., Sukhochev A.S. [Thermal oxidation of gallium arsenide with a surface modified by transition metal oxides]. *Fizika i khimiya stekla = Physics and chemistry of glass*. 2010;36:2:297-306. (In Russ.)
3. Ageyev O.A., Solodovnik M.S., Smirnov V.A. [Investigation of the modes of local anodic oxidation of epitaxial structures of gallium arsenide]. *Izvestiya YUFU. Tekhnicheskkiye nauki = News SFU. Technical science*. 2011;4(117):8-13. (In Russ.)
4. Lezhava N.G., Bibilashvili A.P., Gerasimov A.B. [The use of intrinsic gallium arsenide oxide to create insulation of active elements of integrated circuits on GaAs]. *Pis'ma v ZHTF = Letters to the JTP*. 2005;31:2:63-66. (In Russ.)
5. Dostanko A.P., Bordusov S.V., Zalesskiy V.G.; pod red. Dostanko A.P. [*Technological processes and systems in microelectronics: plasma, electronic, electron-ion beam, ultrasonic*]. Minsk: Bestprint; 2009. (In Russ.)
6. Dostanko A.P., Kundas C.P., Bosyakov M.N.; pod red. Dostanko A.P. [*Plasma processes in the manufacture of electronic products*]. V 3-h t. T. 1. Minsk: FUAinform; 2000. (In Russ.)
7. Dostanko A.P., Rusetskij A.M., Anufriev L.P., Bordusov S.V., Golosov D.A., Zavadskij S.M., Kovalchuk N.S., Korobko A.O., Lanin V.L., Madvejko S.I., Telesh E.V.; pod red. Dostanko A.P., Lanina V.L. [*Integrated technology of micro- and nanostructured layers: monograph*]. Minsk: Bestprint; 2013. (In Russ.)

Сведения об авторах

Телеш Е.В., старший преподаватель кафедры электронной техники и технологии Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Information about the authors

Telesh E.V., Senior Lecturer of 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. +375-17-293-85-81;
e-mail: eteles@mail.ru
Телеш Евгений Владимирович

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka str., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
tel. +375-17-293-85-81;
e-mail: eteles@mail.ru
Telesh Evgeniy Vladimirovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2021-19-1-11-20>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.391.26

ДВА ПОДХОДА К СОВМЕСТНОМУ ОБНАРУЖЕНИЮ СИГНАЛОВ ПРИ НАЛИЧИИ ЗАМИРАНИЙ В КАНАЛЕ СВЯЗИ

В.П. ТУЗЛУКОВ

Белорусская государственная академия авиации (г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 10 января 2020

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2021

Аннотация. В настоящей работе предлагаются две различные структуры приемных устройств, совместимых с технологией множественного доступа с разделением каналов при наличии антенной решетки и замираний в каналах связи. Анализируются характеристики двух различных структур коллективных обнаружителей для восходящего или нисходящего каналов связи. Число приемных антенн может быть ограничено в нисходящем канале из-за малого размера приемного устройства мобильной станции. Какие-либо специфические последовательности не рассматриваются. Предполагается синхронизированная система, но она может быть легко сведена к асинхронной системе. Первый обнаружитель использует распределенный декоррелятор, в котором декорреляция выполняется на выходе каждого элемента антенной решетки независимо, и выходы комбинируются согласно максимальному отношению сигнал/помеха. Другой обнаружитель является централизованным декоррелятором, в котором декорреляция выполняется одновременно на всех выходах элементов антенной решетки. Проводится сравнительный анализ распределенного декоррелятора, когда декорреляция сигнала выполняется каждым элементом антенной решетки, и централизованного декоррелятора, когда декорреляция выполняется совместно один раз. Использование распределенного декоррелятора позволяет получать лучшие характеристики системы при наличии гладких замираний в канале связи. Распределенный и централизованный обнаружители обеспечивают одинаковую характеристику при наличии аддитивного белого шума в канале связи. Тем не менее распределенный декоррелятор обладает лучшей характеристикой при наличии замираний в канале связи.

Ключевые слова: антенная решетка, множественный доступ с кодовым разделением каналов, замирания в канале связи, коллективное обнаружение.

Для цитирования. Тузлуков В.П. Два подхода к совместному обнаружению сигналов при наличии замираний в канале связи. Доклады БГУИР. 2021; 19(1): 11-20.

TWO APPROACHES TO MULTIUSER DETECTION OVER FADING CHANNELS

VYACHESLAV P. TUZLUKOV

Belarussian State Aviation Academy (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 10 January 2020

© Belarussian State University of Informatics and Radioelectronics, 2021

Abstract. In this paper, two different receiver structures to multiuser detection that are appropriate for the code-division multiple-access systems with antenna arrays in fading channels are investigated and compared. We analyze and compare the performance of the two different multiuser detection structures for uplink or downlink channels. The number of elements of receiving antenna array may be limited in the downlink channel due to the small size of receivers. We assume a synchronous system, but it can be easily extended to an asynchronous system. The first approach is based on the distributed decorrelator where the signal decorrelation is performed by each receiving antenna element independently and decorrelated outputs are combined according to the maximum ratio. The second approach is the central decorrelator where the signal decorrelation is performed once collectively on the outputs from all elements of receiving antenna array. Both decorrelators provide the same performance in the additive white Gaussian noise channels. The distributed decorrelator provides the better performance in flat fading channels. We employ the decorrelator to demonstrate our results. The results discussed in the present paper can be extended to other configurations such as the blind adaptive space-time multiuser detection.

Keywords: antenna array, code-division multiple-access (CDMA), fading channels, multiuser detection.

For citation. Tuzlukov V.P. Two approaches to multiuser detection over fading channels. Doklady BGUIR. 2021; 19(1): 11-20.

Введение

В последние десятилетия большое внимание уделяется исследованию совместного обнаружения в ММО (multiple-input multiple-output) системах для обеспечения пространственного разнесения сигналов. Мобильные системы связи пятого поколения также широко используют стандарты широкополосного множественного доступа с кодовым разделением каналов при коллективном обнаружении, используя антенные решетки. Пространственно-временная обработка сигналов является одной из новых технологий на основе стандартов широкополосного множественного доступа с кодовым разделением каналов. Пространственно-временная обработка сигналов предполагает применение пространственного разнесения сигналов, используя ММО системы в сочетании с кодированием. Смежные направления исследований в этом направлении учитывают схемы задержки, в которых копии тех же данных передаются посредством множества антенн в различные моменты времени [1–3]. Пространственно-временной алгоритм с решетчатым кодированием был предложен в [4]. Простая схема пространственно-временной обработки кодированных сигналов была предложена в [5] и рассматривается как один из стандартов для мобильной связи пятого поколения [6–10].

В настоящей работе предлагаются две различные структуры приемных устройств, совместимых с технологией множественного доступа с разделением каналов при наличии антенной решетки и замираний в каналах связи. Исследуются и анализируются характеристики двух различных структур обнаружителей для восходящего и нисходящего каналов связи систем коллективного пользования. Число приемных антенн может быть ограничено в нисходящем канале из-за малого размера приемного устройства мобильной станции. Какие-либо специфические последовательности не рассматриваются. Предполагается синхронизированная система, но она может быть легко сведена к асинхронной системе. Первый обнаружитель использует распределенный декоррелятор, в котором декорреляция

выполняется на выходе каждого элемента антенной решетки независимо, и выходы комбинируются согласно максимальному отношению сигнал/помеха. Другой обнаружитель является централизованным декоррелятором, в котором декорреляция выполняется одновременно на всех выходах элементов антенной решетки. В работе показано, что эти два обнаружителя обеспечивают одинаковую характеристику при наличии аддитивного белого шума в канале связи. Однако распределенный декоррелятор обладает лучшей характеристикой при наличии замираний в канале связи. Исследования могут быть расширены относительно других конфигураций, таких как скрытое адаптивное пространственно-временное совместное обнаружение [11].

Модель системы

Распределенный декоррелятор. Модель системы, основанной на распределенном декорреляторе, представлена на рис. 1.

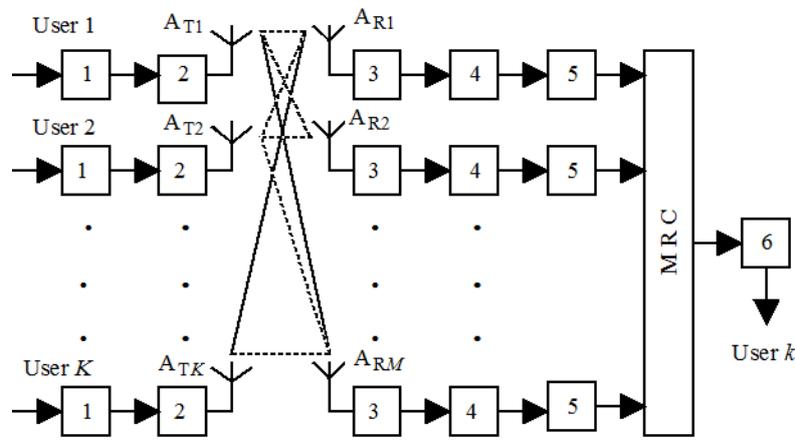


Рис. 1. Схема системы с распределенным декоррелятором: A_T – передающая антенна, A_R – принимающая антенна, MRC – блок суммирования дифференциально взвешенных сигналов каждого канала, 1 – блок двоичной фазовой модуляции, 2 – блок расширения спектра, 3 – полосовой фильтр, 4 – блок сжатия спектра, 5 – блок обратной корреляционной матрицы сигнатур сигнала, 6 – блок принятия решения
Fig. 1. Distributed decorrelator system: A_T – transmit antenna, A_R – receive antenna; MRC – maximal ratio combining block, 1 – BPSK block, 2 – spreading block, 3 – band pass filter, 4 – despreading block, 5 – R^{-1} block, 6 – decision making block

Обозначим общее число пользователей K , полагая, что они передают сигналы одновременно посредством узкополосного канала связи. Предположим, что передаваемые информационные сигналы представляют собой синхронизированные символы, а полоса пропускания канала связи широкая настолько, что можно игнорировать межсимвольные помехи (межсимвольную интерференцию). В течение битового интервала сигнал, переданный k -м пользователем, можно представить как $b_k \in \{-1, +1\}$, и сигнатура сигнала, т. е. зависимость амплитуды и фазы сигнала на выходе передающего устройства от времени, может быть представлена в виде $p_k(t)$. Если число элементов антенной решетки обозначим M , вектор сигнала, принимаемого i -м элементом антенной решетки, можно определить как $r_i(t) = \mathbf{p}(t)\mathbf{A}_i\mathbf{E}\mathbf{b} + n_i(t)$, где $\mathbf{A}_i = \text{diag} \{a_c(i,1)a_g(i,1), a_c(i,2)a_g(i,2), \dots, a_c(i,K)a_g(i,K)\}$, $\mathbf{p}(t) = \{p_1(t), p_2(t), \dots, p_K(t)\}$, $\mathbf{E} = \text{diag} \{e_1, e_2, \dots, e_K\}$, $\mathbf{b} = \{b_1, b_2, \dots, b_K\}^T$, $n_i(t)$ – аддитивный белый гауссовский шум на входе i -го элемента антенной решетки. Элемент $A_i(k,k) = a_c(i,k)a_g(i,k)$ представляет собой коэффициент усиления при передаче сигнала по каналу связи от k -го пользователя к i -му элементу антенной решетки; $a_c(i,k)$ и $a_g(i,k)$ представляют собой коэффициент затухания в канале связи и коэффициент усиления антенной решетки при передаче сигнала по каналу связи от k -го пользователя к i -му элементу антенной решетки. Поскольку величина коэффициента усиления антенной решетки нормализована, коэффициент

усиления антенной решетки $a_g(i, k)$ определяет направление прихода сигнала и угловой разброс. Также $\mathbf{p}(t)$ – вектор сигнатуры сигнала пользователя; \mathbf{E} и \mathbf{b} есть матрица амплитуд и вектор данных K пользователей, где $\{b_1, b_2, \dots, b_K\}^T$ – транспонированная матрица. Сигнатуры сигнала $p_k(t), k = 1, \dots, K$ вещественные, линейно независимые и нормализованные к длительности бита T_b , т. е. $\int_0^{T_b} p_k^2(t) dt = 1$. После сжатия кода вектор сигнала на выходе i -го элемента антенной решетки имеет вид

$$\mathbf{y}'_i = \int_0^{T_b} \mathbf{p}(t)^T r(t) dt = \mathbf{R}_p \mathbf{A}_i \mathbf{E} \mathbf{b} + \mathbf{n}'_i, \quad \mathbf{n}'_i = \int_0^{T_b} \mathbf{p}(t) n_i(t) dt = \{n_{i_1}, n_{i_2}, \dots, n_{i_K}\}^T \quad (1)$$

и \mathbf{R}_p – корреляционная матрица сигнатур сигнала; k -я строка и l -й столбец матрицы \mathbf{R}_p определяются следующим образом:

$$R_p(k, l) = \int_0^{T_b} p_k(t) p_l(t) dt. \quad (2)$$

Вектор сигнала на выходе i -го элемента антенной решетки после декорреляции имеет вид $\mathbf{y}' = \mathbf{R}_p^{-1} \mathbf{y}'_i = \{y_{i_1}, y_{i_2}, \dots, y_{i_K}\}^T = \mathbf{A}_i \mathbf{E} \mathbf{b} + \hat{\mathbf{n}}_i$, (3)

где y_{i_1} – сигнал на выходе декоррелятора, согласованный с $p_1(t)$ на выходе i -го элемента антенной решетки и $\hat{\mathbf{n}}_i = \mathbf{R}_p^{-1} \mathbf{n}'_i = \{n_{i_1}, n_{i_2}, \dots, n_{i_K}\}^T$. Комбинация, при которой достигается наилучшая характеристика, является комбинацией, при которой выход каждого согласованного фильтра умножается на соответствующий комплексно-сопряженный коэффициент усиления канала связи. Тогда переменная Y_k сигнала от k -го пользователя после объединения максимального отношения M элементов принимающей антенной решетки может быть представлена в виде $Y_k = \{a_c(1, k) a_g(1, k), a_c(2, k) a_g(2, k), \dots, a_c(M, k) a_g(M, k)\}^* \mathbf{y}_k, \mathbf{y}_k = \{y_{k_1}, y_{k_2}, \dots, y_{k_M}\}^T$.

Тогда принятие решения для k -го пользователя основано на определении $\hat{b}_k = \text{sign}(Y_k)$.

Централизованный декоррелятор. Модель системы, основанной на централизованном декорреляторе, представлена на рис. 2.

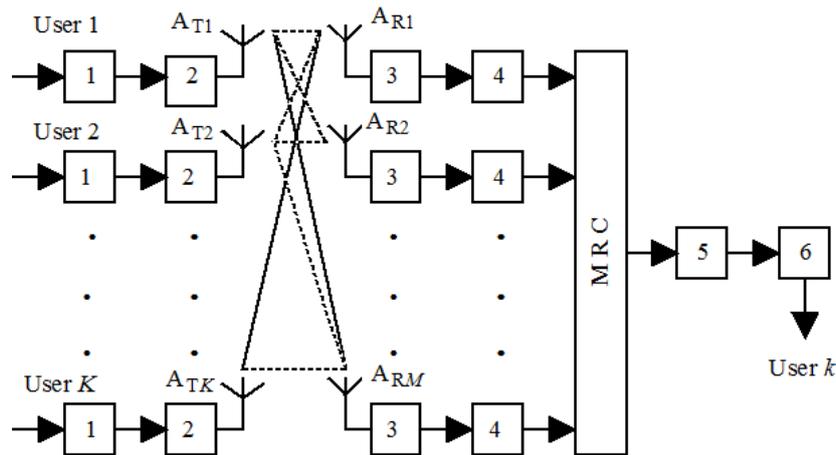


Рис. 2. Схема системы с централизованным коррелятором: A_T – передающая антенна, A_R – принимающая антенна, MRC – блок суммирования дифференциально взвешенных сигналов каждого канала, 1 – блок двоичной фазовой модуляции, 2 – блок расширения спектра, 3 – полосовой фильтр, 4 – блок сжатия спектра, 5 – блок обратной корреляционной матрицы сигнатур сигнала, 6 – блок принятия решения

Fig. 2. Centralized decorrelator system: A_T – transmit antenna, A_R – receive antenna, MRC – maximal ratio combining block, 1 – BPSK block, 2 – spreading block, 3 – band pass filter, 4 – despreading block, 5 – R^{-1} block, 6 – decision making block

Вектор принимаемого сигнала M элементами принимающей антенной решетки может быть представлен в следующем виде

$$\begin{cases} \mathbf{r}(t) = \mathbf{p}(t)\mathbf{A}\mathbf{E}\mathbf{b} + \mathbf{n}(t), A(m, k) = a_c(m, k)a_g(m, k), \mathbf{P}(t) = \text{diag}\{p_1(t), p_2(t), \dots, p_K(t)\}, \\ \mathbf{E} = \text{diag}\{e_1, e_2, \dots, e_K\}, \mathbf{b} = \{b_1, b_2, \dots, b_K\}^T, \mathbf{n}(t) = \{n_1(t), n_2(t), \dots, n_M(t)\}^T. \end{cases} \quad (4)$$

Элемент антенной решетки $A(m, k)$ осуществляет комплексное усиление передачи сигнала от k -го пользователя к m -му элементу антенной решетки; $n_m(t)$ – аддитивный гауссовский шум на входе m -го элемента антенной решетки. Матрица \mathbf{A}_i в распределенном декорреляторе является диагональной матрицей, в то время как матрица \mathbf{A} в централизованном декорреляторе не является диагональной матрицей. При оптимальном сложении сигналов и сжатии, сигнал, передаваемый k -м пользователем, имеет вид

$$y_k(t) = \frac{\mathbf{A}_k^H}{\|\mathbf{A}_k\|} \int_0^{T_b} p_k(t) \mathbf{r}(t) dt, \quad (5)$$

где \mathbf{A}_k^H – эрмитово транспонирование k -го столбца матрицы \mathbf{A} . Вектор \mathbf{y}' (3) можно записать как $\mathbf{y}' = \mathbf{R}\mathbf{D}\mathbf{E}\mathbf{b} + \mathbf{n}'$; $\mathbf{D} = \text{diag}\{\|\mathbf{A}_1\|, \|\mathbf{A}_2\|, \dots, \|\mathbf{A}_K\|\}$; $\|\mathbf{A}_i\| = \sqrt{|A_{i,1}|^2 + |A_{i,2}|^2 + \dots + |A_{i,M}|^2}$, $A_{i,j}$ определено в (4). Вектор \mathbf{n}' определен в (1), где η_k – результат замены $\mathbf{r}(t)$ в (5) на $\mathbf{n}(t)$; \mathbf{R} – комбинированная корреляционная матрица с элементами $R(k, l) = \frac{\mathbf{A}_k^H \mathbf{A}_l}{\|\mathbf{A}_k\| \times \|\mathbf{A}_l\|} \int_0^{T_b} p_k(t) p_l(t) dt$.

Корреляционная матрица \mathbf{R} может быть представлена как поэлементное произведение двух корреляционных матриц $\mathbf{R} = \mathbf{R}_A \times \mathbf{R}_P$, где \mathbf{R}_A – корреляционная матрица векторов сигналов пользователей и \mathbf{R}_P – корреляционная матрица сигнатур сигналов пользователей (2). Поэтому $R(k, l) = R_A(k, l)R_P(k, l)$. Равенство $\mathbf{R} = \mathbf{R}_P$ справедливо только для каналов с аддитивным белым гауссовским шумом. На выходе централизованного декоррелятора вектор решающей статистики имеет вид

$$\mathbf{Y} = \mathbf{R}^{-1} \mathbf{y}' = \mathbf{D}\mathbf{E}\mathbf{b} + \hat{\mathbf{n}}, \quad (6)$$

где вектор помехи $\hat{\mathbf{n}} = \mathbf{R}_P \mathbf{n}' = \{n_1, n_2, \dots, n_K\}^T$. Вектор оцениваемых информационных бит имеет вид $\hat{\mathbf{b}} = \text{sign}(\mathbf{Y})$. При использовании распределенного декоррелятора выполняется линейное преобразование каждым элементом антенной решетки с целью удаления дополнительных помех. Для приемной антенной решетки с M элементами линейное преобразование должно выполняться M раз. Централизованный декоррелятор выполняет линейное преобразование \mathbf{R}^{-1} только один раз над суммарным вектором выходных сигналов приемных антенн. Таким образом, обработка сигналов может быть не такой алгоритмически сложной.

Анализ характеристик

Распределенный декоррелятор. Мы рассматриваем характеристику системы при двоичной фазовой модуляции передаваемых сигналов с порядком разнесения M . На выходе устройства оптимального сложения разнесенных сигналов k -го пользователя формируется процесс $Y_k = \text{Re} \left\{ \sqrt{E_b} \sum_{i=1}^M |a_c(i, k) a_g(i, k)|^2 + \sum_{i=1}^M a_c^*(i, k) a_g^*(i, k) n(i, k) \right\}$, E_b – энергия на один бит k -го пользователя, $\text{Re}(x)$ – действительная часть аргумента x . Для определения дисперсии $n(i, k)$ необходимо для начала определить дисперсию η_i элемента вектора \mathbf{n}'_i (1). Гауссовская помеха после сжатия i -м элементом антенной решетки может быть определена как $\eta_{i,k} = \int_0^{T_b} p_k(t) n_i(t) dt$. Ковариационная функция определяется как $\text{Cov}(\eta_{i,k}, \eta_{i,l}) = \sigma_i^2 R_P(k, l)$, где σ_i^2 – дисперсия шума i -го элемента антенной решетки. Ковариационная функция вектора \mathbf{n}'_i равна

$Cov(\mathbf{n}') = \sigma_i^2 \mathbf{R}_P$. После воздействия декоррелятора \mathbf{R}_P^{-1} ковариационная функция равна $Cov(\hat{\mathbf{n}}) = \sigma_i^2 \mathbf{R}_P^{-1}$. Определим вероятность ошибок, зависящую от фиксированного набора элементов вектора \mathbf{A}_i . Условная вероятность ошибок усредняется относительно распределения плотности вероятностей элементов $A_i(k, k), \forall i$. Для фиксированного набора элементов $A_i(k, k)$ функция решения является гауссовской случайной величиной с математическим ожиданием и дисперсией $E(Y_k) = \sqrt{E_b} \times \sum_{i=1}^M |a_c(i, k) a_g(i, k)|$, $Var(Y_k) = 1/2 R_P^{-1}(k, k) \sum_{i=1}^M |a_c(i, k) a_g(i, k)|^2 \sigma_i^2$ соответственно. Коэффициент 1/2 обусловлен дисперсией реальной части симметричной комплексной переменной [12, 13].

Предположим, что дисперсия помехи на всех элементах антенной решетки одинакова $\sigma^2 = \frac{N_0}{2}$ [14], и бит, переданный k -м пользователем, $b_k = 1$. Тогда при этих значениях математического ожидания и дисперсии вероятность $Y_k < 0$ определяется как $P(Y_k < 0) = P_{k_0}(SNR_{bit}) = Q(\sqrt{2SNR_{bit}})$, $Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty \exp(-0,5v^2) dv$, где

$$SNR_{bit} = \frac{E^2(Y_k)}{Var(Y_k)} = \frac{4E_b \sum_{i=1}^M |a_c(i, k) a_g(i, k)|^2}{R_P^{-1}(k, k) N_0}. \quad (7)$$

Частота ошибок на бит (BER) для любого k -го пользователя имеет вид [15]

$$BER_k(E_b/N_0) = \int P_{k_0}(SNR_{bit}) p(SNR_{bit}) d(SNR_{bit}) = [0,5(1-\mu)]^M \sum_{i=0}^{M-1} \binom{M-1+i}{i} [0,5(1+\mu)]^i. \quad (8)$$

$$\mu = \sqrt{SNR/(1+SNR)}, \quad (9)$$

где \overline{SNR} – среднее значение отношения сигнал/помеха на входе каждого элемента принимающей антенной решетки $\overline{SNR} = (2E_b/N_0) R_P(k, k) E(|a_c(i, k) a_g(i, k)|^2)$.

Централизованный декоррелятор. Принимая во внимание (6), решающая статистика относительно k -го пользователя имеет вид $Y_k = \text{Re} \left\{ \left[E_b \sum_{i=1}^M |a_c(i, k) a_g(i, k)|^2 \right]^{1/2} + n_k \right\}$, где n_k – k -й элемент вектора $\hat{\mathbf{n}}$ после централизованной декорреляции; Y_k – k -й элемент вектора принятия решений \mathbf{Y} в (6). Ковариационная функция вектора \mathbf{n}' равна $\sigma^2 \mathbf{R}$, поскольку $Cov(\eta_k \eta_l) = E \left\{ \sum_{i=1}^M A_{i,k}^H \eta_{i,k} \left[\sum_{j=1}^M A_{j,l}^H \eta_{j,l} \right]^* \right\} \left\{ \|\mathbf{A}_k\| \|\mathbf{A}_l\| \right\}^{-1} = \sigma^2 R_A(k, l) R_P(k, l) = \sigma^2 R(k, l)$, $\eta_{j,k}$ задано в (1). Заметим, что $E(\eta_{i,k} \eta_{j,l}) = 0, \forall i \neq j, \forall k, l$, предполагая, что помехи на i -м и j -м элементах антенной решетки некоррелированные.

Полагаем, что дисперсия помехи на всех элементах антенной решетки одинаковая и равна $\sigma^2 = 1/2 N_0$. Таким образом, ковариационная функция вектора $\hat{\mathbf{n}}$ определяется как $Cov(\hat{\mathbf{n}}) = E \{ \mathbf{R}^{-1} \mathbf{n}' (\mathbf{R}^{-1} \mathbf{n}')^T \} = E \{ \mathbf{R}^{-1} \mathbf{n}' (\mathbf{n}')^T (\mathbf{R}^{-1})^T \} = \mathbf{R}^{-1} E \{ \mathbf{n}' (\mathbf{n}')^T \} (\mathbf{R}^{-1})^T = \sigma^2 \mathbf{R}^{-1} \mathbf{R} \times (\mathbf{R}^{-1})^T = \sigma^2 \mathbf{R}^{-1}$.

Определим вероятность ошибки, зависящую от фиксированного набора коэффициентов затухания $\mathbf{A}_k = \{a_c(1, k), a_c(2, k), \dots, a_c(M, k)\}$. Условная вероятность ошибок затем усредняется по плотности распределения вероятности \mathbf{A}_k . Для фиксированного множества \mathbf{A}_k функция решения является гауссовской случайной величиной с математическим ожиданием и дисперсией $E(Y_k) = \sqrt{E_b} \|\mathbf{A}_k\| = \sqrt{E_b \sum_{i=1}^M |a_c(i, k) a_g(i, k)|^2}$, $Var(Y_k) = \frac{\sigma^2 R^{-1}(k, k)}{2}$ соответственно.

Отношение сигнал/помеха на бит

$$SNR_{bit} = \frac{4E_b \sum_{i=1}^M |a_c(i, k) a_g(i, k)|^2}{R^{-1}(k, k) N_0} \quad (10)$$

выглядит схожим с (7), но $R^{-1}(k,k)$ включает в себя характеристики канала связи. Выражение для BER сводится к (8) и (9), учитывая \overline{SNR} , заменяя $R_p(k,k)$ на $R(k,k)$.

Предполагаем, что мгновенное значение энергии на бит на каждом i -м элементе приемной антенной решетки есть $4E_b |a_c(i,k)a_g(i,k)|^2$, и увеличение помехи $R^{-1}(k,k)$ асимптотически независимо для большого числа пользователей и элементов приемной антенной решетки. Предположение корректно при $K \geq 2$ и $M \geq 2$, как можно заметить при анализе результатов моделирования. Отметим, что SNR_{bit} в (7) и (10) одинаково для каналов связи при наличии аддитивного белого гауссовского шума, так как $\mathbf{R} = \mathbf{R}_p$. Следовательно, характеристики как распределенного, так и централизованного декоррелятора, одинаковые для каналов связи при наличии аддитивного белого гауссовского шума. При наличии замираний в канале связи знаменатель SNR_{bit} в (7) независим от параметров канала связи, в то время как знаменатель SNR_{bit} в (10) зависит от параметров канала связи. Таким образом, характеристики распределенного декоррелятора обладают большей стабильностью при наличии замираний в канале связи по сравнению с аналогичными характеристиками централизованного декоррелятора.

Анализ результатов моделирования

Характеристика системы с декоррелятором и антенной решеткой оценивается с помощью компьютерного моделирования и сравнивается с аналитическими результатами. Коэффициент усиления замираний в канале связи $a_c(m,k)$ обусловлен рэлеевскими замираниями в канале связи, независимыми в пределах каждого битового интервала и для всех m, k . Считаем, что распространение электромагнитной волны между передатчиком и приемником идентично плоской волне без многолучевого распространения. Коэффициент усиления антенны $a_g(m,k) = \exp(j\varphi_k) \exp[j(m-1)\theta_k]$, где φ_k и θ_k соответствуют направлению прихода сигнала и угловому разбросу для $\varphi_k \in [-\pi, \pi]$ и $\theta_k \in [-\pi, \pi]$, соответственно.

На рис. 3 представлена характеристика BER распределенного декоррелятора для двух пользователей и 2-х и 4-х приемных антенн при наличии рэлеевских замираний в канале связи, используя оптимальное сложение разнесенных сигналов. Используется случайное расширение спектра кодовой последовательности длиной $L = 32$ при нулевом угле приема сигнала и угловом разбросе. Аналитические результаты и моделирование доказывают, что при увеличении количества приемных антенн или элементов антенной решетки улучшаются характеристики системы.

На рис. 4 представлены аналитические результаты и моделирование для централизованного декоррелятора для двух пользователей и 2-, 4-, 6- и 8-элементной антенной решетки или приемных антенн с теми же параметрами, что и на рис. 3.

Из рис. 3, 4 видно, что использование распределенного декоррелятора предпочтительнее по сравнению с применением централизованного декоррелятора. Для всех значений отношения сигнал/помеха между характеристиками распределенного и централизованного декоррелятора наблюдается разница в 0,5 дБ. В случае распределенного декоррелятора, увеличение мощности помехи обуславливается процессом декорреляции и является только функцией взаимокорреляций сигнатур сигнала пользователя, в то время как при централизованном декорреляторе коэффициент усиления замираний в канале связи порождает дополнительное увеличение мощности помехи. Очевидно, что распределенный декоррелятор более робастен по отношению к помехам по сравнению с централизованным декоррелятором при замираниях в канале связи.

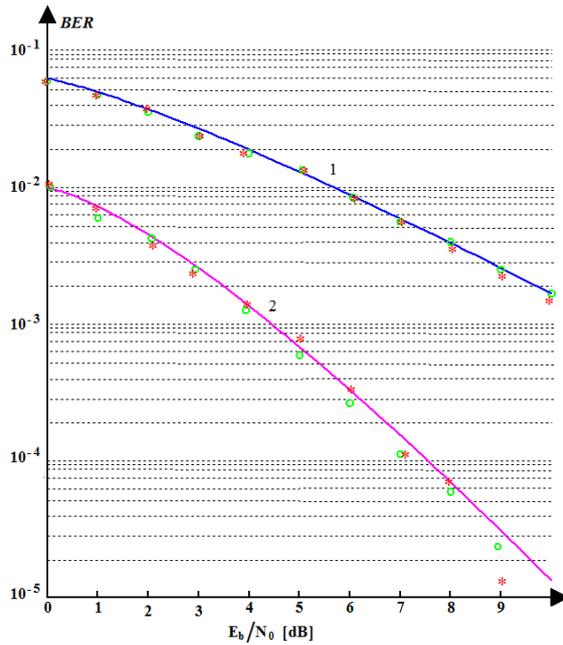


Рис. 3. Вероятность ошибки как функция отношения сигнал/помеха при использовании распределенного декоррелятора; 1 – две, 2 – четыре приемные антенны; сплошная линия – аналитические результаты; моделирование: \circ – первый пользователь; $*$ – второй пользователь
Fig. 3. Probability of error as a function of the signal-to-noise ratio using distributed decorrelator; 2 users; 1 – two and 2 – four receive antennas; solid line – analytical results; simulation: \circ – user 1; $*$ – user 2

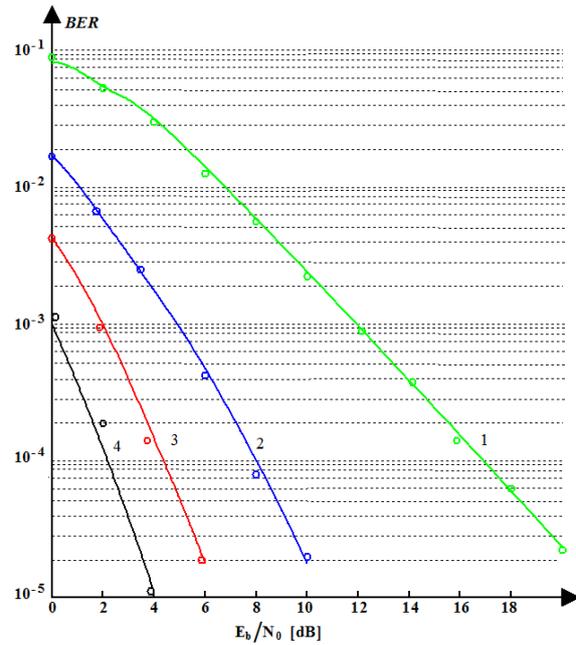


Рис. 4. Вероятность ошибки как функция отношения сигнал/помеха при использовании централизованного декоррелятора; 1 – две, 2 – четыре, 3 – шесть, 4 – восемь приемных антенн; сплошная линия – аналитические результаты; \circ – моделирование
Fig. 4. Probability of error as a function of the signal-to-noise ratio using centralized decorrelator; 2 users; 1 – two, 2 – four, 3 – six, 4 – eight receive antennas; solid line – analytical results \circ – simulation

На рис. 5 представлена характеристика BER для централизованного декоррелятора в случае двух пользователей и 2-, 4- и 6-элементной приемной антенной решетки. Угол приема сигнала равен 45° , и угловой разброс также равен 45° . Можно заметить, что отличие характеристик BER распределенного и централизованного декорреляторов становится меньше при ненулевых углах приема сигнала и углового разброса. Характеристики BER для двух декорреляторов практически неразличимы. Отличные от нуля угол приема и угловой разброс уменьшают разницу между двумя декорреляторами и обладают случайным воздействием на корреляционную матрицу канала \mathbf{R}_A , создавая неоднородные элементы матрицы. Корреляционная матрица \mathbf{R}_P сигнатуры сигнала, передаваемого пользователем, становится доминантной в матрице сложения сигналов \mathbf{R} . В результате несоответствие между двумя матрицами аннулируется.

Аналитические результаты для распределенного декоррелятора со случайными и M -последовательностями с кодом Голда и Уолша для 4-х пользователей и 2-элементной приемной антенной решетки представлены на рис. 6. Угловой разброс равен π . Как и ожидалось, при использовании кода Уолша получается наилучшая характеристика при больших значениях отношения сигнал/помеха. Результаты моделирования подтверждают аналитические расчеты.

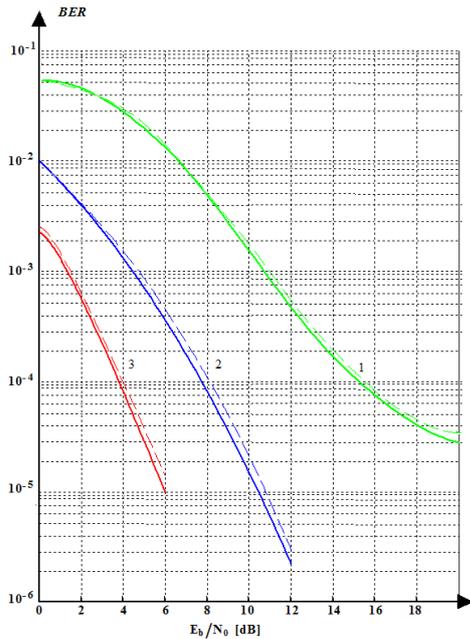


Рис. 5. Вероятность ошибки как функция отношения сигнал/помеха для распределенного (сплошная линия) и централизованного (пунктирная линия) декоррелятора; 2 пользователя; 1 – две, 2 – четыре, 3 – шесть приемных антенн; стохастическое расширение спектра; $L = 32$; рэлеевские замирания

Fig. 5. Probability of error as a function of the signal-to-noise ratio for distributed (solid line) and centralized (dashed line) decorrelators; two users; 1 – two, 2 – four, 3 – six receive antennas; stochastic spreading; $L = 32$; Rayleigh fading

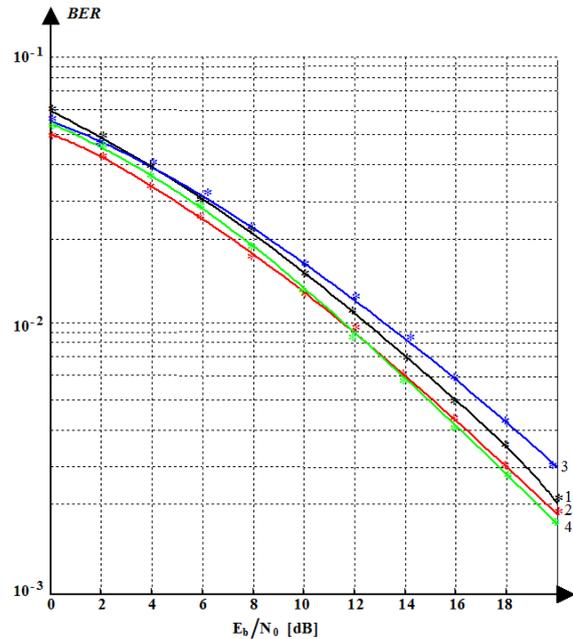


Рис. 6. Вероятность ошибки как функция отношения сигнал/помеха для распределенного декоррелятора; 4 пользователя; 2 приемные антенны; 1 – случайная последовательность $L = 31$; 2 – M -последовательность $L = 31$; 3 – код Голда $L = 31$; 4 – код Уолша $L = 32$; рэлеевские замирания; $\varphi_k = 0, \theta_k = \pi$

Fig. 6. Probability of error as a function of the signal-to-noise ratio for distributed decorrelator; 4 users; 2 receive antennas; 1 – random sequence $L = 31$; 2 – M -sequence $L = 31$; 3 – Gold code $L = 31$; 4 – Walsh code $L = 32$; Rayleigh fading; $\varphi_k = 0, \theta_k = \pi$

Заключение

Выполнен сравнительный анализ двух различных структур обнаружителей, которые соответствуют технологии множественного доступа с кодовым разделением каналов в беспроводных системах связи при наличии антенной решетки или множества антенн. Замирания в канале связи и взаимокорреляционные функции сигнатур сигналов, передаваемых пользователями, суммируются в централизованном декорреляторе, в то время как при использовании распределенного декоррелятора суммируются только взаимокорреляционные функции сигнатур сигналов, передаваемых пользователями. Дисперсия решающей статистики при использовании централизованного декоррелятора изменяется в зависимости от матрицы сложения, которая чувствительна к параметрам канала связи. Декоррелятор используется для демонстрации полученных результатов, хотя результаты настоящей работы применимы для любой многопользовательской системы. Характеристика беспроводной системы связи, использующей распределенный декоррелятор, лучше характеристик беспроводной системы связи, использующей централизованный декоррелятор, при медленных замираниях в каналах связи. Для мобильных систем связи с базовой станцией рекомендуется использовать распределенное обнаружение сигналов при наличии множества пользователей. Для мобильных спутниковых систем связи с гладкими замираниями в канале связи предлагается централизованное обнаружение при наличии множества мобильных станций для уменьшения как сложности в архитектуре, так и нагрузки используемой аппаратуры, что приводит к увеличению срока службы аккумуляторных батарей.

References

1. Jinchun Bao, Zcheng Ma, Karagiannidis G.K. Ming Xiao, Zhongliang Zhu. Joint multiuser detection of multidimensional constellation over fading channels. *IEEE Transactions on Communications*. 2017;65(1):504-507.
2. Vempati S.R., Khan H., Tippiarti A. Multiuser detection using particle swarm optimization over fading channels with impulsive noise. *Journal of Communications*. 2016;11(1):23-32.
3. Wang D., Duan T. The multiuser detection under fading channel. *Digital Signal Processing*. 2014;21(1):59-63.
4. Tarokh V., Seshadri N., Calderbank A.R. Space-time codes for high data rate wireless communications: Performance criterion and code construction. *IEEE Transactions on Information Theory*. 1998;44(2):744-765.
5. Alamouti A. A simple transmit diversity technique for wireless communications. *IEEE Journal on Selected Areas of Communications*. 1998;16(8):1451-1458.
6. Moghaddam S.S., Sadeghi H. A new combination of RAKE receiver and adaptive antenna array beamformer for multiuser detection in WCDMA systems. *International Journal of Antennas and Propagation*. 2011. Article ID 208301. Doi:10.1155/2011/208301.
7. Haddad R. BER performance of antenna array-based receiver using multiuser detection in a multipath channel. *International Journal of Wireless & Mobile Networks (IJWMN)*. 2013;5(3):93-102.
8. *Communications systems: new research*. Ed.: V.P. Tuzlukov. New York: NOVA Science Publishers, Inc.; 2013:423.
9. Tuzlukov V.P. *Contemporary issues in wireless communications. Chapter 4: Signal processing by generalized receiver in DS-CDMA wireless communications systems*. Croatia: INTECH; 2014:79-158.
10. Tuzlukov V.P. *Advances in communications and media research. Chapter 6: Detection of spatially distributed signals by generalized receiver using radar sensor array in wireless communication*. New York: NOVA Science Publishers, Inc.; 2015:143-173.
11. Reynolds D., Wang X., Poor H.V. Blind adaptive space-time multiuser detection with multiple transmitter and receiver antennas. *IEEE Transactions on Signal Processing*. 2002;50(6):1261-1276.
12. Bury K. *Statistic distributions in engineering*. Cambridge, U.K.: Cambridge University Press; 1999.
13. Grimmett G.R., Stizaker D.R. *Probability and Random Processes. 2nd Edition*. New York: Oxford University Press, USA; 1992.
14. Papoulis A., Pillai S.U. *Probability, Random Variables and Stochastic Processes. 4th Edition*. New York: McGraw Hill. USA; 2001.
15. Proakis J.G., Salehi M. *Digital Communications. 5th Edition*. New York: McGraw Hill. USA; 2008.

Сведения об авторе

Тузлуков В.П., д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой технической эксплуатации авиационного и радиоэлектронного оборудования Белорусской государственной академии авиации.

Адрес для корреспонденции

220096, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. Уборевича, 77,
Белорусская государственная академия авиации
e-mail: slava.tuzlukov@mail.ru
Тузлуков Вячеслав Петрович

Information about the author

Tuzlukov V.P., D.Sci, Professor, Head of the Technical Maintenance of Aviation and Radio Electronic Equipment Department of the Belarusian State Academy of Aviation.

Address for correspondence

220096, Republic of Belarus,
Minsk, Ubovich str., 77,
Belarusian State Academy of Aviation
e-mail: slava.tuzlukov@mail.ru
Tuzlukov Vyacheslav Petrovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2021-19-1-21-29>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 539.3

МЕТОД МОНТЕ – КАРЛО ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ И АНАЛИЗА ПОВРЕЖДАЕМОСТИ СИЛОВОЙ СИСТЕМЫ

Д.Е. МАРМЫШ^{1,2}, В.И. БОБОЕД¹

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

²Даляньский политехнический университет (г. Далянь, Китайская Народная Республика)

Поступила в редакцию 5 февраля 2020

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2021

Аннотация. Цель работы, результаты которой представлены в статье, заключалась в разработке алгоритмов вычисления повреждаемости твердого тела или системы твердых тел, основанных на методе Монте – Карло и методе аналитического граничного элемента. Метод аналитического граничного элемента был использован для расчета и анализа напряженно-деформированного состояния твердого тела от распределенной поверхностной нагрузки. Основываясь на показателях напряженного состояния, разработаны алгоритмы численной оценки опасного объема и интегральной повреждаемости с применением методов Монте – Карло. Исходя из картины распределения полей напряжений, описана методика определения области для генерации случайным образом узлов интегрирования. Разработаны общие рекомендации по определению границ подобласти, содержащей опасный объем. Исходя из особенностей методов Монте – Карло, проведена численная оценка показателей повреждаемости среды для разного количества узлов интегрирования. Методы и алгоритмы были применены для вычисления опасного объема и интегральной повреждаемости в плоском и пространственном случаях для двух наиболее распространенных законов распределения поверхностных усилий в механике контакта твердых тел: при контактом взаимодействии двух тел несогласованной формы (задача Герца) и при вдавливании абсолютно жесткого штампа в упругую полуплоскость или полупространство. Научная новизна работы состоит в объединении аналитических и численных подходов для количественной оценки показателей повреждаемости силовой (трибофатической) системы. В результате проведенной работы получены количественные показатели опасного объема (в плоском случае – опасной площади) и интегральной повреждаемости полуплоскости и полупространства, отнесенные к величине прикладываемой нагрузки.

Ключевые слова: метод Монте – Карло, метод граничного элемента, напряженно-деформированное состояние, опасный объем, силовая (трибофатическая) система.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Мармыш Д.Е., Бобоед В.И. Метод Монте – Карло для определения и анализа повреждаемости силовой системы. Доклады БГУИР. 2021; 19(1): 21-29.

MONTE CARLO METHOD FOR DETERMINATION AND ANALYSIS DAMAGE OF THE POWER SYSTEM

DZIANIS E. MARMYSH, ULADZISLAVA I. BABAED

¹Belarusian State University (Minsk, Republic of Belarus)

²Dalian University of Technology (Dalian, People's Republic of China)

Submitted 5 February 2020

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2021

Abstract. The purpose of the work, the results of which are presented within the framework of the article, was to develop algorithms for calculating the damage to a solid or a system of solids based on the Monte Carlo method and the analytical boundary element method. The analytical boundary element method was used to calculate and analyze the stress-strain state of a solid under the distributed surface load. Based on indicators of the stress state, the algorithms for numerically assessing the dangerous volume and integral damage using the Monte Carlo methods, have been developed. Based on the pattern of distribution of stress fields, the technique of determining the area for randomly generating integration nodes is described. General recommendations have been developed for determining the boundaries of a subdomain containing a dangerous volume. Based on the features of the Monte Carlo methods, a numerical assessment of the indicators of damage of continuous media for a different number of integration nodes was carried out. Methods and algorithms were used to calculate the dangerous volume and integral damage in the plane and spatial cases for the two most common laws of the distribution of surface forces in the contact mechanics of solids: in case of contact interaction of two non-conformal bodies (Hertz problem) and when a non-deformable rigid stamp is pressed into elastic half-plane or half-space. The scientific novelty of the work is to combine analytical and numerical approaches for the quantitative assessment of damage indicators of the power system. As a result the quantitative indicators of the dangerous volume (in the flat case – the dangerous area) and the integral damage of the half-plane and half-space related to the value of the applied load are obtained.

Keywords: Monte Carlo method, boundary element method, stress-strain state, dangerous volume, power (tribo-fatigue) system.

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

For citation. Marmysh D.E., Babaed U.I. Monte Carlo method for determination and analysis damage to the power system. Doklady BGUIR. 2021; 19(1): 21-29.

Введение

В настоящее время большое количество теоретических и экспериментальных работ в мировой литературе направлены на решение фундаментальной научной проблемы машиноведения, связанной с получением адекватных количественных оценок прочности, живучести и разрушения материалов и конструкций. Трудности в использовании только физических концепций и методов исследования прочности, ресурса и разрушения твердых тел приводят к необходимости разработки математических методов и подходов, основанных на комплексном использовании методов расчета напряженно-деформированного состояния, методов механики повреждаемости, учитывающих особенности нагружения исследуемых объектов и систем, а также условия их эксплуатации. Эксплуатационные условия большинства ответственных технических систем характеризуются многопараметрическими нестационарными механическими воздействиями, влиянием внешних полей различной природы, вследствие чего развиваются различные усталостные процессы в конструкционных материалах и исчерпывается назначенный ресурс конструктивных элементов систем.

В работах [1, 2] разработаны феноменологические подходы к прогнозированию ресурса материала, основанные на вычислении единого показателя интегральной повреждаемости

среды. Конкретные численные значения повреждаемости позволяют дать качественную оценку условиям работы и дать рекомендации по их изменению для рассматриваемой технической системы.

Методы, основанные на адекватном математическом моделировании физических процессов деградации материала, позволяют проанализировать и спрогнозировать развитие поврежденности в любой зоне конструктивных элементов по фактической истории их нагруженности с учетом конструктивных, технологических, эксплуатационных и физических особенностей каждой зоны [3, 4].

Математическая теория повреждаемости среды

Введем механический параметр φ как локальную характеристику повреждаемости среды Ω в точке A и определим его как отношение абсолютного значения действующих напряжений σ в точке A к некоторому предельному напряжению $\sigma^{(*\text{lim})}$, установленному для данного материала¹, т. е.

$$\varphi = \frac{|\sigma|}{\sigma^{(*\text{lim})}}. \quad (1)$$

Выделим элементарный параллелепипед со сторонами dx, dy, dz с центром в точке A . Элементарный опасный объем, соответствующий точке A , определим как функцию параметра φ , определяемого формулой (1):

$$dV = \begin{cases} dx dy dz, & \varphi \geq 1 \\ 0, & \varphi < 1. \end{cases} \quad (2)$$

Интегрирование выражения (2) по всей области Ω определит величину опасного объема, т. е.

$$V = \int_{\Omega} dV. \quad (3)$$

Таким образом, получаем, что опасный объем – это область рассматриваемой среды, в каждой точке которой величина напряжений σ превышает предельные напряжения $\sigma^{(*\text{lim})}$. Также введем понятие повреждаемости Ψ среды как интегральную характеристику вероятности появления и дальнейшего распространения первичных разрушений среды:

$$\Psi = \int_{\Omega} \varphi dV. \quad (4)$$

В работе [2] разработана концепция тела с опасным объемом, обсуждается вопрос о вероятностном понимании повреждаемости и описываются критериальные условия для ограничения опасных объемов в силовых (трибофатических) системах.

Считая, что действующие напряжения σ определяются функцией радиус вектора \mathbf{x} , т. е. $\sigma = f(\mathbf{x})$, тогда при вычислении опасного объема приходим к неравенству

$$\sigma = f(\mathbf{x}) \geq \sigma^{(*\text{lim})}. \quad (5)$$

При рассмотрении пространственных задач о напряженно-деформированном состоянии интегралы (3) и (4) берутся по трехмерной области Ω , напряжения в каждой точке которой удовлетворяют неравенству (5). Для (3) и (4) получить аналитическое выражение в общем виде не представляется возможным, во-первых, из-за сложности функции $f(\mathbf{x})$ в неравенстве (5),

¹ Мармыш Д.Е. Численно-аналитическое моделирование напряженно-деформированного состояния и повреждаемости механической системы, работающей в условиях контактного взаимодействия и изгиба: дис. ... канд. физ.-мат. наук. Минск; 2018:77.

по которой вычисляются действующие напряжения в точке среды исходя из принятой теории прочности; во-вторых, в силу сложной геометрии поверхности области, содержащей опасный объем, вид и аналитическая форма которой заранее неизвестны. На рис. 1 представлена геометрия опасного объема, возникающего при контактном взаимодействии в системе ролик – вал [5].

Аналитическое определение расположения опасного объема позволяет выработать оптимальные режимы обработки, упрочнения материала всех составляющих элементов системы. Кроме того, как показано в работе [6], определение величины опасного объема и повреждаемости позволяет проводить оптимизацию условий эксплуатации путем добавления дополнительной нагрузки в системе с целью уменьшения количественных показателей повреждаемости, уменьшения градиента напряжений и рассредоточения опасного объема в большей части рабочего объема тела.

Интегрирование методом Монте – Карло

В пространственном случае задача о вычислении повреждаемости среды сводится к вычислению интегралов (3) и (4) кратности три от единичной функции или от функции локальной повреждаемости (1). Как уже отмечалось ранее, получить аналитическое выражение для опасного объема и интегральной повреждаемости в общем случае не представляется возможным, поэтому для вычисления интегралов (3) и (4) применяют различные численные процедуры, одними из которых являются методы Монте – Карло или квази Монте – Карло.

Рассмотрим интеграл от функции $f(\mathbf{x}) = f(u_1, u_2, \dots, u_r)$, зависящей от r переменных u_1, u_2, \dots, u_r и определенной на единичном гиперкубе $H^r = [0, 1]^r$. Оценка интеграла от функции $f(\mathbf{x})$ методом Монте – Карло сходится к своему точному значению [7]

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N f(\mathbf{x}^{(n)}) = \int_{H^r} f(\mathbf{x}) d\mathbf{x} = \int_0^1 \dots \int_0^1 f(u_1, \dots, u_r) \prod_{j=1}^r du_j. \quad (6)$$

Кроме того, выполняется равенство

$$\frac{1}{N} \int_{H^r} [f(\mathbf{x}) - I]^2 d\mathbf{x} = \frac{\sigma^2(f)}{N}, \quad (7)$$

где $\sigma(f)$ – среднеквадратическое отклонение.

Методы Монте – Карло обеспечивают точность порядка C/\sqrt{N} , где N – число узлов интегрирования, поэтому основное внимание направляется на выбор такой модели, в которой константа C в оценке C/\sqrt{N} была бы как можно меньше. Для этого строятся различные способы ускорения, использующие те или иные свойства интегрируемой функции [8]. В частности, при вычислении опасного объема и интегральной повреждаемости предварительно проводится исследование напряженного состояния и распределения напряжения, по которому считается повреждаемость вдоль координатных осей. Исходя из выбранного значения предельного напряжения $\sigma^{(*\text{lim})}$, определяются размеры трехмерной области, из которой в дальнейшем будут случайным образом генерироваться координаты узлов интегрирования. В работе [9] показано, что при вычислении повреждаемости полупространства от эллиптически распределенного давления по интенсивности напряжений и при уровне предельных напряжений $\sigma^{(*\text{lim})} = 0,27 p_0$ (p_0 – значение контактного давления в центре эллиптической площадки), величину области генерации узлов интегрирования вдоль оси Oz целесообразно брать не более чем $z/a = 1,5$, где a – большая полуось эллипса. Исходя из рис. 2 пределы интегрирования в формулах (3) и (4) вдоль оси Oz необходимо брать от 0 до $z/a = 1,5$.

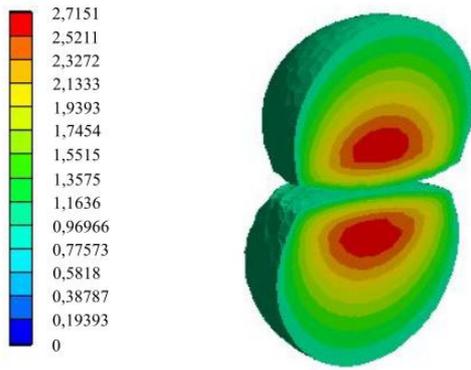


Рис. 1. Геометрия опасного объема в системе ролик – вал
Fig. 1. Dangerous volume geometry in the roller / shaft system

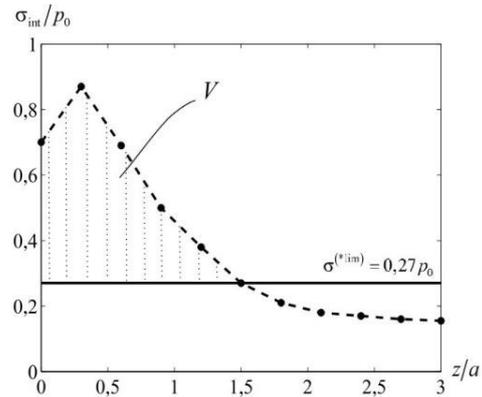


Рис. 2. Распределение интенсивности напряжений вдоль оси Oz
Fig.2. The distribution of stress intensity along the Oz -axis

Повреждаемость в плоской задаче теории упругости

При анализе повреждаемости и вычислении ее количественных показателей необходимо предварительно рассчитать напряженно-деформированное состояние твердого тела. Рассмотрим тело Ω с границей ω и расположенное в плоскости Oxy . По границе ω распределена поверхностная нагрузка $p(s)$. Для вычисления компонент тензора напряжений в точке $A \in \Omega \cup \omega$ воспользуемся известными формулами метода граничных интегральных уравнений:

$$\sigma_{ij}(A) = \int_G p(\xi) G_{ij}(s - \xi) d\xi, \quad i, j = \{1, 2\}, \quad (8)$$

где $G_{ij}(s)$ – фундаментальные решения для сосредоточенной силы.

При произвольном распределении усилий $p(s)$ интегрирование выражений (8) в аналитической форме затруднительно, поэтому для получения численных значений напряжений в точке A к (8) можно применить различные численные и/или численно-аналитические методы вычислений. Воспользуемся методом аналитического граничного элемента (ГЭ), развитого в работах [9, 10].

Таким образом, алгоритм определения величин опасного объема и интегральной повреждаемости в твердом теле состоит из следующих этапов:

1) разбиение границы ω с распределенной по ней нагрузкой $p(s)$ на n ГЭ и аппроксимация на каждом из них кусочно-непрерывным распределением $p_k(s)$;

2) определение напряженного состояния в точке $A(x_A, y_A) \in \Omega \cup \omega$ от действия нагрузки по каждому ГЭ;

3) суммирование действий по каждому из n граничных элементов;

4) генерация случайным образом точек $M_i(x_i, y_i)$ ($i = 1, 2, \dots, N$) из области $D = \{(x, y) : x_1 \leq x \leq x_2; y_1 \leq y \leq y_2\}$, в которой содержится опасный объем V ;

5) определение количества точек K , в которых действующие напряжения $\sigma^{(i)}$ превышают предельные $\sigma^{(*\text{lim})}$ ($K < N$).

После выполнения п. 1–5 можно найти величину опасного объема и повреждаемости по формулам:

$$V = K \cdot dV, \quad \Psi = dV \cdot \sum_{i=1}^K \frac{\sigma^{(i)}}{\sigma^{(*\text{lim})}}, \quad dV = \frac{(x_2 - x_1) \cdot (y_2 - y_1)}{N}. \quad (9)$$

Как уже было отмечено ранее, для определения границ области D , в которой содержится опасный объем, необходимо провести анализ распределения напряжений и вычислить границы, за которыми действующие напряжения не превышают предельные. От точности определения границ, согласно (7), зависит скорость сходимости численного результата к точному.

Описанный алгоритм был применен для вычисления повреждаемости в двух наиболее распространенных случаях распределения давления в механике упругого контакта: $p(x) = p_0 \sqrt{1 - x^2/a^2}$ и $p(x) = p_0 / \sqrt{1 - x^2/a^2}$, где p_0 – давление в центре области взаимодействия, a – длина полуоси контактного отрезка [11]. Распределение первого вида возникает при контактом взаимодействии двух твердых тел несогласованной формы, распределение второго вида – при вдавливании абсолютно жесткого штампа в упругую полуплоскость. Отрезок $[-a, a]$ распределения поверхностных усилий разбивался на 20 ГЭ, на каждом из которых функция $p(x)$ аппроксимировалась равномерным распределением, вычисленным в центре элемента. На рис. 3 и 4 представлены графики значений опасного объема и повреждаемости в силовой (трибофатической) системе в зависимости от количества узлов интегрирования N , вычисленные по эквивалентным напряжениям (по Мизесу) и отнесенные к величине полной нагрузки, которая равна $P = \pi p_0 a / 2$ для случая несогласованного контакта и $P = \pi p_0 a$ – для случая вдавливания жесткого штампа. Для обоих случаев значение предельного напряжения бралось равным $\sigma^{(lim)} = 0,27 p_0$.

Для сравнения полученных методом Монте – Карло результатов также проводилось вычисление путем построения двумерной регулярной сетки по области $D = \{(x, y) : x_1 \leq x \leq x_2, y_1 \leq y \leq y_2\}$ с шагами $h_x = 0,1a$ и $h_y = 0,1a$ вдоль осей Ox и Oy соответственно. Численные характеристики повреждаемости получены с точностью $\delta/a^2 = 0,01$ и равны:

- 1) для случая несогласованного контакта двух твердых тел $V/P = 11,86$, $\Psi/P = 21,45$;
- 2) для случая вдавливания жесткого штампа в упругую полуплоскость $V/P = 27,25$, $\Psi/P = 49,44$.

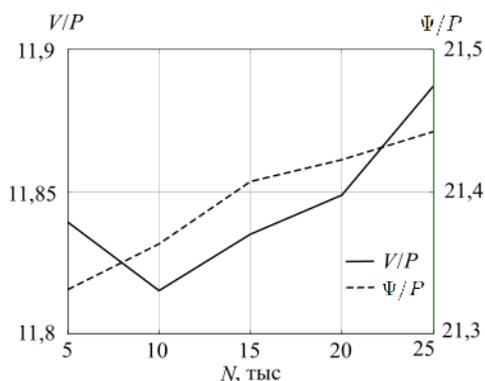


Рис. 3. Опасный объем и повреждаемость для случая несогласованного контакта
Fig. 3. Dangerous volume and damageability for non-conformal contact case

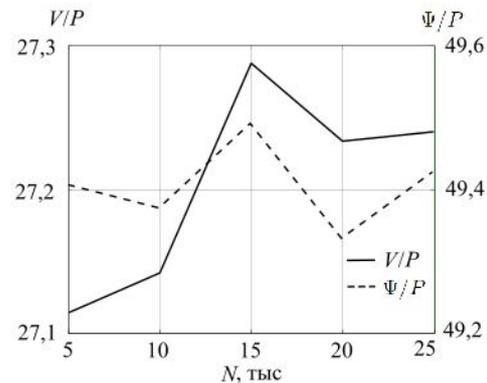


Рис. 4. Опасный объем и повреждаемость для случая вдавливания жесткого штампа
Fig. 4. Dangerous volume and damageability for rigid stamp interaction cases

Повреждаемость для пространственного случая

Рассмотрим задачу о напряженном состоянии упругого полупространства с равномерно распределенной нагрузкой по прямоугольной области $\Omega = \{(x, y) : x_1 \leq x \leq x_2, y_1 \leq y \leq y_2\}$ и направленной вдоль оси Oz . Дальнейший анализ будем проводить, взяв в качестве расчетных нормальные напряжения σ_{zz} . В работе [12] получены аналитические формулы для определения

всех компонент тензоров напряжений и деформаций в случае равномерно распределенной по прямоугольной области нагрузки. Для вычисления количественных характеристик опасного объема и повреждаемости можно применить шаги 4 и 5 алгоритма, описанного в предыдущем пункте, с той лишь разницей, что генерация узлов интегрирования $M(x_i, y_i, z_i)$ ($i = 1, \dots, N$) будет проходить из параллелепипеда $D = \{(x, y, z) : x_1 \leq x \leq x_2; y_1 \leq y \leq y_2; z_1 \leq z \leq z_2\}$, в котором содержится опасный объем V . На рис. 5 и 6 представлены графики опасного объема и интегральной повреждаемости полупространства от равномерно распределенной по квадрату со стороной $2a$ нагрузки интенсивности p_0 , вычисленные по нормальным напряжениям σ_{zz} и эквивалентным (по Мизесу) напряжениям σ_{eqv} соответственно. В качестве предельного напряжения бралась величина $\sigma^{(lim)} = 0,27 p_0$ ($P = p_0 a^2$).

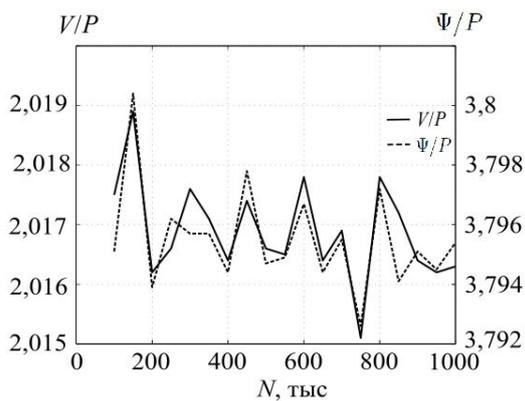


Рис. 5. Опасный объем и повреждаемость для нормальных напряжений
Fig. 5. Dangerous volume and damageability for normal stress

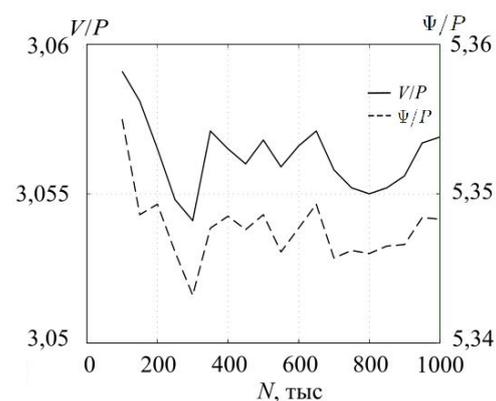


Рис. 6. Опасный объем и повреждаемость для эквивалентных (по Мизесу) напряжений
Fig. 6. Dangerous volume and damageability for equivalent (von Mises) stress

Согласно закону больших чисел, численные значения интеграла, полученные методом Монте – Карло, сводятся к точному значению при увеличении числа наблюдений N . Из рис. 5, 6 видно, что с увеличением количества расчетных точек относительный разброс в значениях опасного объема и интегральной повреждаемости уменьшается. Если в качестве расчетного количества взять 250 тысяч и более точек, то относительная разница между вычисленными значениями для опасного объема составляет не более 0,2 % и не более 0,1 % для интегральной повреждаемости. Таким образом, можно утверждать об эффективности использования метода Монте – Карло для оценки количественных показателей повреждаемости твердого тела, не прибегая к построению упорядоченных сеток по областям, содержащим опасный объем.

Заключение

При анализе повреждаемости твердого тела или системы твердых тел в общем случае невозможно получить аналитические выражения для опасного объема и интегральной повреждаемости, поэтому необходимо применение численных подходов. В работе показано, что метод Монте – Карло вместе с методом аналитического граничного элемента является эффективным методом для количественной оценки показателей повреждаемости. Главным недостатком метода Монте – Карло является медленная сходимость численного результата к точному, поэтому, прежде чем приступить непосредственно к вычислению повреждаемости, необходимо провести тщательный анализ напряженно-деформированного состояния тела или системы тел. В работе разработана методика и алгоритмы применения метода Монте – Карло для интегрирования показателей повреждаемости и использованы в плоском и пространственном случаях.

Список литературы

1. Щербаков С.С., Сосновский Л.А. *Механика трибофатических систем*. Минск: БГУ; 2011.
2. Sosnovskiy L.A. *Tribo-Fatigue. Wear-Fatigue Damage and its Prediction Series: Foundations of Engineering Mechanics*. Springer; 2005.
3. Митенков Ф.М., Большухин М.А., Козин А.В., Коротких Ю.Г., Панов В.А., Пахомов В.А., Каплиенко А.В. Методология оценки ресурса оборудования и систем реакторной установки на базе механики поврежденной среды. *Проблемы прочности*. 2013;4:83-90.
4. Петрунин В.В., Фадеев Ю.П., Панов В.А., Пахомов А.Н., Полуничев В.И., Голубева Д.А. Продление срока эксплуатации и повышение безопасности судовых реакторных установок. *Атомная энергия*. 2013;6:328-333.
5. Мармыш Д.Е. Пространственное напряженно-деформированное состояние и объемная повреждаемость системы «ролик – вал». *Актуальные вопросы машиноведения*. 2015;4:248-251.
6. Щербаков С.С. Оптимизация объемной повреждаемости полупространства, нагруженного эллиптически распределенным контактным давлением и неконтактными напряжениями. *Механика машин, механизмов и материалов*. 2018;4:96-100.
7. Rubinstein R.Y., Kroese D.P. *Simulation and the Monte Carlo method*. 3rd edition. Wiley; 2016.
8. Гельфанд И.М., Фролов А.С., Ченцов Н.Н. Вычисление континуальных интегралов методом Монте – Карло. *Известия вузов. Математика*. 1958;5:32-45.
9. Мармыш Д.Е. Численно-аналитический метод граничных элементов в плоской контактной задаче теории упругости. *Приложение к журналу «Весті НАНБ»*. 2013;3:42-46.
10. Мармыш Д.Е. Численное моделирование повреждаемости силовой системы. *Теоретическая и прикладная механика*. 2017;32:312-316.
11. Popov V. *Contact mechanics and friction. Physical principles and applications*. Springer; 2010.
12. Щербаков С.С. Определение трехмерного напряженно-деформированного состояния полупространства при действии эллиптически распределенных нормальных и касательных усилий на основе точных решений для равномерной нагрузки. *Весті НАНБ*. 2012;3:50-56.

References

1. Sherbakov S.S., Sosnovskij L.A. [*Mechanics of tribofatigue systems*]. Minsk: BSU; 2011. (in Russ)
2. Sosnovskiy L.A. *Tribo-Fatigue. Wear-Fatigue Damage and its Prediction Series: Foundations of Engineering Mechanics*. Springer; 2005.
3. Mitenkov F.M., Bolshuhin M.A., Kozin A.V., Korotkih Y.G., Panov V.A., Pakhomov A.N., Kaplienko A.V. [Methodology for assessing the resource of equipment and systems of a reactor installation based on the mechanics of a damaged environment]. *Problemy prochnosti = Strength issues*. 2013;4:83-90. (in Russ)
4. Petrunin V.V., Fadeev Y.P., Panov V.A., Pakhomov A.N., Polunichiev V.I., Golubeva D.A. [Service life extension and safety enhancement of ship reactors]. *Atomnaya energiya = Atomic energy*. 2013;6:328-333. (in Russ)
5. Marmysh D.E. [Spatial stress-strain state and volumetric damage to the roller – shaft system]. *Aktual'nye voprosy mashinovedeniya = Actual issues of engineering*. 2015;4:248-251. (in Russ)
6. Sherbakov S.S. [Optimization of volumetric damage to a half-space loaded with elliptically distributed contact pressure and non-contact stresses]. *Mekhanika mashin, mekhanizmov i materialov = Mechanics of machines, mechanisms and materials*. 2018;4:96-100. (in Russ)
7. Rubinstein R.Y., Kroese D.P. *Simulation and the Monte Carlo method*. 3rd edition. Wiley; 2016.
8. Gelfand I.M., Frolov A.S., Chencov N.N. [Monte Carlo Calculation of Continual Integrals]. *Izvestiya vuzov. Matematika*. 1958;5:32-45. (in Russ)
9. Marmysh D.E. [The numerical-analytical method of boundary elements in a plane contact problem of the theory of elasticity]. *Prilozhenie k zhurnalu «Vesci NANB» = Appl. to «Proceedings of the NASB»*. 2013;3:42-46. (in Russ)
10. Marmysh D.E. [Numerical simulation of damage to the power system]. *Teoreticheskaya i prikladnaya mekhanika = Theoretical and applied mechanics*. 2017;32:312-316. (in Russ)
11. Popov V. *Contact mechanics and friction. Physical principles and applications*. Springer; 2010.
12. Sherbakov S.S. [Determination of three-dimensional stress-strain state of half-space under the action of elliptically distributed normal and tangential forces based on exact solutions for uniform load]. *Vesci NANB = Proceedings of the NASB*. 2012;3:50-56. (in Russ)

Вклад авторов

Мармыш Д.Е. сформулировал задачу вычисления повреждаемости среды, разработал метод дискретизации распределенной нагрузки и применил его для вычисления напряженно-деформированного состояния твердого тела.

Бобоед В.И. разработала алгоритм вычисления показателей повреждаемости, основанный на методе Монте – Карло, и провела компьютерное моделирование в плоском и пространственном случаях.

Authors' contribution

Marmysh D.E. formulated the problem of calculating the damageability of the medium, developed the method of discretization of the distributed load and applied it to calculate the stress-strain state of a solid body.

Babaed U.I. developed an algorithm for calculating the damageability indicators based on the Monte Carlo method and performed the computer modeling in plane and spatial cases.

Сведения об авторах

Мармыш Д.Е., к.ф.-м.н., доцент кафедры теоретической и прикладной механики Белорусского государственного университета; заместитель директора Совместного института ДПУ-БГУ Даляньского политехнического университета.

Бобоед В.И., магистрант механико-математического факультета Белорусского государственного университета.

Information about the authors

Marmysh D.E., PhD, Associate Professor of the Theoretical and Applied Mechanics Department of the Belarusian State University; vice-director of the DUT-BSU Joint Institute of the Dalian University of Technology.

Babaed U.I., Master Student of the Mechanics and Mathematics Faculty of the Belarusian State University.

Адрес для корреспонденции

220030, Республика Беларусь,
г. Минск, пр-т Независимости, 4, каб. 357,
Белорусский государственный университет
тел. +375-29-878-69-16;
e-mail: marmyshdenis@mail.ru
Мармыш Денис Евгеньевич

Address for correspondence

220030, Republic of Belarus,
Minsk, Nezavisimisti ave., 4, room 357,
Belarusian State University
tel. +375-29-878-69-16;
e-mail: marmyshdenis@mail.ru
Marmysh Dzianis Evgenievich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2021-19-1-30-36>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 004.514: 004:055

А/В ТЕСТИРОВАНИЕ КАК ЭФФЕКТИВНОЕ СРЕДСТВО ДЛЯ АДАПТАЦИИ ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКОГО ИНТЕРФЕЙСА ПРИ ИТЕРАЦИОННОЙ МОДЕЛИ РАЗРАБОТКИ ПРИЛОЖЕНИЙ ДЛЯ МОБИЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

Ю.Г. ПАВЛОВИЧ, И.Ф. КИРИНОВИЧ

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

Поступила в редакцию 12 февраля 2020

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2021

Аннотация. Изменение пользовательского интерфейса всегда влечет риски уменьшения эргономики приложения и оттока пользователей. Целью данной работы является поиск методов изменения пользовательского интерфейса без ущерба удобству пользования и увеличению количества активных пользователей. При помощи Alpha/Beta тестирования и анализа метрик приложения возможно включить проектирование в каждую итерацию и удаленно управлять конфигурацией приложения, что позволяет улучшать пользовательский интерфейс приложения. В статье предложен способ интеграции этапа изменения пользовательского интерфейса и адаптации в итеративную модель разработки программных средств, а также описаны успешно проведенные опыты улучшения пользовательского интерфейса, которые позволили улучшить метрики приложения. В данной работе была выделена проблема недостаточной информативности и контроля за покупками пользователя, что негативно влияло на количество покупок. Выдвинута гипотеза о том, что пользователь должен иметь эффективный инструмент визуализации и контроля в приложении. В результате проведения эксперимента гипотеза была подтверждена увеличением количества покупок и активностью пользователей. В приложении также существовала проблема безопасности данных, что подвергало риску потери данных пользователей. Был проведен эксперимент по изменению значения по умолчанию пользовательской настройки, что привело к увеличению положительных метрик использования функционала резервации данных. Также рассмотрена проблема опроса пользователей, что является важной составляющей в процессе улучшения эргономики приложения. Была использована методика удаленного опроса пользователей, что позволило получать быструю обратную связь от пользователей и быстро реагировать на их запросы. Результатом работы является подтверждение гипотезы изменения пользовательского интерфейса в циклах итеративной модели разработки, положительная динамика метрик приложения, а также удовлетворение пользователей изменениями.

Ключевые слова: А/В тестирование, пользовательский интерфейс, итерационная модель разработки, мобильные устройства, аналитика.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Павлович Ю.Г., Киринович И.Ф. А/В тестирование как эффективное средство для адаптации пользовательского интерфейса при итерационной модели разработки приложений для мобильных устройств. Доклады БГУИР. 2021; 19(1): 30-36.

A/B TESTING AS AN EFFECTIVE INSTRUMENT FOR ADAPTATION OF THE USER INTERFACE AT THE ITERATIVE MODEL OF DEVELOPING APPLICATIONS FOR MOBILE DEVICES

YURY G. PAVLOVICH, IRYNA F. KIRYNOVICH

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

Submitted 12 February 2020

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2021

Abstract. Changing the user interface always entails risks of decreasing application ergonomics and user churn. The purpose of this work is to find methods for changing the user interface without the need to use and increase the number of active users. Using Alpha / Beta testing and analysis of application metrics, it is possible to include design in each iteration and remotely manage the application configuration, which improves the user interface of the application. The way to integrate the UI modification and adaptation phase into an iterative software development model is proposed in this article. The successful user interface improvement experiments that have improved application metrics are described. In this work, the problem was highlighted, lack of information and control over user purchases, which negatively affected the number of purchases. A hypothesis is put forward that the user must have an effective visualization and control tool in the application. As a result of the experiment, the hypothesis was confirmed by an increase in the number of purchases and user activity. There was also a data security issue in the application, which put users at risk of data loss. An experiment was conducted to change the default value of user settings, which led to an increase of the positive metrics for using the data reservation functionality. The problem of polling users is also considered, which is an important component in the process of improving the ergonomics of an application. The method of remote user polling was used, which allowed to receive quick feedback from users and quickly respond to requests from users. The result of the work is the confirmation of the hypothesis of changes in the user interface in the cycles of the iterative development model, the positive dynamics of application metrics, as well as the satisfaction of users with the changes.

Keywords: A/B testing, user interface, iterative development model, mobile devices, analytics.

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

For citation. Pavlovich Y.G., Kirynovich I.F. A/B testing as an effective instrument for adaptation of the user interface at the iterative model of developing applications for mobile devices. Doklady BGUIR. 2021; 19(1): 30-36.

Введение

Существенную роль в процессе адаптации могут играть две сущности: система и пользователь. В случае адаптивного дизайна пользовательского интерфейса для мобильного приложения адаптация системы должна быть в максимально возможной степени перенесена на сторону системы с точки зрения прозрачности процесса адаптации. Таким образом, система или приложение должны управлять информацией таким образом, чтобы уменьшить сложность и стремиться к невидимости самой вычислительной системы [1].

Можно выделить три основных класса адаптации мобильных приложений [2]:

1. Информация включает в себя адаптацию контента приложения, его макет и организацию.
2. Визуализация включает в себя способ представления информации.
3. Пользовательский интерфейс включает в себя адаптацию элементов управления пользовательского интерфейса и взаимодействие между пользователем и системой.

Основной целью адаптации пользовательского интерфейса для мобильных приложений является создание эргономичного пользовательского интерфейса [3]. Кроме того, интерфейс должен реагировать на изменяющуюся среду и смягчать ограничения мобильных устройств.

Проектирование интерфейса является неотъемлемой частью в итерационной модели разработки приложений. Практически на каждой итерации данной модели происходит введение нового функционала с новым интерфейсом либо улучшается предыдущий. Основной целью улучшения интерфейсов является сортировка их свойств по приоритетам, т. е. определение наиболее критичных свойств тестируемого интерфейса, наиболее важных для улучшения пользовательского интерфейса. Для этого проводится разбиение проблем по приоритетам. В связи с приоритетами предлагаются альтернативы улучшения пользовательского интерфейса, формируется документ, в котором описаны технические требования по изменению пользовательского интерфейса. Данные требования реализуются на этапе разработки и тестирования программного средства.

Методика проведения эксперимента

Была выделена проблема информативности для пользователя: чем больше информации мы даем пользователю, тем более он вовлечен в процесс использования приложения. Данная концепция позволяет увеличить использование функционала приложения путем подачи пользователю дополнительного функционала по контролированию и статистике данных.

В качестве объекта был выделен модуль покупок, в который входила только покупка некоторых сервисов. Была выделена проблема, которая заключалась в том, что пользователь должен иметь эффективный инструмент визуализации и контроля за текущими покупками.

В качестве эксперимента была выбрана текущая версия приложения, в качестве тестируемой – версия с новым функционалом (рис. 1). Эксперимент был произведен на всей выборке пользователей (20 млн человек) путем дисперсии пользователей на тестируемых с процентным соотношением 50 на 50 % тестируемых.

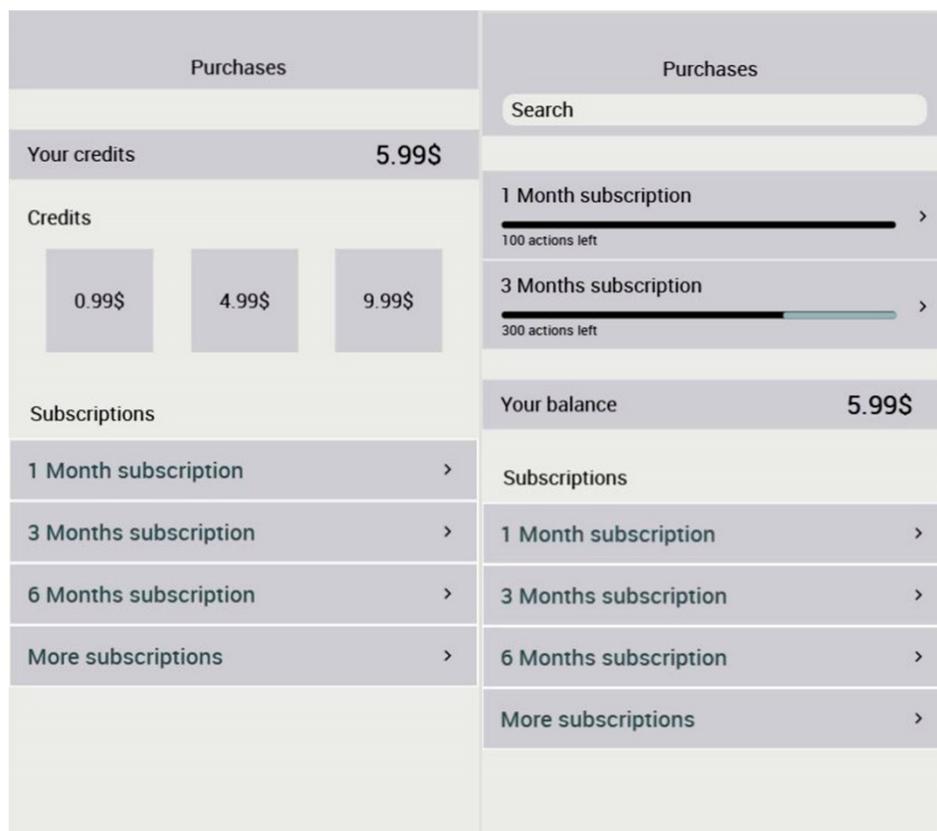


Рис. 1. Эксперимент добавления статистики использования сервиса
Fig. 1. Experiment adding service usage statistics

В качестве метрики улучшения функционала были выбраны такие параметры, как количество приобретаемых покупок, а также активность использования функционала. Результатом данного эксперимента было увеличение платных подписок на сервис на 55 %, что является положительным и успешным результатом. Данный эксперимент был прекращен, и новый функционал вошел в новую версию приложения, став основным вариантом использования приложения.

За объект другого эксперимента был принят функционал, который позволяет сохранить данные пользователя в случае критических ошибок. Решалась проблема, состоящая в том, что пользователь по причине недостаточной информированности терял данные, в результате приложение получало негативные отзывы, что отрицательно сказывалось на общем впечатлении о приложении.

В качестве гипотезы была выделена проблема перекладывания ответственности стандартного поведения на плечи разработчиков без ущерба текущему функционалу. С целью выбора стандартного поведения было произведено изменение со значения «выключено» на «еженедельно» (рис. 2).

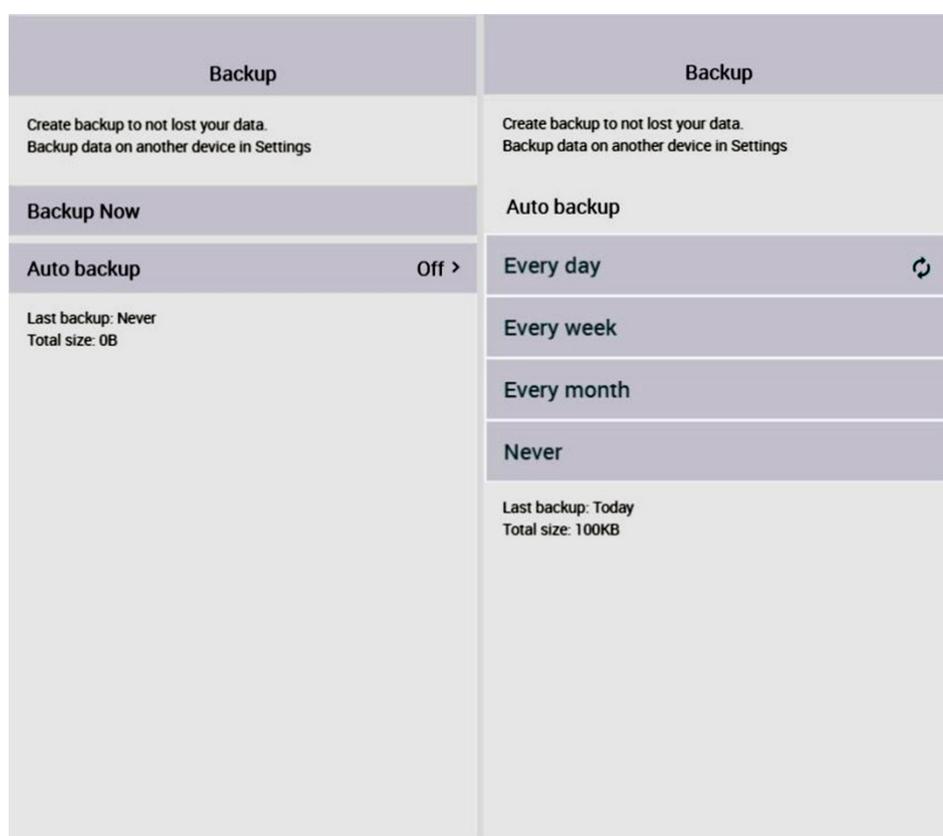


Рис. 2. Стандартное значение в текущем функционале
Fig. 2. Standard value in current functionality

В качестве метрик были выделены такие показатели, как использование текущего функционала, а также реакция пользователей на данное изменение. В качестве метрики для параметра использования функционала была выбрана система аналитики данных. Результатом данной метрики является увеличение использования функционала сохранения данных в 35 раз (рис. 3), что является положительным критерием. Также был выявлен скачок использования функционала по загрузке сохраненных данных в 2 раза (рис. 4), что не было основной целью данного эксперимента, однако также является успешным критерием при оценке результатов данного эксперимента.

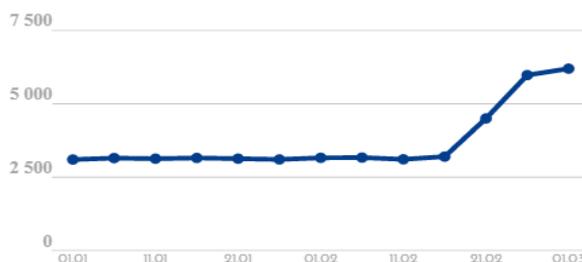


Рис. 3. Графики использования функционала приложения загрузки данных
Fig. 3. Graphs of using the data loading application functionality

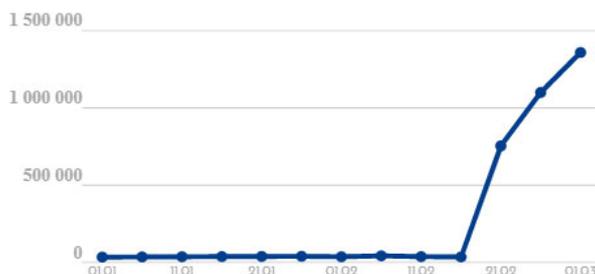


Рис. 4. Графики использования функционала приложения сохранения данных
Fig. 4. Application graphs for saving data

Результатом данного эксперимента стало увеличение использование функционала, которое было определено разработчиком, без ущерба пользователю. Положительным критерием является отсутствие негативных отзывов пользователей по данному функционалу.

Опрос пользователей является эффективным методом для вовлечения конечных пользователей в развитие продукта, а также обратная реакция на изменения. Технической реализацией данного решения было использование системной библиотеки iOS SDK `SKStoreReviewController.requestReview()` [4]. У пользователя на экране мобильного устройства показывается нативное окно для быстрого опроса по поводу лояльности и удобства программного продукта (рис. 5).

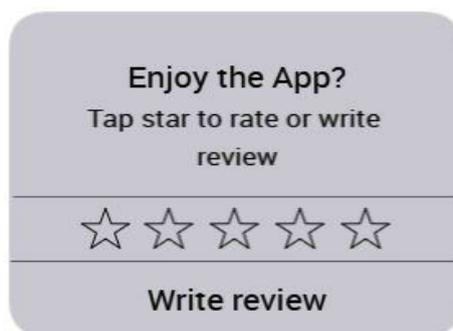


Рис. 5. Экран опроса пользователя
Fig. 5. User review poll screen

Перенос ответственности этапа ревью на пользователя может показаться слишком навязчивым, отчего оценки и отзывы приложения могут пострадать. Решением данной проблемы является применение логики показов.

Выборка пользователей для показа экрана основана на персональной активности, которая базируется на аналитических метриках использования различного функционала приложения. За логику показов экрана опроса был выбран аналитический сервис Braze [5]. На базе данных активности пользователя были выбраны критерии выборки пользователей, которые возвращают активных пользователей, данные пользователи были уведомлены через сервис.

Данный метод оптимизации помог увеличить количество отзывов и оценок на приложение, увеличив тем самым пользовательскую вовлеченность в развитие проекта, а также улучшил обратную связь. Данный метод позволил уменьшить себестоимость процесса опроса пользователей, а также количество данных, получаемых извне.

Результаты и их обсуждение

В данной работе представлен эксперимент по улучшению функционала модуля покупки. В качестве решения было предложено улучшить визуальную и информационную составляющие интерфейса отображения текущих покупок пользователя. Данное решение позволило увеличить количество покупок в приложении более чем на 50 %. Также была рассмотрена проблема безопасности данных пользователей и реализовано решение по изменению стандартного поведения приложения в пользу более безопасного.

В результате эксперимента использование функционала сохранения данных увеличилось в 35 раз, а также был выявлен скачок использования функционала по загрузке сохраненных данных в 2 раза, что положительно сказалось на безопасности данных пользователей. Важным критерием также является отсутствие негативных отзывов от пользователей.

Была произведена оптимизация этапа анализа полученных результатов, посредством которой был внедрен механизм опроса пользователей, который позволил уменьшить его себестоимость и улучшить количественные показатели вовлеченности пользователей в проведение оценки и развитие проекта.

Заключение

Исследования пользовательского интерфейса достигают своего полного потенциала, когда количественные и качественные методологии объединяются, чтобы обеспечить представление о поведении, перспективах и ожиданиях пользователей. Такие разнообразные исследовательские эксперименты в разработке пользовательского интерфейса помогают реализовать концепцию итеративной разработки, когда разработка продуктов и услуг подвергается повторяющемуся, ориентированному на пользователя процессу построения, тестирования, анализа и итерации. Процесс изменения пользовательского интерфейса приложения при помощи А/В-тестирования, описанный в данной работе, представляет собой эксперименты над элементами пользовательского интерфейса, который позволяет оперативно принимать решения и изменять приложение в циклах разработки. В целом А/В-тестирование оказалось эффективным методом сбора пользовательских данных и улучшения работы пользователей приложения, предлагая метод ответов на вопросы при разработке пользовательского интерфейса. Процесс А/В-тестирования в конечном счете представляет собой ценную форму наблюдения, где известные проблемы пользовательского интерфейса продуктивно информируются теми пользователями, которые напрямую взаимодействуют с приложением.

В статье были предложены контролируемые эксперименты по изменению функционала и пользовательского интерфейса приложения. Были собраны метрики по использованию данного функционала, получена положительная динамика, что показывает успешность эксперимента. Используя эмпирические данные в исследовании, А/В тестирование позволяет развивать приложение с контролем его качества путем сбора метрик, анализа полученных данных и делать выводы о полезности проделанной работы. А/В тестирование предоставляет возможность добавлять новый функционал в приложение, делать функционал более гибким в зависимости от пользователя, изменять удаленно дизайн и функционал приложения. Удаленный опрос пользователя показал себя как хороший инструмент получения обратной связи от пользователей. Опрос рейтинга внутри приложения, среди выборки активных пользователей по аналитическим метрикам, помогает увеличивать количество опрошенных пользователей, ускоряет обратную связь и позволяет следить за общей оценкой приложения и быстро реагировать на ее изменение.

Таким образом, А/В тестирование является мощным и полезным инструментом в разработке мобильных приложений и пользовательских интерфейсов, позволяющим контролировать изменение пользовательского интерфейса и минимизировать риск ошибочных решений, а также получать обратную связь непосредственно от пользователей.

Список литературы / References

1. Weiss S. *Handheld Usability*. New York: John Wiley & Sons, Inc., NY, USA; 2002. ISBN 0470844469.
2. Cena F., Console L., Gena C., Goy A., Levi G. Integrating heterogeneous adaptation techniques to build a flexible and usable mobile tourist guide. *AI Commun.* 2006:1-17.
3. Wesson J.L., Singh A., Van Tonder B. Can Adaptive Interfaces Improve the Usability of Mobile Applications? *Human-Computer Interact.* 2010:187-198.
4. Киринович И.Ф., Антюшеня Д.В., Яшин К.Д. Исследование зависимости индекса потребительской лояльности веб-приложения от эргономических параметров и удобства использования интерфейса. *Доклады БГУИР*. 2018;(1):30-36. Kirinovich I.F., Antsiushenia D.V., Yashin K.D. Research of the net promoter score dependence on ergonomic parameters and usability for web-application. *Doklady BGUIR = Doklady BGUIR*. 2018;(1):30-36. (In Russ.)
5. Abel F., Gao Q., Houben G., Tao K. Twitter-based user modeling for news recommendations. *In IJCAI'13*. P. 2962-2966.

Вклад авторов

Павлович Ю.Г. осуществила проектирование и выполнила разработку части приложения для проведения исследования адаптации пользовательского интерфейса.

Киринович И.Ф. провела поиск научной литературы предметной области, подготовила статью к опубликованию.

Authors' contribution

Pavlovich Y.G. designed and developed the part of the application for conducting user interface adaptation research.

Kirynovich I.F. fulfilled the search for scientific literature of the subject area, prepared the article for publication.

Сведения об авторах

Павлович Ю.Г., м.т.н., аспирант кафедры инженерной психологии и эргономики Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Киринович И.Ф., к.ф.-м.н., доцент кафедры инженерной психологии и эргономики Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Information about the authors

Pavlovich Y.G., M.Sci, PhD student of the Engineering Psychology and Ergonomics Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Kirinovich I.F., PhD, Associate Professor of the Engineering Psychology and Ergonomics 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. +375-29-317-75-66;
e-mail: kirinovich@bsuir.by
Киринович Ирина Федоровна

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka str., 6,
Belarussian State University
of Informatics and Radioelectronics
tel. +375-29-317-75-66;
e-mail: kirinovich@bsuir.by
Kirynovich Iryna Fedorovna



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2021-19-1-37-45>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 681.5.09

ПОСТРОЕНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ КАК ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ МОДЕЛЬНОГО РЯДА ЕЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ПРОТОТИПОВ

А.В. ГУЛАЙ, В.М. ЗАЙЦЕВ

Белорусский национальный технический университет (г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 19 февраля 2020

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2021

Аннотация. Перспективным направлением концептуального развития методов создания интеллектуальных систем является применение технологии последовательного построения функционально расширяющегося модельного ряда конструктивных прототипов системы. Руководящий принцип создания интеллектуальной системы по предложенной технологии заключается в том, что система высокой сложности разрабатывается и отлаживается поэтапно с использованием параллельно-последовательной схемы структурного наращивания и функционального усложнения. На каждом этапе построения она реализуется в виде аппаратно-программного комплекса – конструктивного прототипа с определенным набором выделенных составных частей и выполняемых функций. Под конструктивным прототипом системы понимается определенный вариант ее построения в виде логической или физической модели, которая включает заданный набор информационных, технических и программных средств, выполняет определенные системные функции, позволяет оценивать достигнутые уровни параметров, а также обеспечивает дальнейшее наращивание и развитие системы. В качестве обязательных прототипов уровней наиболее эффективно использование вербально-эвристических и графо-эвристических абстрактных моделей, которые отражают набор исходных требований и структуру интеллектуальной системы. Обязательным прототипом последующих уровней системной технологии является материальная модель ядра системы, объединяющего аппаратные и программные компоненты, совместное функционирование которых обеспечивает достижение требуемого набора интегративных системных свойств. Последовательность поэтапного выбора все более сложных прототипов с одновременным обогащением состава применяемых средств и выполняемых системных функций образует расширяющийся модельный ряд системы. В практике разработки систем он ограничивается определенным прототипом верхнего уровня, который удовлетворяет предварительно заданным техническим требованиям к системе. Поэтапная разработка и отладка моделей – прототипов высокой сложности с использованием параллельно-последовательной схемы их структурного наращивания и функционального усложнения является результативным технологическим направлением системного проектирования.

Ключевые слова: интеллектуальная система, конструктивная модель, модельный ряд, системное ядро.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Гулай А.В., Зайцев В.М. Построение интеллектуальной системы как последовательное преобразование модельного ряда ее конструктивных прототипов. Доклады БГУИР. 2021; 19(1): 37-45.

INTELLIGENT SYSTEM CONSTRUCTION AS CONSEQUENT TRANSFORMATION OF THE MODEL RANGE OF ITS FUNCTIONAL PROTOTYPES

ANATOLY V. GULAY, VLADIMIR M. ZAITSEV

Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 19 February 2020

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2021

Abstract. Application of the technology of consecutive construction of the functionally expanding model range of structural system prototypes is an advanced conceptual development direction of intellectual systems construction methods. The guiding principle of intellectual system construction under the suggested technology is that a highly sophisticated system is worked out and adjusted by stages with the use of the structural increment and functional complexity parallel-sequential scheme. At every construction step it is implemented in the form of a hardware and software complex – the structural prototype with a certain set of allocated components and performed functions. The structural prototype is understood as a certain version of its construction in the form of a logical or physical model, which includes a predetermined set of information, technical and software tools, performs system functions, makes it possible to evaluate the achieved parameter levels, as well as ensures further system build-up and development. Verbal-heuristic and graphic-heuristic models, which reflect the set of original requirements and the intelligent system structure, are used as mandatory prototypes of primary levels. The mandatory prototype of subsequent levels of the system technology includes a material model of the system nucleus, which combines hardware and software components, where joint functioning delivers the required set of integrative systematic properties. Sequential step-by-step choice of all the more complex prototypes with simultaneous enrichment of the composition of applied tools and performed system functions forms the expanded model range of the system. In the practice of systems development it is limited with a certain upper level prototype, which meets preset technical requirements to the system. Step-by-step development and adjustment of models, which are highly complicated prototypes, with the use of the parallel-sequential scheme of their structural enrichment and functional complication, is the effective technological trend of co-engineering.

Keywords: intelligent system, constructive model, model range, system core.

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

For citation. Gulay A.V., Zaitsev V.M. Intelligent system construction as consequent transformation of the model range of its functional prototypes. Доклады БГУИР. 2021; 19(1): 37-45.

Введение

Введение средств интеллектуального управления и интеллектуальных компонентов в состав систем технического назначения значительно усложняет протекающие в указанных системах информационно-вычислительные процессы и обостряет проблему их построения [1–3]. Гармоничному консолидированию принципов создания систем, эффективному выполнению процессов их разработки, наладки и контроля способствует введение методов системного моделирования [4–8]. Перспективным направлением концептуального развития современных методов создания интеллектуальных систем является применение технологии последовательного построения функционально расширяющегося модельного ряда конструктивных прототипов системы. В связи с этим значительный научный интерес представляет рассмотрение условий и правил адекватного выбора и поэтапного преобразования моделей – конструктивных прототипов интеллектуальных систем.

Под конструктивным прототипом системы в данном случае понимается определенный вариант ее построения в виде логической или физической модели, которая включает заданный набор информационных, технических и программных средств, выполняет определенные

системные функции, позволяет оценивать достигнутые уровни параметров и характеристик, а также обеспечивает дальнейшее наращивание и развитие системы. Последовательность поэтапного выбора все более сложных прототипов с одновременным обогащением состава применяемых средств и выполняемых системных функций образует расширяющийся модельный ряд системы. В практике разработки систем он ограничивается определенным прототипом верхнего уровня, который удовлетворяет предварительно заданным техническим требованиям к системе.

Принципы построения модельного ряда конструктивных прототипов интеллектуальных систем

Руководящий принцип создания интеллектуальной системы по предложенной технологии заключается в том, что система высокой сложности разрабатывается и отлаживается поэтапно с использованием параллельно-последовательной схемы структурного наращивания и функционального усложнения. На каждом этапе построения она реализуется в виде аппаратно-программного комплекса – конструктивного прототипа с определенным набором выделенных составных частей и выполняемых функций. Конструктивный прототип отражает типичные и наиболее существенные свойства разрабатываемой системы, характерные для текущего i -го этапа ее развития, и задается следующей сигнатурой в виде набора уникальных операций, предикатов и отношений: $\Sigma_i = \langle P_0^{(i)}, P_1^{(i)}, P_2^{(i)}, \dots, P_k^{(i)}, C_0, C_1, C_2, \dots, C_m, \Sigma_{i-1} \rangle$, где Σ_i , Σ_{i-1} – сигнатуры i -го и $(i-1)$ -го этапов; $P_0^{(i)}, P_1^{(i)}, P_2^{(i)}, \dots, P_k^{(i)}$ – набор системных уникальных операций, предикатов и отношений i -го уровня; $C_0, C_1, C_2, \dots, C_m$ – набор системных констант и параметров. Сигнатура рекурсивна и на каждом этапе содержит в своем кортеже сигнатуру предшествующего этапа, при этом предусматривается ее определенное обогащение новыми уникальными операциями, предикатами и отношениями.

Важнейшей задачей реализации каждого шага построения интеллектуальной системы является обеспечение подобия набора выделенных составных частей моделей и их функций соответствующим элементам и функциональным свойствам создаваемой системы. При этом необходимо адекватное отражение прототипом интеллектуальной системы типичных и наиболее существенных системных аспектов, а также обеспечение выработки ею адекватных выходных реакций на входные воздействия и на возможные изменения внутренних состояний или внешних условий. В данном случае поэтапная разработка и отладка моделей – прототипов высокой сложности с использованием параллельно-последовательной схемы их структурного наращивания и функционального усложнения является результативным технологическим направлением системного проектирования.

Практическое применение рассматриваемой технологии требует определения, прежде всего, информационно-методической основы, на которой строится эта технология, по сути, принятия исходного концептуального профиля модельного ряда, который может быть использован аналитиками в прототипах на каждом из технологических этапов. Анализ обширного множества различных схем классификации моделей (см., например, [9]) позволяет рекомендовать обобщенный профиль модельного ряда, элементы которого в той или иной степени привлекаются разработчиками определенной системы (рис. 1). Следует отметить, что понятие модели, являющееся достаточно общим и универсальным, рассматривается здесь как некоторое вспомогательное средство для получения информации об определенных аспектах и свойствах создаваемой интеллектуальной системы. В то же время развитие конструктивной модели и постепенное превращение в полноценно функционирующую интеллектуальную систему, по сути, представляет собой продуктивную технологию ее построения.

В рассматриваемом модельном потоке в первую очередь выделяются абстрактные и материальные модели. Абстрактные модели – это умозрительные образы создаваемой интеллектуальной системы и ее возможных составных частей, которые образуются в результате предварительной структурно-функциональной декомпозиции. Среди абстрактных моделей различают вербально-эвристические и математические модели. Представление различных эвристик с помощью языковых средств позволяет получить вербально-эвристическую модель разрабатываемой системы в виде наборов спецификаций априорных

умозрительных знаний о составных частях, требуемых функциях и системных свойствах, совокупность которых отображает ее желаемый функциональный и технический облик. В принятой сетевой классификационной схеме вербально-эвристические модели являются исходными прототипами. Они создаются на основе концептуальных схем предметных и проблемных областей, содержат наборы системотехнических описаний (спецификаций) важнейших аспектов построения и функционирования интеллектуальных систем. Широкое распространение получили графо-эвристические модели в виде разнообразных иерархических, сетевых и мнемонических схем со словесными комментариями, что позволяет в доступной форме графически отображать замысел создания системы, отношения между ее составными частями и варианты возможных структурных решений.



Рис. 1. Концептуальный профиль модельного ряда для построения интеллектуальной системы
Fig. 1. Conceptual profile of the model row for intellectual system construction

Математические модели используют совокупности математических соотношений (физико-математические уравнения и формулы, логические и вероятностные соотношения, оптимизационные методы исследования операций), которые формально могут определять или описывать процессы, протекающие в интеллектуальной системе или в ее составных частях. Материальные модели в большинстве случаев представляют собой физические макеты той или иной сложности, действующие аналоги или реальные образцы составных частей создаваемой системы в виде узлов, блоков, устройств и ее подсистем. Макеты в принципе могут иметь природу, отличную от природы конечных (финишных) прототипов, но должны обладать идентичным описанием процессов функционирования, а также однотипными интерфейсами и протоколами информационно-технического взаимодействия с другими составными частями интеллектуальной системы.

Конструктивная модель подобна создаваемой интеллектуальной системе в отношении выработки выходных реакций на входные воздействия и на возможные изменения ее внутренних состояний, а также в отношении поведения в различных условиях. Применение ряда конструктивных прототипов обеспечивает наследуемость их структуры и функциональных свойств, а также изменчивость в ходе развития от этапа к этапу. После создания и полной проверки конструктивного прототипа i -го этапа создаются предпосылки к отработке более сложного прототипа следующего $(i + 1)$ -го этапа. Кроме конструктивных моделей на отдельных этапах развития системы могут создаваться и использоваться различные познавательно-технологические модели. Целью их построения является локальное и комплексное исследование процессов в отдельных составных частях и в системе в целом для получения предварительных числовых характеристик процессов, а также для оценки и прогнозирования массогабаритных, электромагнитных и иных параметров системы.

Ответственность за построение эффективной схемы построения интеллектуальной системы возлагается на системных аналитиков, которые предусматривают выработку обоснованных исходных системных требований, первоначальную структурно-функциональную декомпозицию системы, выбор или разработку образцов технических средств и необходимых программных компонентов для реализации составных частей системы, а также целенаправленную последовательность отработки прототипов. Попытка ускоренного создания и наладки некоторого первоначального варианта интеллектуальной системы путем минимизации количества применяемых прототипов и максимизации набора параллельно обрабатываемых системных функций чаще всего приводит к негативным результатам и к необходимости дальнейшей детализации структуры, а также повторного выполнения комплексных наладочных работ. Это обусловлено потенциальной угрозой потери логической обзримости процессов функционирования и взаимодействия аппаратных и программных компонентов, а также объективными трудностями выявления причин возможных нарушений и некорректностей интерфейсно-протокольных связей.

Преобразование конструктивных прототипов модельного ряда при построении интеллектуальной системы

Начальным этапом построения интеллектуальной системы в процессе преобразования ее конструктивных прототипов является разработка исходного замысла, цели создания и критериев эффективности системы (рис. 2). Построение абстрактной вербальной модели составляет процедуру нулевого уровня создания интеллектуальной системы. Технические требования к системе и ее описание оформляются в виде исходного задания на проектирование, которое выступает в форме документального воплощения прототипа системы.

Прототипами первого уровня являются структурно-функциональные и другие схемы и чертежи интеллектуальных систем. При разработке этих схем производится предварительное распределение функций между аппаратными и программными средствами, определяется состав системного ядра и последовательность его развития. Под ядром понимают минимальный набор аппаратуры и программ, совместное функционирование которых обеспечивает достижение требуемого объема интегративных свойств, выделяющих создаваемую интеллектуальную систему из множества иных систем. В настоящее время какие-либо канонические правила выделения системного ядра и определения его объема отсутствуют и индивидуально определяются системными аналитиками для каждого типа интеллектуальной системы. Структурно-функциональные схемы оформляются как наборы иерархически вложенных графических документов, определяющих графо-эвристические прототипы первого уровня. В этих схемах задаются направления развития и этапность реализации макетов, математических моделей и приемов обеспечения их комплексного функционирования.

К моделям – прототипам второго уровня целесообразно отнести аналитические модели и раздел процедурных знаний, в том числе необходимые физико-математические уравнения, алгебраические, логические и вероятностные соотношения между факторными и результативными параметрами системы, а также оптимизационные методы исследования операций.

Прототипом третьего уровня является рационально выбранная модель ядра системы. Практика создания систем различного функционального назначения показала, что наилучшие результаты построения системного ядра достигаются в том случае, если первоначально в качестве технических и программных средств применяются серийно изготавливаемые аналоги с последующим их замещением штатными компонентами. Аналоги должны, прежде всего, обеспечивать функциональную составляющую и как прототипы могут не удовлетворять требованиям по реальным температурным, механическим, электромагнитным и иным воздействиям и условиям функционирования. Математические средства ядра подлежат полной отладке, обеспечивающей проверку его функций и создающей возможность взаимодействия с предполагаемым системным окружением, которое выступает в роли «технической обвязки» ядра.



Рис. 2. Алгоритм построения интеллектуальной системы при последовательном конструктивном преобразовании компонентов ее модели

Fig. 2. An algorithm for constructing intelligent system with a sequential constructive transformation of the components of its model

Дальнейшие прототипы и их целевое использование определяются конкретной схемой построения интеллектуальной системы. В общем случае предусматривается последовательное замещение аналогов и макетов штатными техническими средствами с доведением их состава до требований, предусмотренных заданием на проектирование. Целью создания моделей более высоких уровней путем наращивания и развития ядра интеллектуальной системы является достижение функциональной полноты ее опытного образца. Предлагаемая технология последовательного построения функционально расширяющегося модельного ряда конструктивных прототипов системы не допускает хаотического чередования этапов и требует развития процессов по определенной схеме. Эта схема может предусматривать предварительное выделение наиболее ответственных составных частей системы в самостоятельные ветви индивидуального прототипирования, которые затем объединяются в некоторое структурно-функциональное ядро и охватываются общим технологическим процессом создания системы. Этот процесс завершается после проверки последнего конструктивного прототипа, полностью отвечающего первоначально установленным системным требованиям.

Особую роль в создании интеллектуальных систем по предлагаемой технологии играет прототипирование математических моделей и средств программного обеспечения. Анализ подавляющего большинства системотехнических приложений математики показывает, что применяемые в них математические рассуждения существенно, а порой принципиально, отличаются от классических строгих правил с твердым соблюдением ее основополагающих ортодоксальных принципов. В ряде случаев даже при строгих с математических позиций постановках системотехнических задач возникает необходимость в использовании приемов, неприемлемых с точки зрения «чистой» математики. Такими приемами могут быть, например: применение аппарата нечетких множеств и нечеткой логики; игнорирование «хрупкости» оптимальных решений в условиях приближенных результатов измерений параметров и конечной разрядности процессоров. Объективно проявляется противоречие следующего характера: на этапе создания интеллектуальной системы для получения установочных параметров управления осуществляется построение и исследование математических моделей с целью более полного и адекватного учета специфики построения системы и протекающих процессов, но в дальнейшем необходимо выполнение реальных действий и введение допущений, не отвечающих положениям строгой математики.

Специфика математических решений ряда системотехнических задач заключается в том, что получаемые решения в принципе не могут обладать строгой математической доказательностью. Это обусловлено недостаточной полнотой описания объектов управления, среды функционирования и управляющей системы, принятием системными аналитиками компромиссов, предположений и допущений. Тем не менее математическое решение должно быть выполнено правильно и должно удовлетворять установленным ограничениям, в том числе по используемому времени и по вводимым ресурсам. Такие решения чаще всего будут рациональными, а в отдельных случаях – субоптимальными или даже оптимальными. В последнее время ситуация, сложившаяся в вопросах математического моделирования (в том числе интеллектуальных систем), привела к появлению понятия «технического» уровня математической строгости. Это обусловлено попытками преодоления тенденции абсолютизации математических моделей и положений в тех случаях, когда на практике без этого можно обойтись. Например, в практических случаях при контроле, оценке и преобразовании физических величин имеется достаточно много источников погрешностей, которые математическая модель не в состоянии учесть.

Фактографическая информация поступает в систему от сенсорного оборудования, которое имеет конечные значения точности преобразования контролируемых величин. Кроме того, передаточные характеристики сенсоров и сенсорных модулей подвергаются линеаризации, а получаемые данные – оцифровке. Указанные факторы приводят к тому, что сведениям и данным, на основе которых интеллектуальная система формирует управленческие решения, должны быть поставлены в соответствие определенные значения доверительных вероятностей, допускающих количественную оценку. Именно эти оценки объективно определяют рациональную границу математической строгости моделей и, следовательно, используемых теоретических ограничений и огрублений системных процессов. При этом необходимо также учитывать тот факт, что достоверность и надежность системных решений принципиально не может превышать уровня доверия к исходной информации.

Следует также отметить, что в технологии моделирования особое значение имеет создание программных симуляторов для обеспечения процессов отработки прототипов. Создание этих технологических средств предусматривается схемой построения интеллектуальных систем. Опыт разработки симуляторов показывает, что в качестве их основы целесообразно использовать гибкие программные решения, которые допускают настройку требуемых параметров системными аналитиками.

Многоуровневая иерархическая архитектура системотехнических знаний, которые отражают основные аспекты построения интеллектуальной системы, формируется в виде логически связанных слоев ее системотехнических описаний [9]. Структура этих описаний обеспечивает возможность практического создания интеллектуальной системы. Совокупность требований к создаваемой интеллектуальной системе включает: морфологические и процессуальные требования и описания, изложение функций, свойств, условий жизнедеятельности и возмущающих факторов, а также информационно-параметрические требования и описания.

Морфологическое описание предназначено для отображения внутреннего состава системы, ее компонентов и объектов, то есть ее внутреннего построения. Это описание в общем случае должно содержать перечень элементов, системных компонентов и подсистем, включая программные средства. Кроме того, оно включает ту часть состава управляемых объектов, которая необходима для обеспечения взаимодействия их с системой.

Процессуальное описание содержит перечисление и смысловое назначение всех основных и вспомогательных процессов, протекающих в системе и обеспечивающих обработку или преобразование вещества, энергии и информации. В этом описании важную роль играют понятия системных операций, событий и состояний, которые необходимы для понимания особенностей построения системных процессов. Взаимодействие системы с внешней средой и взаимодействие составных частей системы друг с другом осуществляется с помощью конкретных системных процедур.

Описание функциональных свойств и функций системы содержит вербальное перечисление и смысловое изложение ее функциональных особенностей. Для каждой функции раскрывается цель или назначение, способ выполнения или алгоритм реализации, исходные

материальные, энергетические или информационные ресурсы, результаты обработки или преобразования вещества, энергии или информации. При этом степень детализации функционального описания системы определяется его конкретным назначением.

Описание условий жизнедеятельности и возмущающих факторов отражает сведения об особенностях пространственного размещения системы, об ожидаемых механических, климатических и электромагнитных воздействиях, а также другие вопросы обеспечения функционирования основных компонентов системы и протекания в ней сложных явлений. Возможно формирование требований по построению малогабаритных переносных составных частей и самой системы в целом, по размещению средств системы в помещениях разного типа, по монтированию ее на транспортной платформе. Фактически это определяет ожидаемые механические ударные и вибрационные нагрузки на систему. Отдельную часть описания составляют климатические условия работы системы.

Информационно-параметрическое описание содержит подробное перечисление и смысловое назначение форматов информации и параметров функционирования как самой системы, так и всех ее основных и вспомогательных компонентов. Часть форматов информации и параметров функционирования, как правило, задается в виде исходных требований, остальные сведения формируются на основе результатов теоретических и экспериментальных исследований или на основе результатов моделирования.

Заключение

Перспективным направлением концептуального развития процессов создания интеллектуальных систем является применение технологии последовательного построения функционально расширяющегося модельного ряда их конструктивных прототипов. В связи с этим рассмотрены руководящие принципы построения эволюционного ряда моделей – прототипов интеллектуальных систем: обязательное подобие изучаемых систем и их моделей в части набора выделенных составных частей и выполняемых функций; адекватное отражение прототипом разрабатываемой интеллектуальной системы ее типичных и наиболее существенных свойств; обеспечение выработки прототипом адекватных выходных реакций на входные системные воздействия и на возможные изменения внутренних состояний или внешних условий; поэтапная разработка и отладка моделей – прототипов любой сложности с использованием параллельно-последовательной схемы их структурного наращивания и функционального усложнения. Определены обязательные прототипы нулевого и первого уровней в виде вербально-эвристических и графо-эвристических абстрактных моделей, а также обязательный прототип второго и третьего уровней в виде материальной модели ядра системы. Показано, что конструктивно-эволюционное моделирование не допускает хаотического чередования этапов и требует развития процессов по определенной схеме, которая предварительно разрабатывается системными аналитиками.

Список литературы

1. Казиев В.М. *Введение в анализ и моделирование систем*. Москва: Бинум; 2014.
2. Советов Б.Я., Яковлев С.А. *Моделирование систем*. Москва: Высшая школа; 2009.
3. Бенькович Е.С., Колесов Ю.Б., Сениченков Ю.Б. *Практическое моделирование сложных динамических систем*. Санкт-Петербург: БХВ; 2001.
4. Емельянов В.В., Курейчик В.В., Курейчик В.М. *Теория и практика эволюционного моделирования*. Москва: Физматлит; 2003.
5. Jamshidi M. Tools for intelligent control: fuzzy controllers, neural networks and genetic algorithms. *Philosophical transactions. Series A. Mathematical, physical, and engineering sciences*. 2003;361:1781-1808.
6. Рапопорт Э.Я. *Структурное моделирование объектов и систем управления с распределенными параметрами*. Москва: Высшая школа; 2003.
7. Малахов Н.А., Жигулевцев Ю.Н. Структурно-параметрическое моделирование динамических объектов и систем управления в реальном времени. *Современные наукоемкие технологии*. 2018;12-1:108-114.

8. Tolk A. Learning something right from models that are wrong: Epistemology of Simulation. *Concepts and Methodologies in Modeling and Simulation*. Springer; 2015:87-106.
9. Гулай А.В., Зайцев В.М. *Архитектура интеллектуальных систем*. Минск: ИВЦ Минфина; 2018.

References

1. Kaziev V.M. [*Introduction to system analysis and modeling*]. Moscow: Binom; 2014. (In Russ.)
2. Sovetov B.YA., Yakovlev S.A. [*System modeling*]. Moscow: Vysshaya shkola; 2009. (In Russ.)
3. Ben'kovich E.S., Kolesov YU.B., Senichenkov YU.B. [*Practical modeling of complex dynamic systems*]. St. Petersburg: BHV; 2001. (In Russ.)
4. Emel'janov V.V., Kurejchik V.V., Kurejchik V.M. [*Theory and practice of evolutionary modeling*]. Moscow: Fizmatlit; 2003. (In Russ.)
5. Jamshidi M. Tools for intelligent control: fuzzy controllers, neural networks and genetic algorithms. *Philosophical transactions. Series A. Mathematical, physical, and engineering sciences*. 2003;361:1781-1808.
6. Rapoport E.YA. *Structural modeling of objects and control systems with distributed parameters*. Moscow: Vysshaya shkola; 2003. (In Russ.)
7. Malahov N.A., Zhigulevcev YU.N. [On-line structural and parametric modeling of dynamic objects and control systems]. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii = Modern high technologies*. 2018;12-1:108-114. (In Russ.)
8. Tolk A. Learning something right from models that are wrong: Epistemology of Simulation. *Concepts and Methodologies in Modeling and Simulation*. Springer; 2015:87-106.
9. Gulaj A.V., Zajtsev V.M. [*Architecture of the intelligent systems*]. Minsk: IVTs Minfina; 2018. (In Russ.)

Вклад авторов

Оба автора в равной степени внесли вклад в написание статьи.

Authors' contribution

Both authors equally contributed to the writing of the article.

Сведения об авторах

Гулай А. В., к.т.н., доцент, заведующий кафедрой интеллектуальных и мехатронных систем Белорусского национального технического университета.

Зайцев В. М., к.т.н., доцент, доцент кафедры интеллектуальных и мехатронных систем Белорусского национального технического университета.

Information about the authors

Gulay A. V., PhD, Associate Professor, Head of the Intelligent and Mechatronic Systems Department of the Belarusian National Technical University.

Zaitsev V. M., PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Intelligent and Mechatronic Systems Department of the Belarusian National Technical University.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, пр. Независимости, 65,
Белорусский национальный технический университет
тел. +375-29-251-46-42;
e-mail: is@bntu.by
Гулай Анатолий Владимирович

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, Nezavisimosti ave., 65
Belarusian National Technical University
tel. +375-29-251-46-42;
e-mail: is@bntu.by
Gulay Anatoly Vladimirovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2021-19-1-46-51>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 533.9.072

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ ДЛЯ ВОЗБУЖДЕНИЯ РАЗРЯДА БАРЬЕРНОГО ТИПА

А.Л. БАРАХОЕВ, О.И. ТИХОН, В.В. ТУБОЛЬЦЕВ

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

Поступила в редакцию 20 марта 2020

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2021

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы, касающиеся особенностей работы и настройки режимов высоковольтного импульсного источника питания на основе последовательного автономного резонансного инвертора с обратными диодами, использованного для возбуждения разряда атмосферного давления барьерного типа. Указывается, что характерными особенностями работы автономных резонансных инверторов является возникновение затухающих колебаний напряжения в LC-контуре инвертора, а также зависимость выходного переменного напряжения от отношения рабочей частоты инвертора (частота открытия тиристорov) к собственной резонансной частоте LC-контурa. В зависимости от этого отношения инвертор может работать в режиме прерывистого, граничного и непрерывного тока. Амплитуда и форма выходного напряжения инвертора контролировались при помощи делителя напряжения 1:1000 осциллографом С1-65А. Вид управляющих импульсов для отпираания тиристорov получен при помощи осциллографа С1-167. Установлено, что при несимметричном следовании управляющих импульсов друг относительно друга вследствие особенностей работы повышающих трансформаторов величина высоковольтного переменного напряжения на выходе инвертора оказывается недостаточной для возбуждения разряда атмосферного давления барьерного типа. В случае симметрии управляющих импульсов величина напряжения на выходе инверторного каскада достигает требуемых для пробоя диэлектрической среды величин. Получены осциллограммы выходного напряжения инвертора при регулировании его рабочей частоты. Показано, что амплитудное значение напряжения на газоразрядной нагрузке увеличивается по мере повышения рабочей частоты инвертора. Для частоты управляющих импульсов 250 Гц значение выходного амплитудного напряжения инвертора составило 3,4 кВ, для 460 Гц – 4,0 кВ, а для 550 Гц – 4,2 кВ.

Ключевые слова: барьерный разряд, полумостовой резонансный инвертор, высоковольтные импульсы.

Конфликт интересов Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарности. Авторы выражают благодарность Будько Г.П. за помощь в снятии электрических характеристик инвертора.

Для цитирования. Барахоев А.Л., Тихон О.И., Тубольцев В.В. Исследование режимов работы высоковольтного источника питания для возбуждения разряда барьерного типа. Доклады БГУИР. 2021; 19(1): 46-51.

STUDY OF THE OPERATING MODES OF THE HIGH VOLTAGE POWER SOURCE FOR BARRIER TYPE DISCHARGE EXCITATION

ANDREY L. BARAKHOEV, OLEG I. TIKHON, VLADISLAV V. TUBOLTSEV

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

Submitted 20 March 2020

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2021

Abstract. The issues related to the features of operation and modes setting of a high-voltage switching power source based on a sequential autonomous resonant inverter with reverse diodes used to excite an atmospheric pressure barrier type discharge are discussed in the article. It is indicated that the characteristic features of the autonomous resonant inverters operation are the occurrence of damped voltage fluctuations in the LC circuit of the inverter, as well as the dependence of the output alternating voltage on the ratio of the inverter operating frequency (thyristor switching frequency) to the natural resonant frequency of the LC circuit. Depending on this ratio, the inverter can operate in discontinuous, boundary and continuous current mode. The amplitude and shape of the inverter output voltage were controlled using a 1:1000 voltage divider with a C1-65A oscilloscope. The shape of the gate trigger pulses was obtained using a C1-167 oscilloscope. It is established that when the gate trigger pulses are asymmetrical relative to each other due to the operation features of the step-up transformers, the value of the alternating high-voltage at the inverter output is insufficient to excite the atmospheric pressure barrier type discharge. In the case of the gate trigger pulses symmetry, the output voltage of the inverter stage reaches the values required for the breakdown of the dielectric medium. Oscillograms of the inverter output voltage while adjusting its operating frequency are obtained. It is shown that the amplitude value of the voltage at the gas-discharge load increases as the operating frequency of the inverter increases. For the gate trigger pulses frequency of 250 Hz the value of the inverter output voltage amplitude was 3.4 kV, for 460 Hz – 4.0 kV, and for 550 Hz – 4.2 kV.

Keywords: barrier discharge, half-bridge resonant inverter, high voltage impulses.

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

Gratitude. The authors are grateful to Budko G.P. for help in measuring of electrical characteristics of the inverter.

For citation. Barakhoev A.L., Tikhon O.I., Tuboltsev V.V. Study of the operating modes of the high voltage power source for barrier type discharge excitation. Doklady BGUIR. 2021; 19(1): 46-51.

Введение

Барьерный разряд – вид газового разряда, возникающий при подведении переменного тока высокого напряжения к электродам при условии, что хотя бы один из них отделен от газового промежутка диэлектрическим барьером [1–3]. Технические приложения барьерного разряда нашли широкое применение в промышленности, например, для водоподготовки, очистки и модификации поверхностей, в эксимерных лампах и плазменных панелях телевизоров и т. д. [3]. В производстве изделий электронной техники интерес к разрядным системам барьерного типа обусловлен возможностью использовать их для сухой очистки кремниевых пластин от органических загрязнений, а также для удаления фоторезистивных маскирующих покрытий, не используя при этом вакуумное оборудование [4–6]. Для этого необходимо комплексное решение задач обеспечения стабильной и надежной работы как газоразрядных систем, так и источников их питания.

Методика проведения эксперимента

Для осуществления реакции синтеза озона в разряде барьерного типа необходимо получить импульсы высоковольтного напряжения амплитудой порядка 3 кВ на 1 мм разрядного промежутка [1]. Повышение концентрации озона достигается за счет увеличения частоты следования высоковольтных импульсов до нескольких десятков килогерц [7], а также изменением величины амплитуды напряжения высоковольтных разрядных импульсов.

Для питания разрядного модуля атмосферного давления барьерного типа в виде кожухотрубчатого теплообменника с несколькими параллельно соединенными элементами использован преобразователь частоты, состоящий из выпрямителя и полумостового резонансного инвертора с повышающими трансформаторами и обратно включенными диодами, схема которого показана на рис. 1. Газоразрядная система в виде трех параллельно соединенных трубчатых стеклоэлектродов как нагрузка E1, E2, E3 включена в диагональ инвертора через высоковольтные трансформаторы T1, T2.

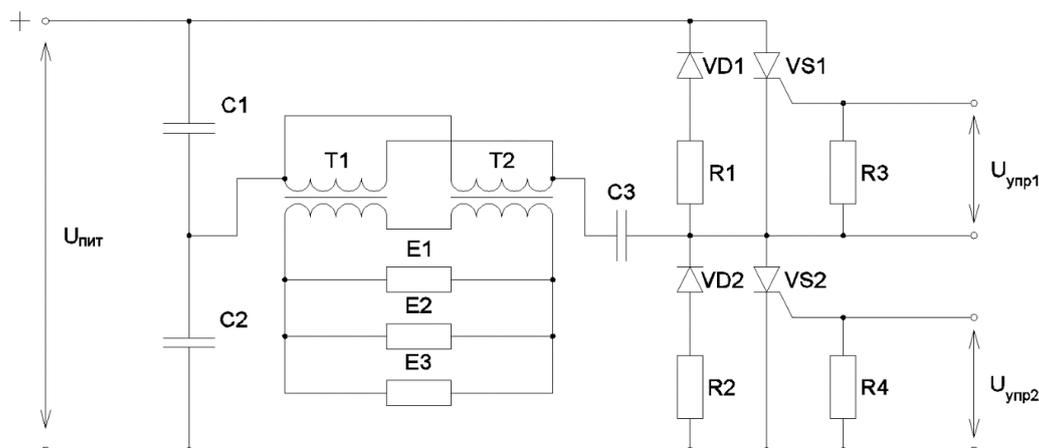


Рис. 1. Принципиальная схема полумостового резонансного инвертора
Fig. 1. Half-bridge resonant inverter circuit diagram

Собственная резонансная частота инвертора составляет $f_0 \approx 450$ Гц и рассчитывается исходя из величины индуктивности параллельно соединенных первичных обмоток высоковольтных трансформаторов T1, T2 общей величиной $L \approx 30$ мГн и емкости последовательно включенного конденсатора C3 $C \approx 4$ мкФ [8–10].

Схема управления силовыми тиристорами состоит из мультивибратора на двух однопереходных транзисторах, вырабатывающего две последовательности однополярных импульсов, сдвинутых друг относительно друга на полпериода выходного напряжения. Частота управляющих импульсов f регулируется в диапазоне от 250 до 550 Гц. Запирание тиристоров происходит в момент спада зарядного тока до нуля при полной зарядке конденсатора C3.

Регулировка отдаваемой в нагрузку мощности осуществляется за счет изменения частоты подаваемых с мультивибратора управляющих импульсов, которые определяют рабочую частоту инвертора. Форма управляющих импульсов снималась при помощи осциллографа С1-167.

Форма выходного высоковольтного напряжения инвертора снималась при помощи делителя 1:1000 осциллографом С1-65А.

Результаты и их обсуждение

Форма управляющих импульсов показана на рис. 2. Цена одного деления осциллограмм по горизонтали составляет 1 мс, по вертикали – 1 В.

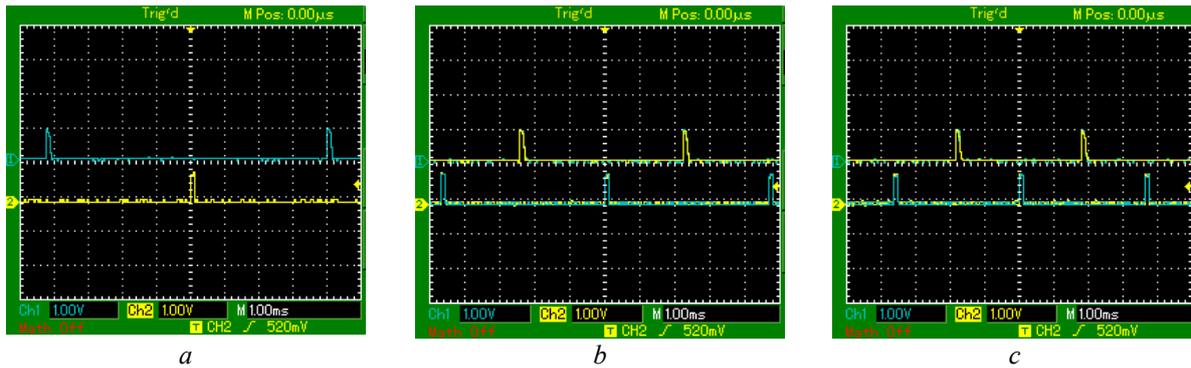


Рис. 2. Вид управляющих импульсов при частоте f : 250 Гц (a); 460 Гц (b); 550 Гц (c)
Fig. 2. Shape of gate trigger pulses when repetition rate f is: 250 Hz (a); 460 Hz (b); 550 Hz (c)

При частоте следования импульсов управления, меньшей резонансной частоты инвертора $f < f_0$, последний работает в режиме прерывистого тока (РПТ), при $f > f_0$ – в режиме непрерывного тока (РНТ) с формой выходного напряжения, близкой к синусоидальной [8–10]. Форма выходного высоковольтного напряжения инвертора показана на рис. 3, a для РПТ и рис. 3, b, c для РНТ. Цена одного деления осциллограмм по горизонтали – 1 мс, по вертикали – 2 В.

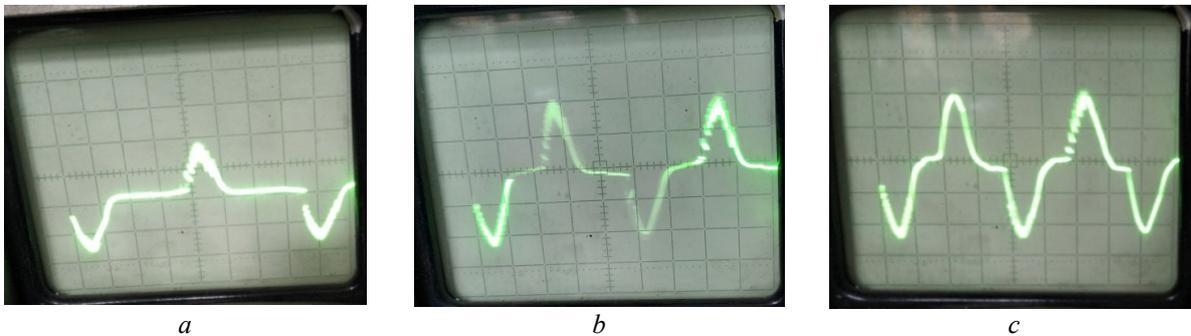


Рис. 3. Форма высоковольтного напряжения на выходе инвертора при частоте f управляющих импульсов: 250 Гц (a); 460 Гц (b); 550 Гц (c)
Fig. 3. Shape of inverter output high-voltage when gate trigger pulses repetition rate f is: 250 Hz (a); 460 Hz (b); 550 Hz (c)

При работе инвертора в РНТ тиристоры включаются в момент неполного разряда конденсатора С3. Из этого следует, что увеличение частоты следования управляющих импульсов в РНТ приведет к увеличению амплитуды выходного напряжения инвертора вплоть до $f \leq 1,25f_0$ (при этих условиях остаточный заряд на конденсаторе максимален; при $f > 2f_0$ происходит открытие второго тиристора до запираения первого и, как следствие, срыв инвертирования) [8–10]. Зависимость измеренного амплитудного значения высоковольтного напряжения на выходе инвертора от частоты управляющих импульсов показана на рис. 4.

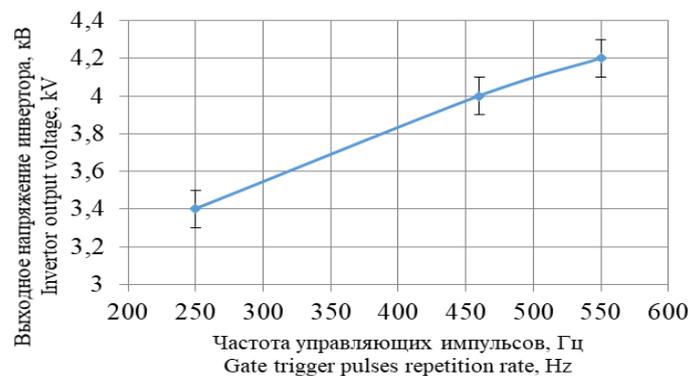


Рис. 4. Зависимость высоковольтного напряжения на выходе инвертора от частоты управляющих импульсов
Fig. 4. Dependency of the inverter output high-voltage on the gate trigger pulses repetition rate

Заклучение

Получены экспериментальные данные и изучена работа источника высоковольтного импульсного напряжения с использованием схемы полумостового резонансного инвертора с обратными диодами на нагрузку в виде разряда атмосферного давления барьерного типа в горизонтально расположенных кожухотрубчатых газоразрядных элементах.

В предварительных запусках представленный источник питания показал возможность стабильного регулирования мощности, отдаваемой в разряд, и, как следствие, регулирования концентрации озона в озono-воздушной смеси.

Список литературы

1. Автаева С.В. *Барьерный разряд. Исследование и применение*. Бишкек: КРСУ; 2009.
2. Fridman A., Gutsol A., Cho Y.I. Non-Thermal Atmospheric Pressure Plasma. *Advances in Heat Transfer*. 2007;40:1-142. DOI: 10.1016/S0065-2717(07)40001-6
3. Kohli R., Mittal K.L. *Developments in Surface Contamination and Cleaning – Contaminant Removal and Monitoring*. Oxford: William Andrew Publishing; 2013.
4. Huynh C.K., Mitchener J.C. Plasma versus ozone photoresist ashing: Temperature effects on process induced mobile ion contamination. *Journal of Vacuum Science & Technology B*. 1991;9:353. DOI: 10.1116/1.585574
5. Gardner W.L., Baddorf A.P., Holber W.M. Temperature and concentration effects on ozone ashing of photoresist. *Journal of Vacuum Science & Technology A*. 1997;15:1409. DOI: 10.1116/1.580551
6. Yi C.H., Kim T., Kim K.H., Kano W.S., Kim J.H., Hong S.K.. Atmospheric pressure plasma ashing for display manufacturing. *Japanese Journal of Applied Physics*. 2008;47:6965-6969. DOI: 10.1143/JJAP.47.6965
7. Suksri A., Karnchanalekha K., Tonmitra K., Apiratikul P. A comparative study on suitable high voltage sources for ozone generation. *2009 6th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology*. 2009;2:296-299. DOI: 10.1109/ECTICON.2009.5137012
8. Томашевский Д.Н. *Автономные инверторы*. Екатеринбург: Изд-во Уральского ун-та; 2019.
9. Зиновьев, Г.С. *Основы силовой электроники*. Новосибирск: НГТУ; 2003.
10. Бальян Р.Х., Сиверс М.А. *Тиристорные генераторы и инверторы*. Ленинград: Энергоиздат; 1982.

References

1. Avtaeva S. [*Barrier discharge. Research and application*]. Bishkek: KRSU; 2009. (In Russ.)
2. Fridman A., Gutsol A., Cho Y.I. Non-Thermal Atmospheric Pressure Plasma. *Advances in Heat Transfer*. 2007;40:1-142. DOI: 10.1016/S0065-2717(07)40001-6
3. Kohli R., Mittal K.L. *Developments in Surface Contamination and Cleaning – Contaminant Removal and Monitoring*. Oxford: William Andrew Publishing; 2013.
4. Huynh C.K., Mitchener J.C. Plasma versus ozone photoresist ashing: Temperature effects on process induced mobile ion contamination. *Journal of Vacuum Science & Technology B*. 1991;9:353. DOI: 10.1116/1.585574
5. Gardner W.L., Baddorf A.P., Holber W.M. Temperature and concentration effects on ozone ashing of photoresist. *Journal of Vacuum Science & Technology A*. 1997;15:1409. DOI: 10.1116/1.580551
6. Yi C.H., Kim T., Kim K.H., Kano W.S., Kim J.H., Hong S.K.. Atmospheric pressure plasma ashing for display manufacturing. *Japanese Journal of Applied Physics*. 2008;47:6965-6969. DOI: 10.1143/JJAP.47.6965
7. Suksri A., Karnchanalekha K., Tonmitra K., Apiratikul P. A comparative study on suitable high voltage sources for ozone generation. *2009 6th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology*. 2009;2:296-299. DOI: 10.1109/ECTICON.2009.5137012
8. Tomashevskiy D.N. [*Autonomous inverters*]. Ekaterinburg: UFU; 2019. (In Russ.)
9. Zinoviev G.S. [*Fundamentals of Power Electronics*]. Novosibirsk: NSTU; 2003. (In Russ.)
10. Balian R., Sivers A. [*Thyristor generator and inverters*]. Leningrad: Energoizdat; 1982. (In Russ.)

Вклад авторов

Барахоев А.Л. определил цели и задачи исследования, принял участие в обработке и интерпретации полученных результатов.

Тубольцев В.В. и Тихон О.И. приняли участие в снятии электрических характеристик.

Authors' contribution

Barakhoev A.L. defined the objectives of the research, took part in the processing and interpretation of research results.

Tuboltsev V.V. and Tikhon O.I. taken part in the measuring of electrical characteristics.

Сведения об авторах

Барахоев А.Л., аспирант кафедры электронной техники и технологии Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Тихон О.И., аспирант кафедры электронной техники и технологии Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

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

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, П. Бровки, д. 6,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
тел. +375-44-760-08-74;
andreibarahoev@gmail.com
Барахоев Андрей Леонидович

Information about the authors

Barakhoev A.L., PhD Student of the Information Radiotechnologies Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Tikhon O.I., PhD Student of the Information Radiotechnologies Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Tuboltsev V.V., Master Student of the Information Radiotechnologies Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki str., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics.
tel. +375-44-760-08-74;
andreibarahoev@gmail.com
Barakhoev Andrey Leonidovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2021-91-1-52-60>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 004.94+577.3

МОДЕЛЬ ПОГЛОЩЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СВЧ-ДИАПАЗОНА БИОЛОГИЧЕСКИМИ ТКАНЯМИ

И.А. ЛАГУЦКИЙ, М.В. ДАВЫДОВ, В.В. КИЗИМЕНКО, В.А. БОГУШ

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

Поступила в редакцию 24 апреля 2020

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2021

Аннотация. В статье описана модель поглощения электромагнитной энергии радиочастотного диапазона биологическими тканями. Рассмотрены проблемы моделирования взаимодействия излучения СВЧ-диапазона и биологических тканей, представленных в виде многослойных структур. Разработаны модели полосковых излучателей для шести поддиапазонов, перекрывающих диапазон 500–3500 МГц. Модель биологической ткани разработана на основе изображения магниторезонансной томографии, что позволяет проводить моделирование в условиях, приближенном к реальному. На основании разработанных моделей приемопередатчиков и биоткани созданы модели, позволяющие провести анализ поглощения электромагнитной энергии в ближней и дальней зоне передатчика. Из результатов моделирования в ближней зоне видно, что имеются определенные максимумы поглощения на частотах 750, 938, 1250 и 1357 МГц. Исходя из результатов моделирования в дальней зоне можно отметить, что в диапазоне 750–1000 МГц не наблюдается пик поглощения на частоте 938 МГц. Также в результате моделирования зафиксировано уменьшение величины поглощения, начиная с частоты 750 МГц. Отсутствие пика поглощения также наблюдается и в районе частоты 1357 МГц. В диапазоне 2,5–3 ГГц как в ближней, так и в дальней зонах наблюдается практически линейное уменьшение величины поглощения. При анализе влияния размеров структур на поглощение электромагнитной энергии в биологических тканях было обнаружено, что характер изменения величины поглощения является нелинейной величиной. В диапазоне 0,5–2 ГГц наблюдается как увеличение, так и уменьшение поглощения при утолщении или утончении слоев. Также необходимо отметить, что при увеличении размеров каждого слоя на 10 % наблюдается пик поглощения в районе частоты 1156 МГц. Для диапазона 2–3,5 ГГц не наблюдается значительных изменений формы графика при изменении толщины слоев.

Ключевые слова: биологические ткани, поглощение энергии, полосковая антенна.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Лагуцкий И.А., Давыдов М.В., Кизименко В.В., Богуш В.А. Модель поглощения электромагнитного излучения СВЧ-диапазона биологическими тканями. Доклады БГУИР. 2021; 19(1): 52-60.

MODEL OF MICROWAVE RADIATION ABSORPTION BY BIOLOGICAL TISSUES

ILYA A. LAGUTSKIY, MAXIM V. DAVYDOV, VYACHESLAV V. KIZIMENKO,
VADIM A. BOGUSH

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

Submitted 24 April 2020

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2021

Abstract. A model of absorption of electromagnetic energy of radiofrequency range by biological tissues is described in the article. The problems of modeling the interaction of microwave radiation and biological tissues represented as multilayer structures are considered. Patch-antenna models for six sub-bands overlapping the 500–3500 MHz range are developed. The model of biological tissue was developed on the basis of MRI imaging, which allows for modeling under near real-life conditions. Based on the developed models of transceivers and biotissue, models have been created that allow to analyze the absorption of electromagnetic energy in the near- and far fields of the transmitter. From the results of modelling in the near field we can see that there are certain absorption maxima at frequencies of 750, 938, 1250 and 1357 MHz. Based on the results of the far field modeling it can be noted that in the range of 750 to 1000 MHz there is no absorption peak at 938 MHz. Also, as a result of the simulation, a decrease in the magnitude of absorption starting from 750 MHz was registered. Absorption peak absence is also observed in the area of 1357 MHz frequency. In the range of 2.5–3 GHz both in the near and far fields practically linear decrease of absorption value is observed. When analyzing the influence of structures' sizes on electromagnetic energy absorption in biological tissues, it was found that the nature of change in absorption value is a nonlinear value. In the range of 0.5–2 GHz both increase and decrease of absorption at thickening or thinning of layers is observed. It should also be noted that when the size of each layer increases by 10 %, the peak of absorption in the area of 1156 MHz frequency is observed. For the 2–3.5 GHz range there are no significant changes in the chart shape when the layer thickness changes.

Keywords: biological tissues, microwave radiation absorbing, patch-antenna.

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

For citation. Lagutskiy I.A., Davydov M.V., Kizimenko V.V., Bogush V.A. Model of microwave radiation absorption by biological tissues. Doklady BGUIR. 2021; 19(1): 52-60.

Введение

Изучение взаимодействия биологической ткани с электромагнитным излучением СВЧ-диапазона является актуальной темой в современном мире [1–4]. Это связано с обширным использованием устройств сотовой связи, работающих в различных диапазонах частот, число которых постоянно растет в связи с развитием новых стандартов мобильной связи (стандарт 5G), что приводит к необходимости анализа воздействия данного излучения на человека.

Для оценки воздействия электромагнитного излучения на ткани возможно применять два подхода: натурное и численное моделирование. Сложность применения натурального моделирования в первую очередь связана с тем, что исследование влияния на человека очень сложно провести, так как явные признаки могут не проявляться в течение долгого времени, а выбор контрольной группы затруднен повсеместным использованием радиосвязи. Альтернативой является применение фантомов, однако их создание является достаточно трудоемким процессом, так как получение эквивалента ткани затруднено в связи со сложностью ее структуры.

Компьютерное (численное) моделирование не имеет вышеперечисленных недостатков, так как благодаря современным достижениям в области трехмерного моделирования можно

создавать структуры различной геометрии с необходимыми характеристиками. Это позволяет значительно упростить задачу при оценке взаимодействия тканей с электромагнитным излучением СВЧ-диапазона.

Необходимо учитывать, что излучение радиочастотного диапазона может вызывать две группы эффектов: тепловые и нетепловые. В случае проявления тепловых эффектов электромагнитная энергия преобразуется в тепловую и идет на нагрев тканей. В случае нетепловых эффектов поглощенная энергия идет на совершение химических реакций, которые могут нести непредсказуемый эффект. В данной статье речь идет об общем количестве поглощенной тканью энергии, так как разделение на энергию тепловых и нетепловых эффектов невозможно в связи с тем, что процесс моделирования не учитывает особенности поведения тканей в процессе жизнедеятельности.

Для моделирования был выбран программный комплекс Altair FEKO, который предназначен для численного электромагнитного анализа. Возможности использования различных методов электромагнитного моделирования, реализованные в FEKO, делают этот программный продукт применимым для решения разнообразных задач во многих областях, в том числе для исследовательских целей. Данный программный комплекс обладает высокой гибкостью в настройке, что позволяет подобрать оптимальные параметры для моделирования, которые обеспечивают оптимальное сочетание точности и скорости вычислений.

В данной статье описаны результаты исследований, в ходе которых проводилось моделирование поглощения электромагнитной энергии в биологической ткани, которая представляет собой многослойную структуру, размеры слоев которой выбраны на основе МРТ-изображения головного мозга человека, так как поглощение может зависеть не только от свойств ткани, но и от ее размеров. Использование подобной структуры обусловлено тем, что распространение волн в гомогенизированном домене, который зачастую используется при оценке удельного коэффициента поглощения (SAR), может отличаться от распространения в биологической тканях. Анализ производится на основании исследования системы S -параметров. Благодаря этому можно произвести оценку поглощения энергии на различных частотах, что позволит оценить общий уровень поглощения электромагнитной волны на различных частотах.

Модель антенны

Для исследования были использованы модели полосковых антенн (микрорезонаторов). Их использование обусловлено простотой конструкции и известной методикой расчета. Также данные антенны имеют диаграмму направленности, позволяющую сконцентрировать электромагнитную энергию в определенном направлении. Главным недостатком данного типа антенн (в условиях решения данной задачи) является узкая полоса пропускания.

В данной работе был исследован диапазон 500–3500 МГц, который охватывает частоты различных стандартов сотовой связи, а именно: GSM (890–915 / 935–960 МГц и 1710–1785 / 1805–1880 МГц), UMTS (1920–1980 / 2110–2170 МГц), LTE (1710–1785 / 1805–1880 МГц и 2500–2570 / 2620–2690 МГц). Использование столь широкого диапазона также обусловлено тем, что новые стандарты связи могут использовать частоты, находящиеся между выше названными (например стандарт 5G подразумевает использование большого набора частот в диапазоне от 500 МГц до 6 ГГц).

Для охвата всего диапазона было решено разбить его на шесть поддиапазонов, для каждого из которых была рассчитана своя полосковая антенна (с соответствующими размерами проводника). Таким образом, были подобраны шесть антенн, каждая из которых охватывает полосу 500 МГц.

Антенна представляет собой слой диэлектрика (толщиной 1 мм с относительной диэлектрической проницаемостью 4,8 (материал FR4)), на который нанесена металлизация. Размер подложки составляет удвоенную длину и ширину полоска (рис. 1). Металлизация на верхнем слое диэлектрика выполняет роль полоска, а нижняя сторона имеет сплошную металлизацию, которая соединяется с нулевым потенциалом.

Модель ткани

Структура, используемая для анализа, представляет собой многослойный домен с длиной и шириной, занимающими всю область расчета. Высота и типы тканей выбраны на основе МРТ-изображения (рис. 2). Таким образом, биоткань имеет структуру, представленную в табл. 1.

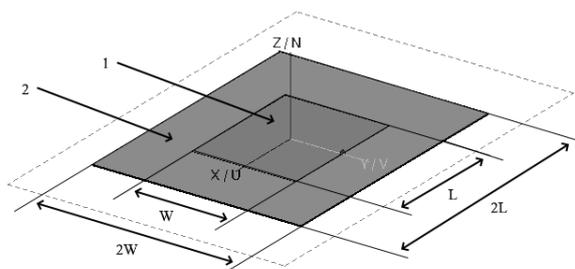


Рис. 1. Схематическое изображение полосковой антенны: 1 – полосковый проводник, 2 – подложка.
Fig. 1. Schematic view of a patch antenna: 1 – patch, 2 – substrate



Рис. 2. Изображение поперечного среза головы человека на магнитно-резонансной томографии
Fig. 2. MRI of a cross section of the human head

Таблица 1. Структура исследуемой биоткани
Table 1. Structure of target biological tissue

Слой Layer	Тип ткани Layer material	Толщина, мм Thickness, mm
1	Кожа	3
2	Кость	6
3	Спинномозговая жидкость	3
4	Мозговая ткань	132
5	Спинномозговая жидкость	3
6	Кость	6
7	Кожа	3

Итоговая толщина модели составила 156 мм и представлена в виде набора плоскостей, длина и ширина которых являются бесконечными. Использование плоскостей в программном комплексе ФЕКО позволяет сократить время вычислений, так как плоскости не разбиваются сеткой и рассчитываются другим методом. Диэлектрическая проницаемость и проводимость материалов были взяты из встроенной библиотеки материалов, так как являются нелинейными величинами, зависящими от частоты [5, 6].

Использование подобной модели обусловлено следующими факторами:

- сложность построения точной 3D-модели человеческой головы, связанная с индивидуальными особенностями строения у каждого человека;
- высокая сложность вычислений, связанная с особенностями разбиения структур с элементами, имеющими небольшие размеры и элементы сложной геометрии.

Совокупность данных факторов приводит к необходимости использования упрощенных моделей для исследования особенностей поглощения электромагнитного излучения.

Исследуемая модель

В ходе работы производился расчет двух моделей. Каждая модель представляет собой совокупность двух антенн и биологической ткани, расположенной между ними. Антенны направлены друг на друга. Одна из антенн выполняет роль передатчика, а вторая – приемника.

В первом случае расстояние между поверхностями антенн составляет 200 мм, что соответствует ближней зоне. Таким образом, расстояние от антенны до ткани составляет 22 мм с каждой стороны (при толщине биоткани 156 мм). Данное расстояние имитирует воздушное пространство между антенной и головой.

Во втором случае расстояние между антеннами было увеличено до 1 м, что соответствует дальней зоне для всех вариантов исполнения излучателей. Модель биологических тканей находится на расстоянии 50 мм от приемника. В данном случае производилось моделирование трех видов биоткани: нормальной толщины (156 мм) и двух структур с увеличением и уменьшением размеров каждого слоя на 10 %, что позволяет оценить влияние вариативности размеров биологических объектов на результаты моделирования.

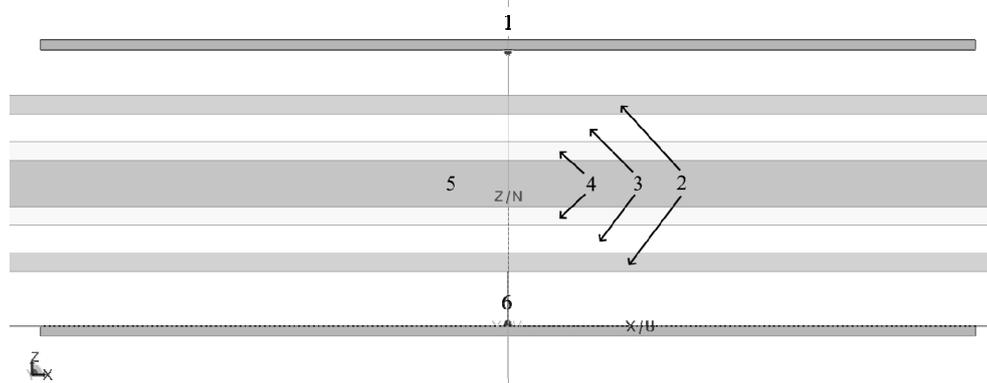


Рис. 3. Модель ткани: 1 – приемник, 2 – кожа, 3 – кость, 4 – спинномозговая жидкость, 5 – мозговая ткань, 6 – передатчик

Fig. 3. Target Tissue: 1 – receiver, 2 – skin, 3 – bone, 4 – cerebrospinal fluid, 5 – brain tissue, 6 – transmitter

В качестве характеристики системы был выбран параметр S_{21} . Он соответствует количеству электромагнитной энергии, которое прошло через исследуемую систему. Изменение данного параметра будет говорить о количестве энергии, которое было поглощено тканью. В пределах данной задачи было принято, что оценивать количество поглощенной энергии можно как разность между параметрами S_{21} без и с биологической тканью, что позволяет исключить из полученных результатов собственные резонансы системы.

Результаты и их обсуждение

Результаты моделирования в ближней зоне. В ходе моделирования было получено два набора значений для моделей: «излучатель – приемник» и «излучатель – биоткань – приемник». Результаты представлены на рис. 4 в виде разности параметра S_{21} для модели без ткани и с биотканью.

В ходе сравнительного анализа было выяснено, что при прохождении электромагнитного излучения через биоткань параметр S_{21} в среднем уменьшается на 35 дБ, начиная с частоты 2 ГГц, что свидетельствует о большой величине поглощения. В диапазоне 0,5–2 ГГц наблюдается значительная нелинейность и наличие пиков поглощения. В диапазоне 2–3,5 ГГц наблюдается линейное уменьшение величины поглощения с ростом частоты.

Также было замечено, что присутствуют пики поглощения, которые видны как максимумы кривых. Данные пики наблюдаются на частотах 750, 938, 1250 и 1357 МГц. Следует отметить, что частота 938 МГц соответствует длине волны 319,6 мм, что сопоставимо с 0,5 толщины биологической ткани.

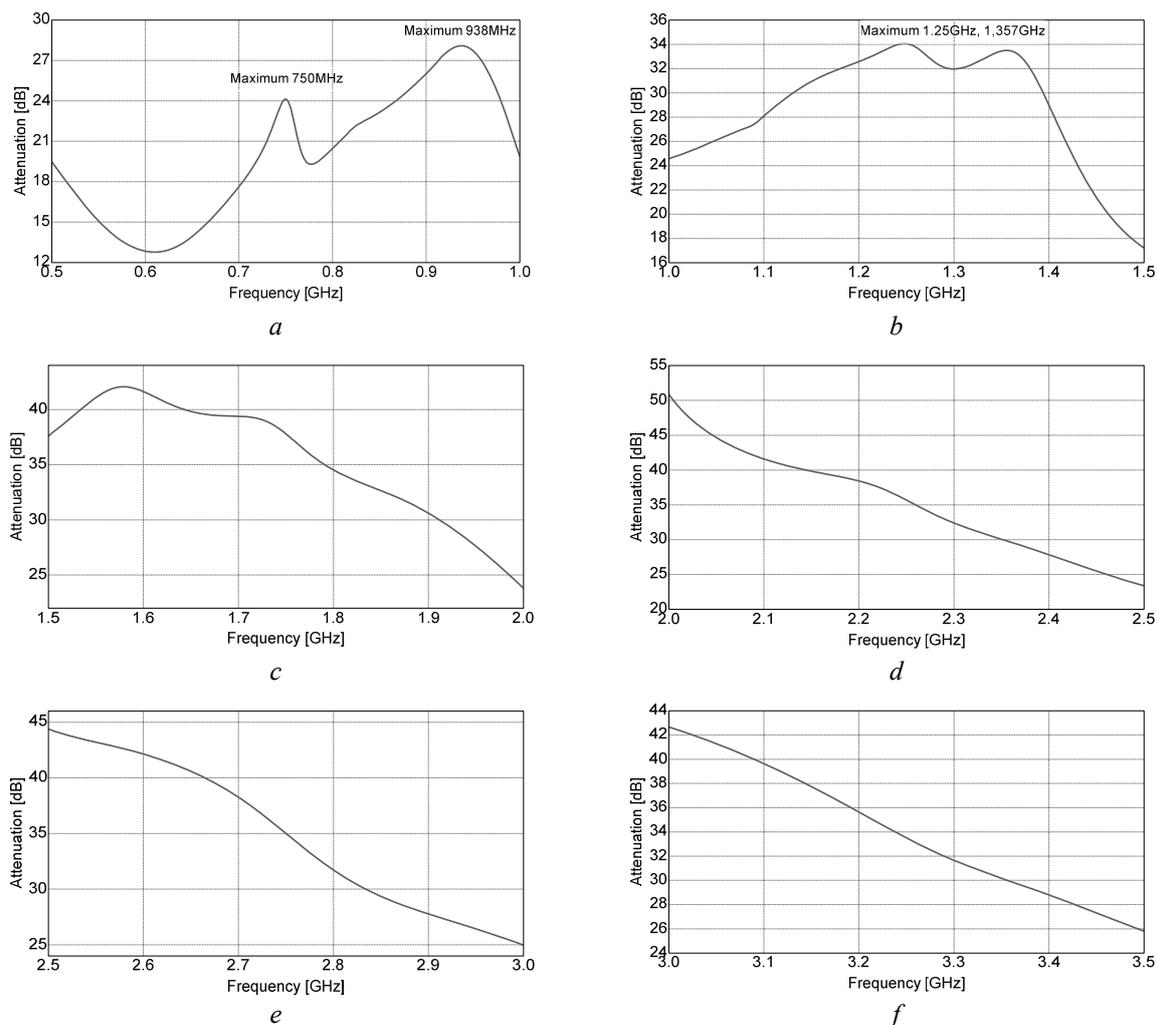


Рис. 4. Скриншоты окна программы с результатами моделирования для ближней зоны в диапазоне: *a* – 0,5–1,0 ГГц; *b* – 1,0–1,5 ГГц; *c* – 1,5–2,0 ГГц; *d* – 2,0–2,5 ГГц; *e* – 2,5–3,0 ГГц; *f* – 3,0–3,5 ГГц

Fig. 4. Screenshots of the program window with simulation results for the near field in the range: *a* – 0.5–1.0 GHz; *b* – 1.0–1.5 GHz; *c* – 1.5–2.0 GHz; *d* – 2.0–2.5 GHz; *e* – 2.5–3.0 GHz; *f* – 3.0–3.5 GHz

Результаты моделирования в дальней зоне. В ходе моделирования поглощения в дальней зоне было получено четыре набора значений: один набор для модели «излучатель – приемник» и три набора значений для модели «излучатель – биоткань – приемник», каждый из которых отличается толщиной моделируемых биологических тканей.

На рис. 5 представлены полученные данные. Кривые с индексами «s» и «x» соответствуют биоткани с уменьшенной и увеличенной на 10 % толщиной слоев соответственно.

При анализе поглощения (в случае с нормальной толщиной биоткани) было обнаружено, что средняя величина поглощения (разность между параметрами S_{21}) составляет порядка 40 дБ, что говорит об увеличении поглощения в дальней зоне. Нелинейность в диапазоне 0,5–2 ГГц можно связать с тем, что длина волны в данном диапазоне сопоставима с размерами биоткани. Также при анализе были замечены изменения в форме графиков, что говорит об изменении характера поглощения при перемещении в дальнюю зону. А именно было замечено, что в диапазоне 750–1000 МГц исчез пик поглощения на частоте 938 МГц. Также было замечено уменьшение поглощения, начиная с частоты 750 МГц. Отсутствие пика поглощения также наблюдается и в районе частоты 1357 МГц. Можно заметить, что для модели с увеличенной толщиной наблюдается дополнительный пик поглощения в районе частоты 1156 МГц (длина волны 260 мм).

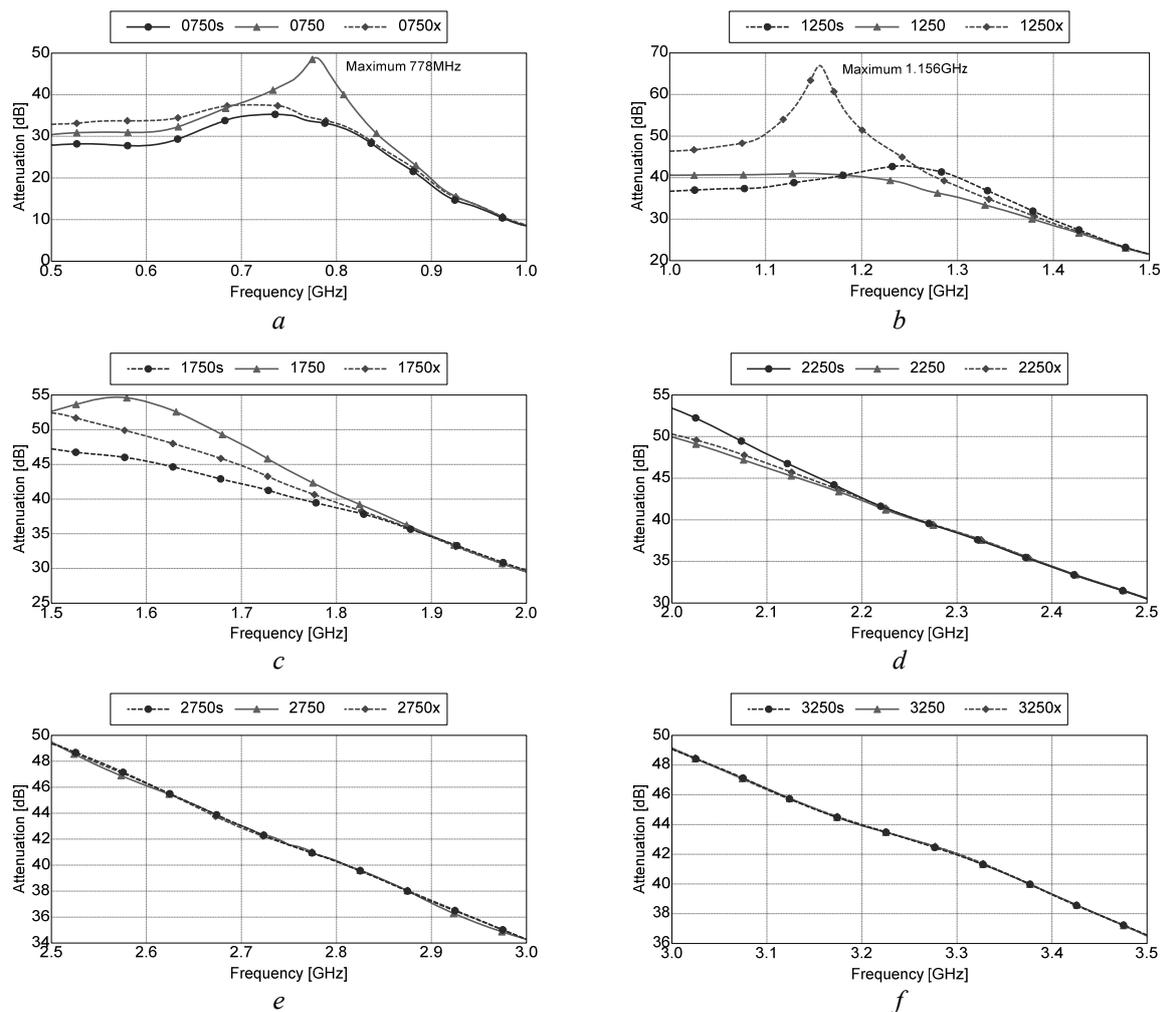


Рис. 5. Скриншоты окна программы с результатами моделирования для дальней зоны в диапазоне: *a* – 0,5–1,0 ГГц; *b* – 1,0–1,5 ГГц; *c* – 1,5–2,0 ГГц; *d* – 2,0–2,5 ГГц; *e* – 2,5–3,0 ГГц; *f* – 3,0–3,5 ГГц

Fig. 5. Screenshots of the program window with simulation results for the far field in the range: *a* – 0.5–1.0 GHz; *b* – 1.0–1.5 GHz; *c* – 1.5–2.0 GHz; *d* – 2.0–2.5 GHz; *e* – 2.5–3.0 GHz; *f* – 3.0–3.5 GHz

При изменении толщины ткани нельзя однозначно определить характер поглощения в диапазоне частот 0,5–2 ГГц, в то время как в диапазоне 2–3,5 ГГц значительных изменений формы кривых нет. Можно заметить, что при изменении толщины наблюдается как увеличение, так и уменьшение поглощения, что говорит о нелинейном характере изменения поглощения в зависимости от размеров структуры.

Таким образом, можно сделать вывод, что поглощение различными структурами мозга будет отличаться в связи с его неоднородностью, различием размеров и изменением пути прохождения волны в зависимости от направления. Это приводит к проблеме оценки количества поглощенной электромагнитной энергии, которое будет не столько зависеть от частоты передатчика (при одинаковой мощности), сколько от линейных размеров головы человека.

Заключение

Проведен анализ модели поглощения электромагнитной энергии в биологической ткани, в качестве которой был выбран мозг человека. В данной работе использовалась упрощенная модель биоткани, которая представляет собой многослойную структуру толщиной 156 мм.

Из результатов моделирования следует, что поглощение электромагнитной энергии биотканью неравномерно в пределах диапазона 500–3500 МГц, что, в первую очередь, связано с тем, что размеры структуры сопоставимы с длиной волны. На полученных кривых

параметра S_{21} можно заметить определенные максимумы. Это говорит о том, что в пределах данной области частотного спектра наблюдается увеличенное поглощение электромагнитной энергии. В частности, подобные максимумы обнаружены в районе частот 750, 938, 1250 и 1357 МГц ближней зоны. В дальней зоне кривые имеют неравномерный вид, который отличается от кривой параметра в ближней зоне. Замечено изменение в диапазоне 750–1000 МГц, а именно отсутствие пика поглощения и изменение характера кривой: значение параметра уменьшается, что свидетельствует о влиянии положения источника на количество задерживаемой в биоткани энергии.

Изменение поглощения при изменении толщины слоев биоткани дает неоднозначные результаты. Было обнаружено, что зависимость поглощения от толщины характерна до частоты 2000 МГц, после которой изменение параметра S_{21} незначительно либо отсутствует. При моделировании поведения биоткани в дальней зоне был обнаружен пик поглощения в районе частоты 1156 МГц. Данный пик наблюдается в модели с увеличенной толщиной слоев. В связи с этим необходимо проведение исследования поглощения в диапазоне 1000–1250 МГц.

Исходя из вышеизложенного, можно сделать вывод, что максимальное поглощение будет наблюдаться на длинах волн, кратных размерам биоткани. Таким образом, перспективой развития данной работы является создание моделей биологических тканей, характеристики которых будут максимально приближены к реальным многослойным структурам, но также максимально просты для расчетов и изменения их параметров (размеров, направлений облучения и т. п.).

Список литературы / References

1. Квашнин Г.М., Квашнина О.П., Сорокина Т.П. Модель поглощения СВЧ-энергии в биологических тканях. *Вестник Красноярского государственного аграрного университета*, 2009;(2):199-203. Kvashnin G.M., Kvashnina O.P., Sorokina T.P. [Model for microwave radiation absorption in biological tissues]. *Vestnik Krasnoyarskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = Bulletin of KrasSAU*, 2009;1(2):199-203. (In Russ.)
2. Awada B., Madi G., Mohsen A., Harb A., Diab A., Hamawy L., Hajj-Hassan M. Simulation of the Effect of 5G Cell Phone Radiation on Human Brain. *2018 IEEE International Multidisciplinary Conference on Engineering Technology (IMCET)*. 2018:1-6. DOI:10.1109/imcet.2018.8603063.
3. Esmekaya M., Ozer C., & Seyhan N. 900 MHz pulse-modulated radiofrequency radiation induces oxidative stress on heart, lung, testis and liver tissue. *General Physiology and Biophysics*. 2011;30(1):84-89. DOI:10.4149/gpb_2011_01_84.
4. Dasdag S., Akdag M.Z., Erdal M.E., Erdal N., Ay O.I., Ay M.E., Yegin K. Effects of 2.4 GHz radiofrequency radiation emitted from Wi-Fi equipment on microRNA expression in brain tissue. *International Journal of Radiation Biology*. 2015;91(7):555-561. DOI:10.3109/09553002.2015.1028599.
5. Gabriel S., Lau R.W., Gabriel C. The dielectric properties of biological tissues: II. Measurements in the frequency range 10 Hz to 1 Hz. *Phys. Med. Biol.* 1996;11(41):2251-2269. DOI:10.1088/0031-9155/41/11/002.
6. Gabriel C. *Compilation of the Dielectric Properties of Body Tissues at RF and Microwave Frequencies*. Texas;1996. DOI: 10.21236/ada303903.

Вклад авторов

Лагуцкий И.А. разработал модели биологических тканей и модели антенн, а также провел первичный анализа результатов моделирования.

Давыдов М.В. проанализировал параметры моделируемых биологических тканей, сформировал концепцию модели.

Кизищенко В.В. выполнил анализ разработанных моделей антенн.

Богуш В.А. осуществил постановку общих задач моделирования.

Authors' contribution

Lagutskiy I.A. developed biological tissue models, antenna models, and performed an initial analysis of the simulation results.

Davydov M.V. analyzed parameters of modeled biological tissues, formed a general concept of the model.

Kizimenko V.V. performed an analysis of the developed antenna models.

Bogush V.A. set the general tasks of modeling.

Сведения об авторах

Лагуцкий И.А., магистрант Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Давыдов М.В., к.т.н., доцент, первый проректор Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Кизименко В.В., магистр технических наук, начальник отдела антенн и устройств СВЧ НКЦ 1.6 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

Lagutskiy I.A., Master Student of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Davydov M.V., PhD, First Vice-Rector of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Kizimenko V.V., Master of Science, Head of the Antenna and Microwave Department, Center 1.6 of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Bogush V.A., D.Sci, 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. +375-33-358-92-08;
e-mail: ilya.laguckiy@yandex.ru
Лагуцкий Илья Александрович

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka str., 6,
Belarussian State University
of Informatics and Radioelectronics
tel. +375-33-358-92-08;
e-mail: ilya.laguckiy@yandex.ru
Lagutskiy Ilya Aleksandrovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2021-19-1-61-69>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.372.512

МЕТОДЫ СИНТЕЗА СОГЛАСУЮЩИХ ЦЕПЕЙ ДЛЯ ШИРОКОПОЛОСНЫХ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ С НЕСТАБИЛЬНЫМ ИМПЕДАНСОМ НАГРУЗКИ

И.А. ДУБОВИК¹, П.В. БОЙКАЧЕВ¹, В.О. ИСАЕВ¹, А.А. ДМИТРЕНКО²

¹Военная академия Республики Беларусь (г. Минск, Республика Беларусь)

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

Поступила в редакцию 22 июня 2020

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2021

Аннотация. Целью работы является выбор метода синтеза широкополосной согласующей цепи, обеспечивающей максимальную передачу мощности от источника сигнала в нагрузку при наличии изменяющегося импеданса нагрузки радиотехнического устройства. Для достижения поставленной цели был осуществлен анализ основных направлений проектирования широкополосных согласующих цепей (аналитические, численные, графоаналитические методы синтеза). По результатам сравнения методов синтеза были указаны их особенности (достоинства и недостатки). Был выполнен анализ методов синтеза широкополосных согласующих цепей. Для анализа были выбраны обобщенный метод Дарлингтона, метод вещественных частот, структурно-параметрический метод синтеза на основе аппарата Т-матрицы, графоаналитический метод на основе диаграммы Вольперта – Смитта. С помощью данных методов синтеза были получены широкополосные согласующие цепи применительно к различным типам нагрузок. Сопоставление полученных результатов осуществлялось по нескольким показателям: уровню коэффициента передачи мощности в рабочем диапазоне частот, чувствительности коэффициента передачи по мощности к изменению номиналов элементов согласующей цепи и импедансу нагрузки при условии, что количество элементов согласующей цепи не более шести. На основании проведенного сравнения и анализа методов синтеза было установлено, что для решения поставленной задачи наиболее предпочтительным является метод вещественных частот. Его достоинством является использование комбинационного подхода (итеративного нахождения параметров функции сопротивления с аналитическим представлением функции передачи). Согласующие цепи, полученные с помощью данного метода синтеза, обеспечили наибольший уровень коэффициента передачи по мощности, а также наименьшее значение чувствительности в заданной полосе частот для рассматриваемых типов нагрузок.

Ключевые слова: согласование, метод, чувствительность, нагрузка, широкополосный.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Дубовик И.А., Бойкачев П.В., Исаев В.О., Дмитренко А.А. Методы синтеза согласующих цепей для широкополосных радиотехнических устройств с нестабильным импедансом нагрузки. Доклады БГУИР. 2021; 19(1): 61-69.

METHODS FOR SYNTHESIS OF MATCHING CIRCUITS FOR BROADBAND RADIO DEVICES WITH UNSTABLE LOAD IMPEDANCE

ILYA A. DUBOVIK¹, PAUL V. BOYKACHEV¹, VLADISLAV O. ISAEV¹,
ALES A. DMITRENKO²

¹*Educational Institution "Military Academy of the Republic of Belarus" (Minsk, Republic of Belarus)*

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

Submitted 22 June 2020

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2021

Abstract. The aim of this work is to select a synthesis method for a broadband matching circuit that provides maximum power transfer from a signal source to a load in the presence of a changing load impedance of a radio engineering device. To achieve this goal, an analysis of the main directions of designing broadband matching circuits (analytical, numerical, graphic-analytical synthesis methods) was carried out. Based on the results of a comparison of synthesis methods, their features (advantages and disadvantages) were indicated. The analysis of methods of synthesis of broadband matching circuits was carried out. For the analysis, the generalized Darlington method, the method of real frequencies, the structural-parametric synthesis method based on the T-matrix apparatus, and the graphic-analytical method based on the Volpert-Smith diagram were chosen). Using these synthesis methods, broadband matching circuits were obtained for various types of loads. Comparison of the results obtained was carried out according to several indicators: the level of the power transfer coefficient in the operating frequency range, the sensitivity of the power transfer coefficient to the change in the ratings of the elements of the matching circuit and the load impedance, provided that the number of elements of the matching circuit is no more than six. Based on the comparison and analysis, it was found that the most preferable synthesis method for solving the problem posed is the method of real frequencies. Its advantage is the use of a combination approach (iterative determination of the parameters of the resistance function with an analytical representation of the transfer function). Matching circuits obtained using this synthesis method provided the highest level of power transmission coefficient, as well as the lowest sensitivity value in a given frequency band for the considered types of loads.

Keywords coordination, method, sensitivity, load, broadband.

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

For citation. Dubovik I.A., Boykachev P.V., Isaev V.O., Dmitrenko A.A. Methods for synthesis of matching circuits for broadband radio devices with unstable load impedance. Doklady BGUIR. 2021; 19(1): 61-69.

Введение

Современные радиотехнические устройства (РТУ) благодаря функционированию в широком диапазоне частот обеспечивают возможность высокоскоростной передачи большого объема информации. Важным фактором для качественной работы таких устройств является передача максимальной мощности сигнала от источника в нагрузку в широком диапазоне частот. Для этого необходимо обеспечить согласование сопротивления нагрузки с входным трактом РТУ. Для выполнения поставленной задачи в РТУ используются широкополосные согласующие цепи (ШСЦ).

В настоящее время широкое применение нашли методы синтеза ШСЦ, где в качестве нагрузки рассматриваются антенные, усилительные и другие устройства, представленные в виде значения комплексного сопротивления на дискретном ряде частот. Но в то же время в методах синтеза ШСЦ не учитывается непостоянство комплексного сопротивления нагрузки РТУ, вызванное изменениями окружающей среды либо условиями эксплуатации. Изменение величины комплексного сопротивления нагрузки приводит к рассогласованию тракта РТУ с нагрузкой. Это способствует появлению в тракте отраженной волны, что приводит к потерям мощности передаваемого (принимаемого) сигнала. Целью статьи является выбор метода

синтеза ШСЦ, который обеспечивает максимальный уровень передачи мощности от источника сигнала в нагрузку при наличии изменяющегося импеданса.

Постановка задачи

В общем случае задачу согласования сопротивления тракта РТУ с комплексным сопротивлением нагрузки можно свести к нахождению сопротивления реактивного четырехполюсника $Z_{\text{чп}}(s)$, обеспечивающего равенство активных (1) и компенсацию реактивных (2) составляющих сопротивления цепи с комплексным сопротивлением нагрузки.

$$\operatorname{Re}(Z_{\text{вх}}(s)) = \operatorname{Re}(Z_{\text{н}}(s)); \quad (1)$$

$$\operatorname{Im}(Z_{\text{вх}}(s)) = -\operatorname{Im}(Z_{\text{н}}(s)), \quad (2)$$

где $Z_{\text{вх}}(s) = Z_{\text{чп}}(s) + Z_{\text{г}}(s)$ – комплексное сопротивление цепи;

$Z_{\text{чп}}(s)$ – комплексное сопротивление четырехполюсника;

$Z_{\text{г}}(s)$ – комплексное сопротивление генератора;

$Z_{\text{н}}(s)$ – комплексное сопротивление нагрузки;

$s = \sigma + j\omega$ – комплексная частота.

Исходя из поставленной задачи, необходимо осуществить обзор и анализ методов синтеза ШСЦ, по результатам которых выбрать наиболее предпочтительный метод синтеза для решения задачи адаптации РТУ к изменяющемуся импедансу нагрузки. Для сравнения методов предлагается использовать следующие показатели качества:

1. Уровень коэффициента передачи мощности (КПМ) (выражение (3)) (обеспечение максимального уровня КПМ в заданной полосе частот является основной задачей согласования). Оценка уровня КПМ осуществляется относительно максимального значения КПМ ($K(f) = 1$) в рабочей полосе частот:

$$\Delta K = \frac{1}{f_{\text{в}} - f_{\text{н}}} \int_{f_{\text{н}}}^{f_{\text{в}}} [1 - K(f)]^2 df, \quad (3)$$

где $K(f) = \frac{4 \operatorname{Re} Z_{\text{вх}}(f) \operatorname{Re} Z_{\text{н}}(f)}{(\operatorname{Re} Z_{\text{вх}}(f) + \operatorname{Re} Z_{\text{н}}(f))^2 + (\operatorname{Im} Z_{\text{вх}}(f) + \operatorname{Im} Z_{\text{н}}(f))^2}$ – функция коэффициента передачи по мощности;

$f_{\text{в}}, f_{\text{н}}$ – верхняя (нижняя) частота рабочего диапазона частот.

2. Количество элементов согласующей цепи $N_{\text{эл}}$.

3. Чувствительность функции коэффициента передачи мощности к изменению комплексного сопротивления нагрузки (выражение (4)) (под чувствительностью понимается мера изменения функции КПМ, которая произошла в результате некоторого отклонения комплексного сопротивления импеданса нагрузки [1]). Чем меньше значение параметра, тем меньше влияние изменений импеданса нагрузки на уровень КПМ.

$$S_{\alpha}^{K(f, \alpha)} = \sum_{i=1}^n \frac{\partial K(f, \alpha_i)}{\partial \alpha_i} \frac{\alpha_i}{K(f, \alpha_i)}, \quad (4)$$

где α_i – элемент нагрузки (C, L, R);

$K(f, \alpha_i)$ – функция КПМ от частоты и параметров СЦ;

n – количество элементов в нагрузке.

Наиболее предпочтительным будет тот метод синтеза ШСЦ, который позволяет синтезировать цепи, обеспечивающие максимальный уровень КПМ (3) и минимальную чувствительность (4) в рабочем диапазоне частот.

Обзор методов широкополосного согласования

На данный момент можно выделить несколько групп методов синтеза ШСЦ:

- аналитические методы (Бодэ, Фано, Юлы, Дарлингтона, метод вносимых потерь и др.);
- численные методы (параметрические, структурно-параметрические);
- графоаналитические методы.

Аналитические методы синтеза ШСЦ предполагают синтез четырехполюсника, полное сопротивление которого может быть представлено в виде аналитического выражения, полученного в ходе аппроксимации требуемой характеристики коэффициента отражения либо функции КПМ. Нагрузки в аналитических методах представляются в виде эквивалентной цепи с полным сопротивлением $Z_n(s)$, так как необходимо знать наличие и расположение нулей передачи.

По результатам обзора аналитических методов Бодэ, Фано, Юлы [2], Вай Кай Ченя [3], представленных в работах Г. А. Филипповича [4], Вольховича Д.И.¹, Самуилова А.А.², установлено что аналитические решения позволяют исследовать влияние физических параметров, начальных и граничных условий на характер решения. Результаты аналитических решений способствуют разработке адекватных математических моделей исследуемых явлений. Они более информативны, вычисление решения при любом конкретном значении аргумента можно выполнить как угодно точно. Всегда существует возможность определения значения искомого параметра в любой точке, а не только в узлах сетки интерполяции, и получаемый результат всегда является устойчивым. В то же время главным недостатком аналитических решений является их ограниченные возможности в решении ряда сложных задач согласования. Для синтеза ШСЦ требуется представление (или предварительная аппроксимация) импеданса нагрузки в виде эквивалента, а функция КПМ должна быть задана с помощью аппроксимирующей функции (АФ). Процедура синтеза, как правило, является сложной и приводит к неоптимальным решениям (наличие трансформатора в согласующей цепи). Реализация согласующих цепей по заданному критерию соответствия их идеальным частотным и фазовым характеристикам исключительно трудна из-за сложности расчетов. Задача согласования для нагрузок с нулями передачи на фиксированных частотах не является тривиальной ввиду отсутствия подходящих АФ.

Численные методы синтеза предполагают синтез четырехполюсника, структура которого определена на начальном этапе или формируется в процессе синтеза исходя из целевой функции. Основным отличием численных методов от аналитических является отсутствие необходимости представления нагрузки только в виде эквивалента.

Численные методы синтеза ШСЦ разделяют на параметрические и структурно-параметрические. Основными представителями структурно-параметрического подхода являются методы синтеза на основе генетического алгоритма, а также каскадные методы (на основе аппарата Т-матрицы [5], канонических моделей и др.). Использование данных методов позволяет синтезировать множество вариантов ШСЦ, привязываясь лишь к порядку искомой целевой функции. Однако при использовании структурно-параметрического метода отсутствует полный контроль структуры и параметров ШСЦ, что может привести к практически нереализуемым решениям.

Одним из основных представителей параметрического метода является метод реальных (вещественных) частот [6]. Он имеет множество модификаций [7] и основан на сочетании аналитического и численного подходов к задаче синтеза. Основное преимущество данного метода по отношению к аналитическим состоит в том, что он не требует представления нагрузки в виде эквивалентной цепи. Функция КПМ при этом представляется в виде аналитического выражения, а согласующая цепь синтезируется с помощью итеративных подходов.

¹ Вольхович Д.И. *Синтез широкополосных согласующих устройств с заданными фазовыми характеристиками: дис. ... канд. техн. наук: 05.12.07.* Новосибирск; 2018:11-20.

² Самуилов А.А. *Автоматизированное проектирование широкополосных согласующих и корректирующих цепей СВЧ устройств на основе интерактивного «визуального» подхода: дис. ... канд. техн. наук: 05.12.07.* Томск; 2014: 255 л.

Графоаналитический метод синтеза подразумевает графическое представление характеристик линии передачи в виде круговой диаграммы. Суть метода состоит во включении в цепь между сопротивлением генератора и нагрузки различных реактивных элементов, что изменяет величину сопротивления цепи, которая контролируется по диаграмме Вольперта – Смита [7]. Основным преимуществом данного метода по отношению к аналитическим и численным методам синтеза является иллюстративность получения простых Г- или L-образных согласующих цепей. Данный метод синтеза является трудоемким, не обеспечивает простого механизма определения оптимальной структуры согласующей цепи.

Таким образом, исходя из проведенного обзора методов синтеза ШСЦ, следует:

- использование аналитических методов позволяет найти решение задачи синтеза ШСЦ для нагрузок, имеющих невысокий порядок и представленных в виде эквивалента, ограничиваясь при этом выбранной АФ;

- параметрические и структурно-параметрические методы синтеза всегда приводят к определенному результату, но они зависят от выбора начального приближения и способа формирования целевой функции. Существуют проблемы сходимости. Возможно получение только локальных оптимумов;

- использование графоаналитического метода синтеза приводит к получению простых Г- или L-образных согласующих цепей, нагруженных на $Z_H(s)$. Методика является трудоемкой при расчете ШСЦ.

Анализ методов широкополосного согласования

Для анализа методов синтеза были синтезированы ШСЦ, обеспечивающие максимальный уровень КПМ в нормированном диапазоне частот ($f = 0-1$ Гц). В качестве сопротивления генератора использовалось активное сопротивление ($R_r = 1$ Ом), а в качестве сопротивления нагрузки [4] – нагрузки различных классов (табл. 1), отличающиеся друг от друга расположением нулей передачи.

Таблица 1. Классы используемых нагрузок
Table 1. Classes of used loads

Класс нагрузки Load class	Эквивалентная схема Equivalent scheme	Функция сопротивления нагрузки Load resistance function
Нагрузка с нулями передачи I класса (туннельные диоды, кварцы) Load with class I transmission zeros (tunnel diodes, quartz)		$Z_H(s) = \frac{(R_1 + R_2) + R_1 R_2 C s}{1 + R_2 C s}$
Нагрузка с нулями передачи II класса (проволочные антенны в диапазонах работы длинных, средних и коротких волн) Load with class II transmission zeros (wire antennas in the long, medium and short wave ranges)		$Z_H(s) = \frac{1 + C s R}{C s}$
Нагрузка с нулями передачи III класса (антенны, транзисторы и др.) Load with class III transmission zeros (antennas, transistors, etc.)		$Z_H(s) = \frac{R(C L s^2 + 1)}{C L s^2 + C R s + 1}$
Нагрузка с нулями передачи IV класса (биполярный транзистор) Load with class IV transmission zeros (bipolar transistor)		$Z_H(s) = \frac{R}{1 + C s R}$

ШСЦ были синтезированы с помощью обобщенного метода Дарлингтона, метода вещественных частот, структурно-параметрического метода на основе аппарата T-матрицы,

а также графоаналитического метода. Результаты синтеза ШСЦ представлены в табл. 2. Исходя из полученных результатов, можно убедиться в том, что использование аналитических методов синтеза не позволяет синтезировать ШСЦ для любых типов нагрузки в отличие от численных и графоаналитических методов синтеза. Данное заключение особенно актуально для сложных нагрузок современных РТУ, поиск которых является непростой задачей [9]. Таким образом, аналитические методы для синтеза ШСЦ с учетом изменяющегося импеданса нагрузки предлагается не использовать.

В табл. 3 представлены показатели качества синтезированных ШСЦ (выражения (3), (4)).

Таблица 2. Результаты синтеза ШСЦ
Table 2. Synthesis results of broadband matching devices

Класс нагрузки Load class	Методика синтеза Synthesis Method			
	Метод вещественных частот Method Real Frequency	Графоаналитический метод Вольперта – Смита Grafoanalytic method of Volpert – Smith	Структурно-параметрический метод на основе аппарата Т-матрицы Structural-parametric method based on the apparatus of the T-matrix	Обобщенный метод Дарлингтона Generalized Darlington Method
I класс ($R_1 = 0,2 \text{ Ом}$, $R_2 = 3 \text{ Ом}$, $C = 0,05 \text{ Ф}$) I class				—
II класс ($R = 1 \text{ Ом}$, $C = 1,414 \text{ Ф}$) II class				
III класс ($L_1 = 4 \text{ Гн}$, $L_2 = 0,75 \text{ Гн}$, $L_3 = 0,3 \text{ Гн}$, $C = 2 \text{ Гн}$) III class				—
IV класс ($C = 0,2 \text{ Ф}$, $R = 5 \text{ Ом}$) IV class				

Таблица 3. Результаты оценки синтезированных ШСЦ по различным критериям
Table 3. Results of the assessment of synthesized broadband matching chains by various criteria

Метод синтеза ШСЦ SC synthesis technique	Тип нагрузки											
	первого класса first class			второго класса second class			третьего класса third class			четвертого класса fourth class		
	ΔK	N	$S_{\alpha}^{K(f,a)}$	ΔK	N	$S_{\alpha}^{K(f,a)}$	ΔK	N	$S_{\alpha}^{K(f,a)}$	ΔK	N	$S_{\alpha}^{K(f,a)}$
Структурно-параметрический синтез на основе аппарата Т-матрицы Structural-parametric method based on the apparatus of the T-matrix	0,212	4	0,77	0,122	5	1,835	0,14	6	0,75	0,328	5	0,896
Метод вещественных частот Method Real Frequency	0,132	4	0,256	0,075	2	3,91	0,221	3	0,65	0,22	2	0,678
Графоаналитическая методика Вольперта – Смита Grafoanalytic method of Volpert – Smith	0,204	2	0,342	0,079	2	4,089	0,486	3	1,03	0,248	2	0,681

По результатам анализа полученных данных было установлено:

– ШСЦ, синтезированные методом вещественных частот, позволяют обеспечить наибольший уровень КПМ для нагрузок 1-го ($\Delta K = 0,132$) и 2-го классов ($\Delta K = 0,075$), а также имеют небольшой порядок и наименьшее значение чувствительности функции КПМ к изменению параметров нагрузки. Для 1-го ($S_a^{K(f,\alpha)} = 0,22$), 3-го ($S_a^{K(f,\alpha)} = 0,65$) и 4-го ($S_a^{K(f,\alpha)} = 0,678$) классов нагрузок синтезированные ШСЦ обладают наименьшей чувствительностью по отношению к другим методам синтеза. Это связано с использованием комбинационного подхода (использование аналитических выражений и итерационной процедуры оптимизации). Использование данного подхода позволяет за счет аналитических выражений и знания структуры цепи учитывать влияние параметров нагрузки на КПМ, что обеспечивает минимальное значение чувствительности, а использование итерационной процедуры поиска обеспечивает оптимальный уровень КПМ;

– ШСЦ, синтезированные с помощью графоаналитического метода синтеза, обладают наименьшим порядком ($N_{эл} = 2$) по отношению к другим методам синтеза. Это связано с тем, что согласование осуществляется на центральной частоте. Синтезированные данным методом цепи обладают малой добротностью, для которой достаточно иметь Г-, П- или Т-образную структуру согласующей цепи;

– ШСЦ, синтезированные с помощью структурно-параметрического метода синтеза на основе аппарата Т-матрицы позволяют обеспечить максимальный уровень КПМ для нагрузки 3-го класса ($\Delta K = 0,14$), но по отношению к другим методам обладают наибольшим порядком ШСЦ ($N = 4-6$). Даже исходя из того, что уменьшения чувствительности КПМ к изменению импеданса нагрузки можно добиться увеличением порядка (количеством элементов ШСЦ) [10], использование структурно-параметрического метода синтеза не обеспечивает минимального значения чувствительности. Это происходит из-за того, что структура ШСЦ в структурно-параметрическом методе синтеза известна лишь на последнем этапе синтеза.

Заключение

Исходя из анализа полученных результатов (табл. 3), можно сделать следующие выводы. Использование аналитической теории для синтеза ШСЦ с учетом изменяющегося импеданса нагрузки нецелесообразно. Применение структурно-параметрических методов синтеза позволяет синтезировать ШСЦ, которые обеспечивают оптимальное значение целевой функции. Но, поскольку структура цепи известна лишь на последнем этапе синтеза, данные ШСЦ не будут обеспечивать минимальную чувствительность. Таким образом, для решения задачи синтеза ШСЦ с учетом влияния изменения параметров нагрузки и согласующей цепи целесообразным является использование метода вещественных частот. Данный метод показал наилучшие результаты по используемым показателям качества в сравнении с другими методами. Это обусловлено тем, что в параметрических методах структура согласующей цепи известна, а использование комбинационного подхода позволяет за счет аналитического представления функции передачи обеспечивать как высокий уровень КПМ, так и минимальную чувствительность.

Список литературы

1. Гехер К. Теория чувствительности и допусков электронных цепей. Москва: Сов. радио; 1973.
2. Youla D.C. A new theory of broadband matching. *IEEE Trans.* 1964;11(1):30-50.
3. Chen W.K. Synthesis of optimum Butterworth and Chebyshev broad-band impedance-matching networks. *IEEE Trans.* 1977;5(24):157-169.
4. Филиппович Г.А. Широкополосное согласование сопротивлений. Минск; 2004.
5. Васильев А.Д. Структурно-параметрический синтез многополосных согласующе-фильтрующих схем на основе аппарата Т-матриц. *Вестник Военной академии Республики Беларусь.* 2010;1:73-80.
6. Carlin H., Amstutz P., Broadband M. *Anales des telecommunications. IEEE Trans.* 1981;28(5):401-405.
7. Yarman B.S. Real frequency broadband matching using linear programming. *RCA Rev.* 1982;43(4):626-654.
8. Курушин А.А.; ред: Когана Б.Л. Проектирование СВЧ устройств с использованием электронной диаграммы Смита. Москва: МЭИ; 2008.

9. Yarman B.S. Design of Ultra Wideband Power Transfer Networks. Hoboken, NJ: Wiley; 2010.
10. Курочкин А.Е. Теоретические основы активных магнитных антенн. Минск; 2003.

References

1. Geher K. [Theory of sensitivity and tolerances of electronic circuits]. Moscow: Sov. Radio; 1973. (In Russ)
2. Youla D.C. A new theory of broadband matching. *IEEE Trans.* 1964;11(1):30-50.
3. Chen W.K. Synthesis of optimum Butterworth and Chebyshev broad-band impedance-matching networks. *IEEE Trans.* 1977;5(24):157-169.
4. Filippovich G.A. [*Broadband resistance matching*]. Minsk, 2004. (In Russ.)
5. Vasiliev A.D. [Structural-parametric synthesis of multi-band matching-filtering schemes based on the T-matrix apparatus]. *Vestnik Voennoj akademii Respubliki Belarus.* 2010;1:3-80. (In Russ.)
6. Carlin H., Amstutz P., Broadband M. *Anales des telecommunications. IEEE Trans.* 1981;28(5):401-405.
7. Yarman B.S. Real frequency broadband matching using linear programming. *RCA Rev.* 1982;43(4):626-654.
8. Kurushin A.A., ed.: B.L. Kogan. [*Designing microwave devices using an electronic Smith diagram*]. Moscow: MEI; 2008. (In Russ.)
9. Yarman B.S. Design of Ultra Wideband Power Transfer Networks. Hoboken, NJ: Wiley; 2010.
10. Kurochkin A.E. [*Theoretical foundations of active magnetic antennas*]. Minsk; 2003. (In Russ.)

Вклад авторов

Дубовик И.А. синтезировал широкополосные СЦ различными методами синтеза и выполнил анализ полученных результатов.

Бойкачев П.В. выполнил сравнительный анализ и обобщил достоинства и недостатки аналитических, численных, а также графоаналитических методов синтеза.

Исаев В.О. принял участие в оформлении иллюстративных материалов.

Дмитренко А.А. выполнил редактирование и окончательное утверждение рукописи для публикации, ее критический пересмотр в части значимого интеллектуального содержания.

Authors' contribution

Dubovik I.A. synthesized broadband SC with various synthesis methods and conducted an analysis of the results.

Boykachev P.V. conducted a comparative analysis and generalization of the advantages and disadvantages of the analysed methods.

Isaev V.O. took part in the design of illustrative materials.

Dmitrenko A.A. wrote critical review of important intellectual content and approved the prepared article for the publication.

Сведения об авторах

Дубовик И.А., магистр технических наук, адъюнкт Военной академии Республики Беларусь.

Бойкачев П.В., к.т.н, доцент, начальник цикла кафедры автоматизи, радиолокации и приемопередающих устройств Военной академии Республики Беларусь.

Исаев В.О., магистр технических наук, адъюнкт Военной академии Республики Беларусь.

Дмитренко А.А., к.т.н., доцент, доцент кафедры радиоэлектроники ВВС и войск ПВО Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Information about the authors

Dubovik I.A., Master of Technical Sciences, Associate of Military Academy of the Republic of Belarus.

Boykachev P.V., Ph.D., Associate Professor, Head of the Cycle of the Automation, Radar and Transceiver Devices Department of Military Academy of the Republic of Belarus.

Isaev V.O., Master of Technical Sciences, Associate Professor of Military Academy of the Republic of Belarus.

Dmitrenko A.A., PhD, Associate Professor, Associate Professor of Air Force and Air Defense Electronic Equipment Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Адрес для корреспонденции

220057, Республика Беларусь,
г. Минск, пр. Независимости, 220,
Военная академия Республики Беларусь
тел. +375-17-287-46-52;
e-mail: duba-77@mail.ru
Дубовик Илья Андреевич

Address for correspondence

220057, Republic of Belarus,
Minsk, Nezavisimosty ave., 220,
Military Academy of the Republic of Belarus
tel. +375-17-287-46-52;
e-mail: duba-77@mail.ru
Dubovik Ilya Andreevich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2021-19-1-70-78>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.391.63:681.7.068

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК МУЛЬТИДАТЧИКА НА ОСНОВЕ ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА

А.О. ЗЕНЕВИЧ, С.В. ЖДАНОВИЧ, Г.В. ВАСИЛЕВСКИЙ, А.А. ЛАГУТИК,
Т.Г. КОВАЛЕНКО, Т.М. ЛУКАШИК

Белорусская государственная академия связи (г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 21 сентября 2020

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2021

Аннотация. В работе представлены результаты исследований мультидатчиков на основе оптического волокна, принцип работы которых заключается в изменении условий распространения оптического излучения в оптическом волокне в местах формирования макроизгибов в точках воздействия. Наличие макроизгибов приводит к появлению дополнительного ослабления мощности оптического излучения, распространяющегося по оптическому волокну. Использовалось одномодовое оптическое волокно с параметрами, которые поддерживаются многочисленными производителями и соответствуют рекомендации МСЭ-Т G.655. Измерения проводились для четырех длин волн оптического излучения (1310, 1490, 1550, 1625 нм), соответствующих окнам прозрачности спектра оптических потерь оптоволокна. Методами оптической рефлектометрии определено, что величина ослабления оптического излучения каждого макроизгиба, формируемого в точке воздействия мультидатчика, не зависит от количества одновременно сформированных макроизгибов, а также не зависит от расположения точки воздействия по длине мультидатчика. Экспериментально определены зависимости ослабления мощности оптического излучения, вносимого макроизгибами оптического волокна, от радиуса, длины или угла макроизгибов, формируемых в точках воздействия мультидатчика. Полученные зависимости также позволяют определить оптимальные параметры формируемых макроизгибов мультидатчика для получения максимального диапазона изменения ослабления для каждого значения длины волны. Определены величины минимального расстояния между точками воздействия, максимального количества точек воздействия и оптимальных величин радиуса и угла макроизгиба оптического волокна в точках воздействия. Полученные результаты дают основания продолжить разработку мультидатчиков, которые позволяют одновременно по одному оптическому волокну получать информацию о параметрах с нескольких точек воздействия, которые размещены по этому оптоволокну.

Ключевые слова: оптическое волокно, макроизгиб, оптическое излучение, рефлектометр, мультидатчик, ослабление, датчик.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарности. Исследования проводились при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (№ T20M-082).

Для цитирования. Зеневич А.О., Жданович С.В., Василевский Г.В., Лагуттик А.А., Коваленко Т.Г., Лукашик Т.М. Исследование характеристик мультидатчика на основе оптического волокна. Доклады БГУИР. 2021; 19(1): 70-78.

RESEARCH OF MULTISENSOR CHARACTERISTICS BASED ON OPTICAL FIBER

ANDREI O. ZENEVICH, SIARHEI V. ZHDANOVICH, HERMAN V. VASILEVSKY,
ANASTASIA A. LAGUTIK, TATIANA G. KOVALENKO, TATIANA M. LUKASHIK

Belarusian State Academy of Communications (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 21 September 2020

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2021

Abstract. The research results of multisensors based on optical fiber, the principle of which is to change the conditions of propagation of optical radiation in the optical fiber in the places where macro-bends are formed at the points of impact, are presented in the paper. The formation of macro-bends leads to an additional attenuation of the power of optical radiation propagating through the optical fiber. A single-mode optical fiber was used with the parameters, which are supported by numerous manufacturers and comply with the recommendations of ITU-T G.655. The measurements were carried out for four wavelengths of optical radiation (1310, 1490, 1550, 1625 nm), corresponding to the transparency windows of the optical loss spectrum of the optical fiber. Using optical reflectometry methods, it was determined that the amount of attenuation of optical radiation of each macro-bend formed at the point of action of the multisensor does not depend on the number of simultaneously formed macro-bends and also does not depend on the location of the point of action along the length of the multisensor. The dependences of the attenuation of the optical radiation power introduced by the macro-bends of the optical fiber on the radius, length, or angle of the macro-bends formed at the multisensor impact points are determined experimentally. The obtained dependences also allow one to determine the optimal parameters of the formed macro-bends of the multisensor to obtain the maximum range of attenuation change for each value of the wavelength. The values of the minimum distance between the impact points, the maximum number of impact points and the optimal values of the radius and angle of the optical fiber macro-bend at the impact points are determined. The results obtained provide opportunities to continue the development of multisensors that allow us to receive information about parameters from several impact points, that are located on a single optical fiber, simultaneously.

Keywords: optical fiber, macro-bend, optical radiation, reflectometer, multisensor, attenuation, sensor.

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

Gratitude. This work was supported by the grant T20M-082 of the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research.

For citation. Zenevich A.O., Zhdanovich S.V., Vasilevsky H.V., Lagutik A.A., Kovalenko T.G., Lukashik T.M. Research of multisensor characteristics based on optical fiber. Doklady BGUIR. 2021; 19(1): 70-78.

Введение

Принцип работы мультидатчика на основе оптического волокна представлен в [1] и заключается в изменении условий распространения оптического излучения в оптическом волокне в местах формирования макроизгибов в точках воздействия, что приводит к появлению дополнительного ослабления мощности оптического излучения, распространяющегося по оптическому волокну. Мультидатчик на основе оптического волокна – это область оптического волокна, где в точках воздействия формируется несколько макроизгибов оптического волокна, что позволяет регистрировать несколько входных величин. В работах [2, 3] показана возможность создания достаточно простых в реализации датчиков на основе одного макроизгиба оптического волокна. Мультидатчик позволяет одновременно по одному оптическому волокну получать информацию о параметрах с нескольких точек воздействия, которые размещены по этому оптоволокну. Целью исследований является определение характеристик мультидатчика на основе оптического волокна. Установлены зависимости ослабления мощности оптического излучения, вносимого макроизгибами,

от радиуса, длины или угла макроизгибов, формируемых в точках воздействия мультидатчика. Определены величины минимального расстояния между точками воздействия, максимального количества точек воздействия и оптимальных параметров макроизгиба оптического волокна в точках воздействия.

Методика измерений и применяемое оборудование

При проведении измерений использовались поверенные и калиброванные приборы: оптический рефлектометр МТР 6000, оптический рефлектометр FX 300, оптический тестер ОТ 3-1, термогигрометр ИВА-6Н-Д. Измерения проводились в соответствии с требованиями, определяемыми ГОСТ ISO/IEC 17025-2019, контролировались условия окружающей среды: температура от 20 до 25 °С, влажность до 70 %, атмосферное давление от 975 до 1025 гПа. Для создания мультидатчика использовалось одномодовое оптическое волокно с параметрами, соответствующими рекомендации МСЭ-Т G.655.

Было проведено измерение ослабления, вносимого макроизгибами в точках воздействия мультидатчика, для четырех длин волн оптического излучения (1310, 1490, 1550, 1625 нм), соответствующих окнам прозрачности спектра оптических потерь оптоволоконной G.655. Радиус исследуемых макроизгибов оптического волокна R изменялся в диапазоне от 5,2 до 12,5 мм, при меньших радиусах макроизгиба оптическое волокно может быть повреждено, а при больших радиусах ослабление мощности оптического излучения очень мало. Исследования проводились при углах макроизгиба оптического волокна Q в пределах от $\pi/2$ до 2π рад и соответственно при длинах дуги макроизгиба оптического волокна L в пределах от 8,24 до 78,5 мм. Количество точек воздействия мультидатчика – до 9, количество измерений ослабления в каждой точке воздействия – до 14 при каждом сочетании параметров эксперимента.

Для исследования величины ослабления оптического излучения, вносимого в точках воздействия каждым макроизгибом мультидатчика, использовались рефлектометры, проводились измерения с двух сторон оптического волокна (FC-коннектор со стороны А и FC-коннектор со стороны В). При проведении измерений использовалась минимально возможная длительность зондирующих импульсов оптического рефлектометра 3 нс, что позволяет наиболее точно определить параметры мультидатчика.

Для исследования величины ослабления оптического излучения во всей волоконно-оптической линии использовался оптический тестер. К FC-коннектору со стороны А подключались источники излучения оптического тестера, предназначенные для формирования стабильных регулируемых уровней оптической мощности с длинами волн: 1310, 1490, 1550 и 1625 нм. К FC-коннектору со стороны В подключался оптоэлектронный преобразователь оптического тестера, предназначенный для измерения оптической мощности.

Результаты и их обсуждение

На рис. 1, а представлена типичная рефлектограмма для случая формирования в двух точках воздействия макроизгибов оптического волокна с радиусом $R = 9$ мм и углом макроизгиба $Q = \pi$ рад при длине волны оптического излучения лазера $\lambda = 1625$ нм. На рис. 1, б – увеличенный фрагмент области с макроизгибами оптоволоконной линии в точках воздействия. На рефлектограмме области макроизгибов видны как «ступеньки». Каждый макроизгиб оптоволоконной линии имеет величину ослабления оптического излучения a_s .

Динамический диапазон области формирования точек воздействия (макроизгибов) мультидатчика D_W равен разности величины динамического диапазона рефлектометра D и ослабления, вносимого участками оптоволоконной линии a_{F1} и a_{F2} до и после области формирования макроизгибов: $D_W = D - a_{F1} - a_{F2}$. Динамический диапазон рефлектометров FX 300 и МТР 6000 при длительности зондирующих импульсов 3 нс для диапазона расстояния 5 км в зависимости от длины волны оптического излучения составляет 15–20 дБ.

Максимальное количество точек воздействия мультитатчика, ограниченное динамическим диапазоном рефлектометра N_{PDmax} , можно определить как $N_{PDmax} = D_W / \sum_{i=1}^n a_{Si}$,

где a_{Si} – ослабление на каждом макроизгибе мультитатчика. На рис. 1, *b* показано, что для макроизгиба оптического волокна на рефлектограмме отображается мертвая зона, соответствующая неотражающей неоднородности, которая имеет длину L_S . Таким образом, L_S определяет минимально разрешимое расстояние между двумя макроизгибами. Когда расстояние между макроизгибами меньше L_S , их отображения на рефлектограмме перекрываются. Величина L_S зависит от длительности зондирующих импульсов рефлектометра, разрешения по расстоянию рефлектометра, метода усреднения и обработки отраженного сигнала рефлектометром, а также величины ослабления оптического излучения, вносимого макроизгибом a_S . Установлено, что при изменении a_S пропорционально изменяется L_S , при увеличении a_S от 0,2 до 5 дБ L_S увеличивается от 4 до 9 м.

Расстояние между точками воздействия мультитатчика (макроизгибами оптического волокна) L_P можно представить как сумму длин L_S и L_R (длина участка на рефлектограмме, где нет проявления мертвой зоны макроизгиба). Минимальное расстояние между точками воздействия мультитатчика, которое позволяет их различить на рефлектограмме, $L_{Pmin} = L_S + L_{Rmin}$, где L_{Rmin} зависит от разрешения по расстоянию рефлектометра (интервал дискретизации сигнала обратного рассеяния) и допустимой абсолютной погрешности рефлектометра. Таким образом, максимальное количество точек воздействия мультитатчика с длиной L_{MD} можно определить как $N_{PLmax} = L_{MD} / L_{Pmin}$ (необходимо учитывать N_{PDmax}).

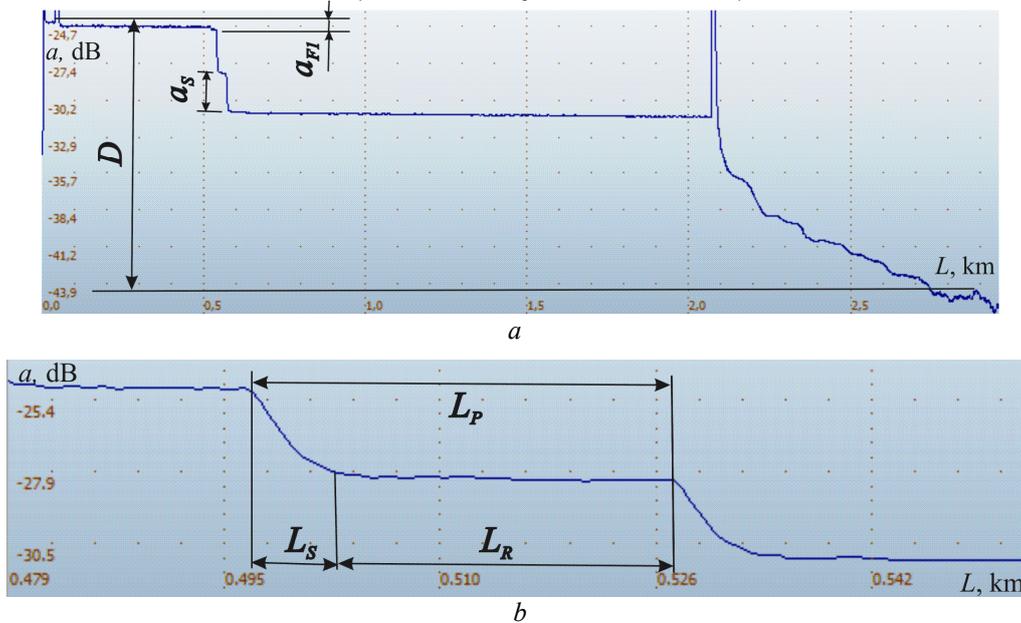


Рис. 1. Рефлектограмма мультитатчика на основе оптоволокна с двумя макроизгибами:
a – полная рефлектограмма, *b* – фрагмент рефлектограммы с областью макроизгибов оптоволокна

Fig. 1. Reflectograms of a multisensor based on an optical fiber with two macrobends:
a – full trace, *b* – fragment of the trace with the region of macrobends of the optical fiber

Рефлектограммы, которые получены при исследовании мультитатчика для четырех длин волн оптического излучения, при различных параметрах макроизгиба, различном количестве точек воздействия, позволяют определить, что ослабление оптического излучения каждого макроизгиба не зависит от количества одновременно формируемых макроизгибов, не зависит от расположения точки воздействия по длине мультитатчика. На рис. 2 представлены участки рефлектограмм, полученных при $\lambda = 1490$ нм, $R = 9$ мм и $Q = \pi$ рад, где видны девять макроизгибов. Измерения проведены с двух сторон оптического волокна со стороны А и стороны В. Видно, что отображенные на рефлектограммах «ступеньки» макроизгибов 1–9 соответственно по величине вносимого ослабления равны на обоих рефлектограммах (рис. 2, *a, b*), например, «ступеньки» 2 и 7 меньше чем 3 и 5. Кроме того, длина оптоволоконной линии до области формирования макроизгибов 470 или 1530 м не

оказывает влияния на параметры макроизгибов. Экспериментальные исследования проводились двумя рефлектометрами различных типов (FX 300 МТР 6000) и показали одинаковые результаты (в пределах погрешности). Полученные результаты позволяют сделать вывод о независимости параметров мультидатчика в точках воздействия от положения точки воздействия, длины линии оптоволокна до и после мультидатчика, а также количества точек воздействия (в ранее определенных пределах: N_{PLmax} и N_{PDmax}).

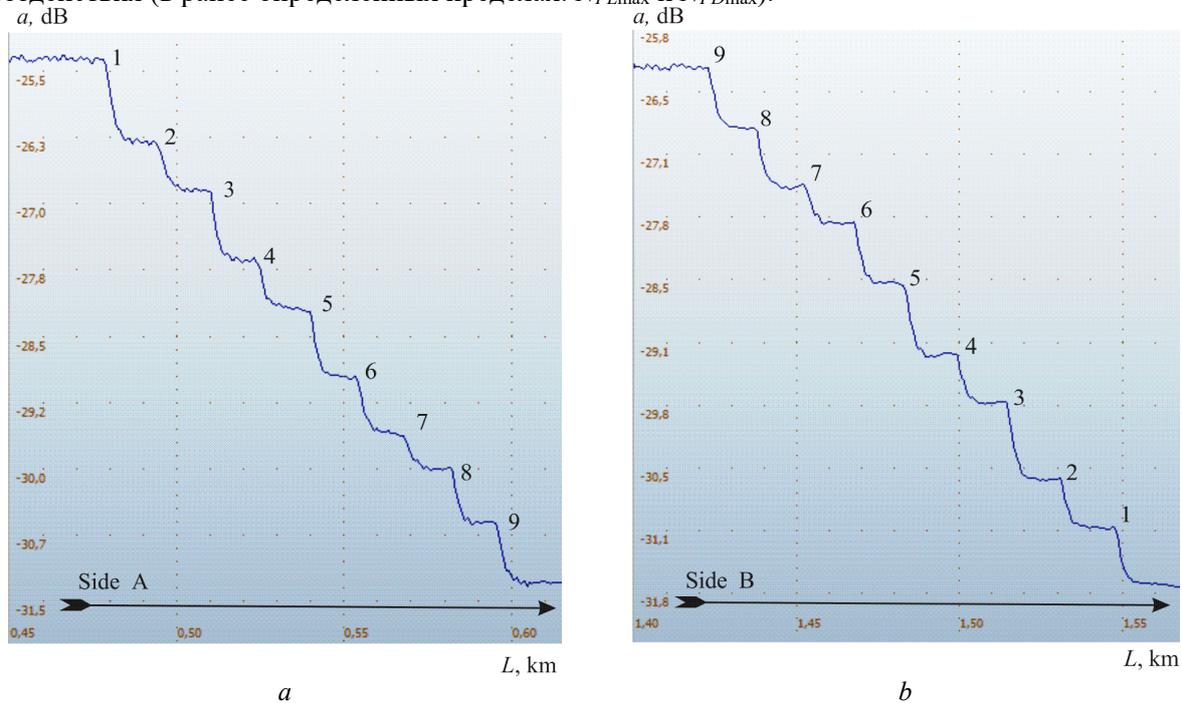


Рис. 2. Участки рефлектограмм, отображающих девять макроизгибов оптического волокна:
a – измерения проводились со стороны А; *b* – измерения проводились со стороны В
Fig. 2. Sections of reflectograms showing nine macrobends of the optical fiber:
a – measurements were taken from side А; *b* – measurements were taken from side В

Экспериментальные исследования по измерению мощности оптического излучения, проведенные с помощью оптического тестера ОТ 3-1, также показали, что наблюдается пропорциональное количеству формируемых макроизгибов изменение мощности оптического излучения, проходящего через мультидатчик. На рис. 3, *a* представлен график зависимости мощности оптического излучения, прошедшего через мультидатчик, от количества одинаковых макроизгибов ($R = 5,2$ мм и $Q = \pi$ рад) при постоянной мощности оптического излучения на входе мультидатчика (1 мВт). Проведены исследования ослабления вносимого макроизгибами оптического волокна в точках воздействия мультидатчика в зависимости от радиуса макроизгиба и длины дуги макроизгиба для четырех длин волн оптического излучения. На рис. 3, *b, c* представлены зависимости средней величины ослабления от величины угла макроизгиба оптического волокна (в пределах от $\pi/2$ до 2π рад) и от длины дуги макроизгиба S для различных R . На рис. 3, *d* виден нелинейный характер уменьшения величины ослабления оптического излучения на макроизгибе при увеличении длины дуги макроизгиба и $Q = \text{const}$. При увеличении длины волны оптического излучения кривые зависимостей идут выше и хорошо аппроксимируются экспоненциальной функцией. Аналогичны зависимости ослабления от радиуса макроизгиба при различных углах макроизгиба (рис. 3, *e*). На рис. 3, *f* представлены зависимости средних значений ослабления оптического излучения на макроизгибах оптического волокна от длины волны. По горизонтальной оси приведены длины волн в линейном масштабе, однако, соединительные линии между экспериментальными точками условны, так как необходимо учитывать неравномерную зависимость спектра оптических потерь в кварцевых оптических волокнах от длины волны, а измерения проводились только на фиксированных длинах волн оптического излучения, которые находятся в окнах прозрачности спектра оптических потерь. При всех четырех длинах волн, использованных при измерениях, регистрируются только макроизгибы

оптоволокну с $R = 7$ мм и $Q = \pi$ рад. Макроизгибы с другими радиусами и углами регистрируются только на трех или двух длинах волн. Это объясняется тем, что либо ослабление оптического излучения на макроизгибах в точках воздействия мультитатчика превышает динамический диапазон рефлектометра, либо из-за весьма малой величины ослабления оптического излучения макроизгибы в точках воздействия мультитатчика не регистрируются рефлектометром.

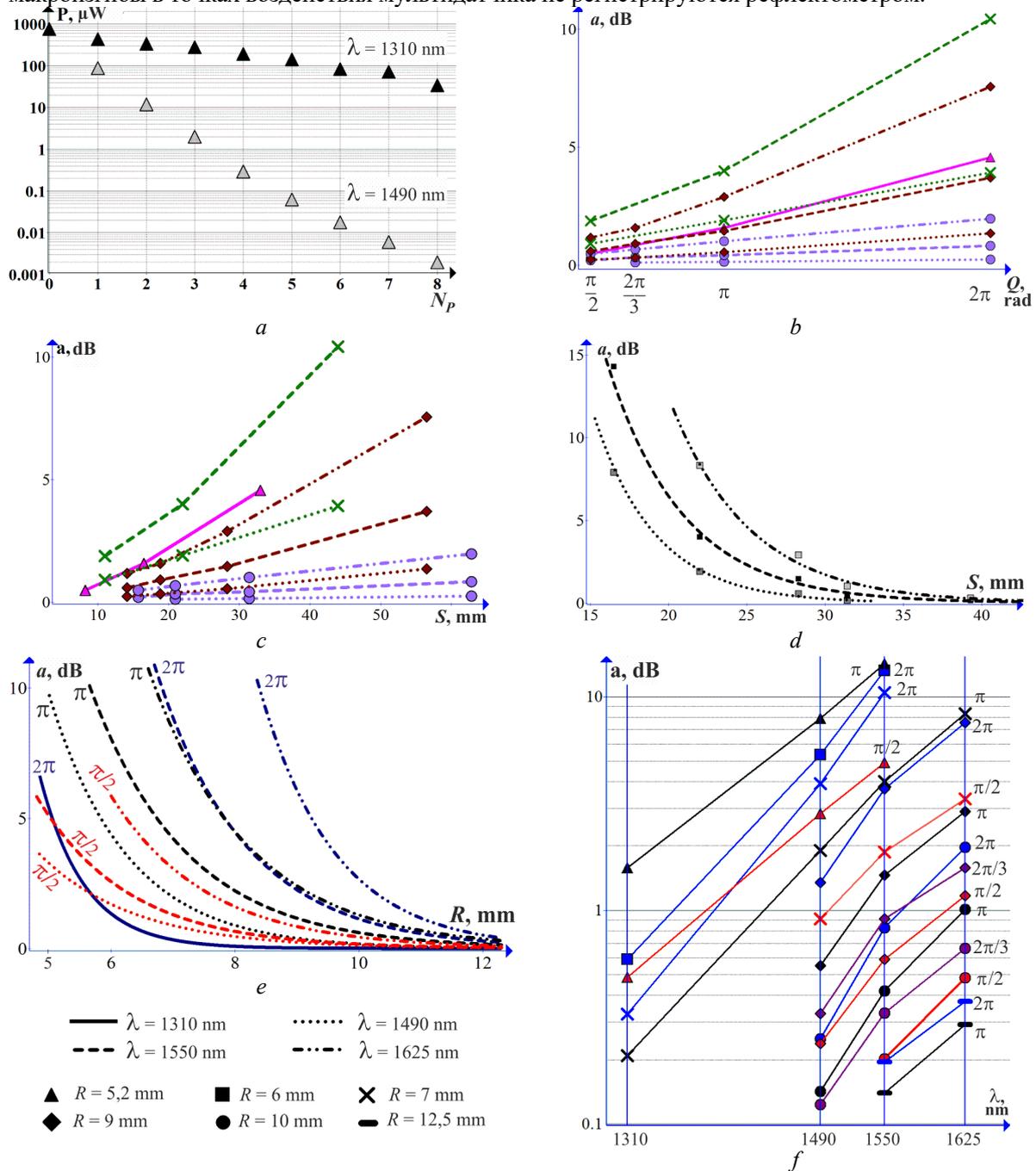


Рис. 3. Экспериментальные результаты: a – зависимость мощности от количества точек воздействия мультитатчика при $R = 5,2$ мм и $Q = \pi$ рад; b – зависимость ослабления от угла дуги макроизгиба; c – зависимость ослабления от длины дуги макроизгиба; d – зависимость ослабления от длины дуги макроизгиба при $Q = \pi$ рад; e – зависимость ослабления от радиуса макроизгиба; f – зависимость ослабления от длины волны
Fig. 3. Experimental results: a – dependence of power on the number of points of influence of the multisensor at $R = 5,2$ mm and $Q = \pi$ rad; b – dependence of the attenuation on the angle of the arc of macrobending; c – dependence of the attenuation on the length of the macrobend arc; d – the dependence of the attenuation on the length of the macrobend arc at $Q = \pi$ rad; e – the dependence of attenuation on the radius of macrobending; f – dependence of the attenuation on the wavelength

Полученные зависимости также позволяют определить оптимальные параметры формируемых макроизгибов мультидатчика для получения максимального диапазона изменения ослабления для каждого значения длины волны. Измерения на длинах волн 1490 и 1550 нм показали, что наибольший диапазон изменения ослабления (до 9,4 дБ) при изменении угла макроизгиба наблюдается при радиусах макроизгиба от 5,2 до 7 мм. Для длины волны 1625 нм наибольшее изменение ослабления при изменении угла макроизгиба наблюдается при $R = 9$ мм, но в меньшем диапазоне (7,4 дБ), на длине волны 1310 нм диапазон изменения ослабления еще меньше (до 4 дБ при $R = 5,2$ мм).

В табл. 1 представлены величины среднего ослабления оптического излучения на макроизгибах оптического волокна в точках воздействия мультидатчика, а также определенное экспериментально и рассчитанное максимальное количество точек воздействия, ограниченное динамическим диапазоном рефлектометра N_{PDmax} . Представленные результаты показывают, что для больших длин волн оптического излучения регистрируется меньшее количество точек воздействия, так как возрастает ослабление, вносимое макроизгибом оптического волокна. При меньших значениях длин волн оптического излучения количество регистрируемых точек воздействия значительно больше, но при больших радиусах макроизгиба и малых длинах макроизгиба, как было установлено экспериментально, макроизгибы оптического волокна в точках воздействия мультидатчика не регистрируются рефлектометром.

Таблица 1. Характеристики мультидатчика в зависимости от параметров макроизгиба
Table 1. Characteristics of a multisensor depending on macrobending parameters

Параметры макроизгиба Macro-bend parameters			Среднее значение ослабления, дБ Average attenuation value, dB				N_{PDmax}				
Угол, рад Angle, rad	Радиус, мм Radius, mm	Длина, мм Length, mm	Длина волны оптического излучения, нм Optical radiation wavelength, nm								
			1310	1490	1550	1625	1310	1490	1550	1625	
2π	5,2	32,97	4,56					4			
2π	6	37,58	0,59	5,35	13,3			34	3	1	
2π	7	43,96	0,33	3,92	10,4			61	4	1	
2π	9	56,52		1,35	3,7	7,56			14	5	2
2π	10	62,83		0,25	0,83	1,97			72	14	5
2π	12,5	78,5			0,2	0,37				62	27
π	5,2	16,5	1,58	7,9	14,3			13	2	1	
π	7	22	0,21	1,91	4	8,32		96	10	3	2
π	9	28,3		0,55	1,46	2,9			33	8	5
π	10	31,42		0,14	0,42	1,01			127	29	10
π	12,5	39,3			0,14	0,29				86	34
2π/3	9	18,84		0,33	0,91	1,58			55	13	6
2π/3	10	20,95		0,12	0,33	0,66			146	36	15
π/2	5,2	8,24	0,49	2,83	4,9			41	7	5	
π/2	7	11		0,91	1,87	3,33			20	7	5
π/2	9	14,15		0,24	0,59	1,17			76	20	10
π/2	10	15,71			0,2	0,48				59	25
π/2	12,5	39,3									

-  Ослабление в точке воздействия превышает динамический диапазон рефлектометра
The attenuation at the impact point exceeds the dynamic range of the reflectometer
-  Макроизгибы в точках воздействия мультидатчика не регистрируются рефлектометром
Macro-bends at the multisensor impact points are not registered by the reflectometer

Таким образом, оптимальным для получения наибольшего количества регистрируемых точек воздействия мультидатчика является выбор радиуса макроизгиба оптического волокна в пределах от 5 до 9 мм при угле макроизгиба от π до 2π рад для $\lambda=1310$ нм. Для $\lambda=1490$ нм оптимальные величины радиуса макроизгиба оптического волокна находятся в пределах от 9 до 10 мм при угле макроизгиба от $\pi/2$ до 2π рад. Оптимальные величины параметров

для длин волн 1550 и 1625 нм – $R = 12,5$ мм при угле макроизгиба от π до 2π рад или $R = 10$ мм при угле макроизгиба $\pi/2$ рад.

Для реализации оптимальной регистрации рефлектометром точек воздействия мультитатчика при увеличении радиуса макроизгиба оптического волокна необходимо использовать большую длину волны оптического излучения, а при увеличении угла макроизгиба оптического волокна – меньшую длину волны оптического излучения.

Выводы

Показана возможность функционирования мультитатчика на основе оптического волокна, исследованы основные характеристики, установлены зависимости параметров от радиуса, длины и угла формируемых макроизгибов в точках воздействия мультитатчика. Предложена методика определения минимального расстояния между точками воздействия мультитатчика и количества точек воздействия мультитатчика. Определены оптимальные параметры макроизгиба оптического волокна в точках воздействия для получения наибольшего количества регистрируемых точек воздействия мультитатчика для четырех длин волн оптического излучения. Полученные результаты могут быть использованы для расчета конструкции мультитатчиков для применения в распределенных волоконно-оптических системах, в частности, для применения в системах безопасности. Для выбора оптимальной величины ослабления оптического излучения на макроизгибах оптического волокна в точках воздействия мультитатчика требуется проведение дальнейших исследований.

Список литературы

1. Василевский Г.В., Жданович С.В., Мансуров Т.М., Лагутик А.А., Лукашик Т.М. Волоконно-оптический мультитатчик. *Ученые записки Азербайджанского технического университета. Телекоммуникация*. 2019;2:265-270.
2. Зеневич А.О., Лукашик Т.М., Новиков Е.В., Жданович С.В., Василевский Г.В., Лагутик А.А., Датчик обнаружения проникновения на основе макроизгиба одномодового оптического волокна. *Вестник связи*. 2020;1(159):56-59.
3. Василевский Г.В., Зеневич А.О., Лагутик А.А., Лукашик Т.М., Новиков Е.В. Исследование характеристик отраженного излучения в оптическом волокне как основы для создания волоконно-оптических датчиков. *Зв'язок*. 2019;1:40-44.

References

1. Vasilevski H.V., Zhdanovich S.V., Mansurov T.M., Lagutik A.A., Lukashik T.M. [The fiber-optical multisensor]. *Azerbaijan Technical University. Scientific works. Telecommunication*. 2019;2:265-270. (In Russ.)
2. Zenevich A.O., Lukashik T.M., Novikov E.V., Zhdanovich S.V., Vasilevsky G.V., Lagutik A.A. [Intrusion detection sensor based on macrobending of a single-mode optical fiber]. *Vesnik svyazi*. 2020;1(159):56-59. (In Russ.)
3. Vasilevsky H.V., Zenevich A.O., Lagutik A.A., Lukashik T.M., Novikov E.V. Investigation of the characteristics of reflected radiation in optical fiber as a basis for creating fiber-optic sensors. *Connectivity = Zv'azok*. 2019;1:40-44. (In Russ.)

Вклад авторов

Зеневич А.О. определил задачи, которые необходимо было решить в ходе проведения исследований, а также принимал участие в интерпретации их результатов.

Жданович С.В. разработал методику проведения исследования параметров мультитатчика, принял участие в интерпретации результатов исследования, подготовил статью к опубликованию.

Василевский Г.В. принял участие в проведении измерений с использованием оптической рефлектометрии и обработке результатов измерений параметров макроизгибов.

Лагутик А.А. выполнила анализ и интерпретацию результатов исследования.

Коваленко Т.Г. проводила исследование параметров мультитатчика.
Лукашик Т.М. принимала участие в проведении измерений и обработке данных.

Authors' contribution

Zenevich A.O. has identified the tasks that needed to be solved during the research, and also participated in the interpretation of the research results.

Zhdanovich S.V. developed a method for conducting research on multisensor parameters, took part in the analysis and interpretation of the research results and prepared the article for publication.

Vasilevski G.V. took part in conducting measurements using optical reflectometry and processing the results of measurements of macro-bend parameters.

Lagutik A.A. has analyzed and interpreted the research results.

Kovalenko T.G. conducted research on multi-sensor parameters.

Lukashik T.M. participated in the measurement and data processing.

Сведения об авторах

Зеневич А.О., д.т.н., профессор, ректор
Белорусской государственной академии связи.

Жданович С.В., к.т.н., доцент, заведующий
отраслевой лабораторией перспективных инфор-
мационно-коммуникационных технологий
Белорусской государственной академии связи.

Василевский Г.В., научный сотрудник
отраслевой лаборатории перспективных
информационно-коммуникационных технологий
Белорусской государственной академии связи.

Лагутик А.А., научный сотрудник отраслевой
лаборатории перспективных информационно-
коммуникационных технологий Белорусской
государственной академии связи.

Коваленко Т.Г., старший преподаватель Белорусской
государственной академии связи.

Лукашик Т.М., преподаватель первой категории
Белорусской государственной академии связи.

Information about the authors

Zenevich A.O., D.Sci., Professor, Rector of the
Belarusian State Academy of Communications.

Zhdanovich S.V., PhD, Associate Professor, Head
of the Industry Laboratory of Perspective
Information and Communication Technologies of
the Belarusian State Academy of Communications.

Vasilevski H.V., Researcher at the Industry
Laboratory of Perspective Information and
Communication Technologies of the Belarusian
State Academy of Communications.

Lagutik A.A., Researcher at the Industry Laboratory
of Perspective Information and Communication
Technologies of the Belarusian State Academy
of Communications.

Kovalenko T.G., Senior Lecturer of the Belarusian
State Academy of Communications.

Lukashik T.M., Lecturer of the First Category
of the Belarusian State Academy of Communications.

Адрес для корреспонденции

220076, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. Франциска Скорины, 8/2,
Белорусская государственная академия связи
тел. +375 29 3512345;
e-mail: zsvzsv@tut.by
Жданович Сергей Вячеславович

Address for correspondence

220076, Republic of Belarus,
Minsk, Francisk Skorina str., 8/2,
Belarusian State Academy of Communications
tel. +375 29 3512345;
e-mail: zsvzsv@tut.by
Zhdanovich Siarhei Viacheslavovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2021-19-1-79-87>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 004.056.5

КОМБИНИРОВАННОЕ ФОРМИРОВАНИЕ КРИПТОГРАФИЧЕСКОГО КЛЮЧА С ПОМОЩЬЮ СИНХРОНИЗИРУЕМЫХ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

М.Л. РАДЮКЕВИЧ¹, В.Ф. ГОЛИКОВ²

¹Государственное предприятие «НИИ ТЗИ»
(г. Минск, Республика Беларусь)

²Белорусский национальный технический университет (г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 2 октября 2020

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2021

Аннотация. В статье предлагается комбинированный метод формирования криптографического ключа. Предлагаемое комбинированное формирование состоит из двух этапов: формирование частично совпадающих бинарных последовательностей с помощью синхронизируемых искусственных нейронных сетей и устранение несовпадающих битов путем открытого сравнения четностей пар битов. В работе рассмотрены возможные уязвимости базового метода формирования криптографического ключа с помощью синхронизируемых искусственных нейронных сетей, оценена их опасность и предложена коррекция метода с целью обеспечения требуемой конфиденциальности формируемого общего секрета. На первом этапе рассмотрена атака «отложенный перебор». Для нейтрализации данной атаки предлагается использовать функцию свертки результатов нескольких независимых синхронизаций. В качестве функции свертки используется побитовое сложение по модулю двух векторов весовых коэффициентов сетей. Благодаря коррекции первого этапа базового алгоритма экспоненциально увеличивается объем отложенного перебора, а также становится неэффективным частотный анализ бинарных последовательностей. На втором этапе рассмотрена атака, основанная на знании четностей пар, с учетом предложенного метода коррекции первого этапа. Проведен анализ влияния параметров сетей на процесс устранения несовпадения битов на втором этапе. Выполнено статистическое моделирование данного анализа. Полученные результаты показали, что криптоаналитик не может однозначно различить значения оставшихся битов. Предложенный комбинированный метод позволяет повысить конфиденциальность формируемого общего секрета и существенно сократить количество обменов информацией по сравнению с технологией Neural key generation.

Ключевые слова: синхронизируемые искусственные нейронные сети, общий секрет, криптографический ключ, комбинированный метод.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Радюкевич М.Л., Голиков В.Ф. Комбинированное формирование криптографического ключа с помощью синхронизируемых искусственных нейронных сетей. Доклады БГУИР. 2021; 19(1): 79-87.

COMBINED FORMATION OF A CRYPTOGRAPHIC KEY USING SYNCHRONIZED ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS

MARYNA L. RADZIUKEVICH¹, VLADIMIR F. GOLIKOV²

¹State Enterprise "NII TZI" (Minsk, Republic of Belarus)

²Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 2 October 2020

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2021

Abstract. A combined method for forming a cryptographic key is proposed in the article. The proposed combined formation consists of two stages: the formation of partially coinciding binary sequences using synchronized artificial neural networks and the elimination of mismatched bits by open comparison of the parities of bit pairs. In this paper, possible vulnerabilities of the basic method of forming a cryptographic key using synchronized artificial neural networks are considered, their danger is assessed, and a correction of the method is proposed to ensure the required confidentiality of the generated shared secret. At the first stage, a deferred brute-force attack is considered. To neutralize this attack, it is proposed to use the convolution function of the results of several independent synchronizations. As a convolution function, the bitwise addition modulo 2 of the vectors of the weights of the networks is used. Due to the correction of the first stage of the basic algorithm, the amount of deferred search exponentially increases, and frequency analysis of binary sequences also becomes ineffective. At the second stage, an attack based on the knowledge of pair parities is considered, taking into account the proposed method for correcting the first stage. The analysis of the influence of network parameters on the process of eliminating the bit mismatch at the second stage is carried out. Statistical modeling of this analysis has been performed. The results obtained showed that the cryptanalyst could not uniquely distinguish the values of the remaining bits. The proposed combined method makes it possible to increase the confidentiality of the generated shared secret and significantly reduce the number of information exchanges in comparison with the Neural key generation technology.

Keywords: synchronized artificial neural networks, shared secret, cryptographic key, combined method.

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

For citation. Radziukevich M.L., Golikov V.F. Combined formation of a cryptographic key using synchronized artificial neural networks. Doklady BGUIR. 2021; 19(1): 79-87.

Введение

В работе [1] предлагался способ формирования общего секрета путем создания частично совпадающих бинарных последовательностей (БП) с последующим устранением несовпадающих битов. В двух БП, формируемых случайным образом независимо друг от друга, относительное количество несовпадающих битов является случайной величиной с математическим ожиданием $M \left[\frac{n_{ns}}{n} \right] = 0,5$, где n_{ns} – количество несовпадающих битов, n –

длина БП в битах. Величина $\delta = \frac{n_{ns}}{n}$ получила название «доля несовпадающих битов».

Под частично совпадающими БП понимаются БП, у которых математическое ожидание доли несовпадающих битов δ не равно 0,5. БП, у которых $M[\delta] = 0,5$ являются статистически независимыми и не могут быть согласованы никаким методом [2], так как при этом раскрываются все биты согласуемых последовательностей. Основной проблемой описанного способа является задача формирования БП со свойствами частично совпадающих БП. Метод, который был реализован при этом, как выяснилось в дальнейшем исследовании, оказался уязвим к атаке, основанной на вычислении некоторой части битов путем выдвижения гипотез

об их значениях и уточнении вероятностей этих гипотез в процессе итерационного согласования [1]. Причем оказалось, что увеличение совпадений приводит к уменьшению конфиденциальности формируемого секрета. Кроме того, серьезным недостатком была необходимость создания большого начального числа битов в исходных последовательностях для получения итоговой последовательности размером в десятки битов.

В связи с изложенным представляет интерес разработка комбинированного способа формирования общего секрета, в котором в качестве первого этапа (этапа формирования частично совпадающих БП) используются синхронизируемые искусственные нейронные сети (СИНС), которые предложены в [3] и анализировались в [4].

Базовый алгоритм

Первый этап – формирование частично совпадающих БП. Пусть абоненты A и B , имеют СИНС со структурой и параметрами, описанными в [5]. Подавая на входы своих сетей случайную последовательность $\vec{x}(t)$ и обмениваясь выходными величинами $Z^{A/B}(t)$, где t – номер такта синхронизации ($t=1,2,3,\dots$), A и B такт за тактом сближают секретные вектора весовых коэффициентов (ВК) своих сетей, т. е. $\vec{W}^A(t) \Leftrightarrow \vec{W}^B(t)$. Процесс останавливается на некотором такте d , при котором вероятность совпадения весовых коэффициентов (ВК) у сетей A и B гарантированно ниже чем 1, т. е. синхронизация является досрочно прерванной. При этом, поскольку изначально вектора ВК сетей формировались случайно с равномерным законом распределения и независимо друг от друга, то математическое ожидание доли несовпадающих битов было равно $M[\delta]=0,5$, а в момент остановки синхронизации станет $0,5 < M[\delta] < 1$. Величину d следует выбирать из компромиссных соображений, имея в виду, что чем больше d , тем меньше n_{ns} , и тем меньше итераций потребуется для окончательного согласования БП на втором этапе.

Второй этап – устранение несовпадающих битов. Этап начинается с преобразования векторов ВК $\vec{W}^A(d)$ и $\vec{W}^B(d)$ в БП $S^A(d)$ и $S^B(d)$ в соответствии с [6], т. е. осуществляется переход от чисел в десятичном формате к числам в двоичном формате. После этого A и B согласовано разбивают свои БП на пары битов либо случайным образом, либо по порядку номеров [1]. Далее A и B вычисляют четности каждой пары битов $C_A^{(i)} = a_j \oplus a_{j+1}$, $C_B^{(i)} = b_j \oplus b_{j+1}$, где i – номер пары, a_j, b_j – j -й бит БП A и B соответственно. Абоненты A и B сообщают четности пар друг другу по открытому каналу связи, и каждый сравнивает четности соответствующих пар $C_A^{(i)}$ с $C_B^{(i)}$. Пары битов, имеющие одинаковую четность, остаются в БП, а пары с несовпадающими четностями удаляются. В оставшихся парах имеет место либо 0 несовпадающих битов, т. е. $a_j = b_j$ и $a_{j+1} = b_{j+1}$, либо 2, т. е. $a_j \neq b_j$ и $a_{j+1} = b_{j+1}$. Так как оглашение четности пары позволяет выразить один неизвестный бит через четность и другой бит $a_j = C_A^{(i)} - b_j$ и $a_{j+1} = C_B^{(i)} - b_{j+1}$, то для сохранения секретности из каждой пары удаляется по договоренности один бит. Отобранные таким образом биты объединяются в промежуточные БП, которые содержат меньшую долю несовпадающих битов.

Повторяя описанную процедуру еще несколько раз, можно получить полностью совпадающие бинарные последовательности. В [1] показано, что если БП имеют математическое ожидание доли несовпадающих битов $M[\delta] \leq 0,2$, то число необходимых итераций не превышает 3. При этом длина итоговой БП, по сравнению с начальной, уменьшается как минимум в 2^l раз, где l – число итераций. Таким образом, вся процедура предлагаемого метода составляет d тактов синхронизации и l тактов фильтрации несовпадений.

Если способ согласования слабо совпадающих БП подробно рассмотрен в [1], то вопросы, связанные с выбором параметров сетей и параметров процесса синхронизации требуют обоснования и расчета.

Очевидно, что принимаемые решения зависят не только от действий A и B в процессе синхронизации, но и от возможных действий криптоаналитика E , прослушивающего канал связи и владеющего всей обменной информацией, за исключением значений ВК сетей. Таким образом, необходимо выявить возможные уязвимости предлагаемого метода, оценить их опасность и провести коррекцию базового метода с целью обеспечения требуемой конфиденциальности формируемого общего секрета.

Возможные уязвимости базового метода и методы их устранения

Предлагаемый метод, по мнению авторов, может быть атакован как на первом, так и на втором этапах. На первом этапе, т. е. при синхронизации сетей A и B , криптоаналитик E создает свою сеть, идентичную сетям A и B , за исключением начальных значений ВК, синхронизирует (в дальнейшем будет рассматриваться только геометрическая атака, как наиболее эффективная) свою сеть с сетью, например, A , в надежде, что его сеть успеет полностью синхронизоваться за отведенное число тактов d . В этом случае окажется, что $\vec{W}^E(d) = \vec{W}^A(d)$.

На втором этапе знание E объявленных четностей пар битов и тот факт, что за счет синхронизации возникает корреляция между $\vec{W}^A(d)$ и $\vec{W}^E(d)$, позволяет ему использовать данную информацию для вычисления некоторых битов в итоговой БП.

Рассмотрим более подробно указанные уязвимости и меры их нейтрализации.

Отложенный перебор. На первом этапе метода наиболее эффективной атакой может оказаться атака «отложенный перебор», предложенная в [7]. Ее суть заключается в запоминании значений $\vec{x}(t)$, имеющих место при синхронизации сетей A и B , и многократном повторении E синхронизаций сети с различными начальными значениями ВК с одними и теми же сетями A и B , на входы которых подается записанный $\vec{x}(t)$, а выходы равны $Z^{A/B}(t)$. Критерием успешного окончания перебора является совпадение $S^E(d)$ с $S^A(d)$, фиксируемое по одному из критериев [4]. Очевидно, что объем перебора зависит от степени корреляции случайных величин t_{AB}, t_{EB} , где t_{AB}, t_{EB} – количество тактов до полного совпадения ВК сетей A с B и E с A соответственно. С ростом d коэффициент корреляции изменяется от 0, при полном несовпадении ВК, до 1 – при полном совпадении ВК. Это свойство существенно зависит от конфигурации и параметров используемых СИНС.

В [6] показано, что для реализации процесса синхронизации, наиболее неблагоприятного для E , следует выбрать сети A и B с параметрами $k=3, n=1000, L=8$. При таком выборе параметров удается получить БП длиной $b=12000$ и достаточно серьезное отставание синхронизации сетей E и A от синхронизации A и B , так как имеет место $P(t_{AB} \leq d) \gg P(t_{AE} \leq d)$. Например, при $d=3500$ получается $P(t_{AB} \leq d) \approx 0,95$, а $P(t_{AE} \leq d) \approx 0,04$ [5]. Однако, несмотря на кажущееся различие в этих вероятностях, объем отложенного перебора относительно небольшой. Согласно [7], чтобы с вероятностью $\gamma=0,98$ достичь успеха, необходим объем перебора $m \approx 10^2$. Кроме того, более глубокий анализ показал, что сформированные при этом компоненты векторов $\vec{W}^A(d)$ и $\vec{W}^B(d)$ не имеют равномерного распределения: значения ВК, равные L и $-L$, а также близким к ним значениям, встречаются гораздо чаще, чем остальные. Это делает возможным частотный анализ $\vec{W}^A(d)$ и $\vec{W}^B(d)$.

Для успешного противостояния атаке отложенного перебора целесообразно использовать способ, предложенный в [6]. Его суть заключается в том, что при формировании совпадающих БП с помощью СИНС вместо одной синхронизации сетей A и B , производится r независимых синхронизаций с различными начальными значениями ВК, а результирующие вектора $S_r^A(d)$ и $S_r^B(d)$ вычисляются как некоторая свертка результатов каждой синхронизации:

$$\begin{aligned} S_r^A(d) &= S_1^A(d) \oplus S_2^A(d) \oplus \dots \oplus S_r^A(d), \\ S_r^B(d) &= S_1^B(d) \oplus S_2^B(d) \oplus \dots \oplus S_r^B(d). \end{aligned}$$

В результате получаем бинарные последовательности длиной b , в которых каждый бит – сумма битов по модулю 2 из r слагаемых.

E , осуществляя отложенный перебор, не имеет возможности сопоставлять результаты своих частных синхронизаций с результатами частных синхронизаций сетей A и B . А поскольку при переходе к сверткам взаимная корреляция $S_r^A(d)$ с $S_r^B(d)$ с ростом r ослабляется значительно медленнее, чем корреляция $S_r^E(d)$ с $S_r^A(d)$, то объем отложенного перебора существенно возрастает.

В табл. 1 приведены значения $M[\delta_{A,B}]$, $M[\delta_{E,A}]$ соответственно в числителе и знаменателе: между $S_r^A(d)$ и $S_r^B(d)$, между $S_r^E(d)$ и $S_r^A(d)$.

Таблица 1. Значения $M[\delta_{A,B}]$, $M[\delta_{E,A}]$

Table 1. The values $M[\delta_{A,B}]$, $M[\delta_{E,A}]$

r	d				
	500	1000	2000	2500	3500
1	0,61 / 0,59	0,74 / 0,65	0,97 / 0,65	0,99 / 0,65	0,99 / 0,65
5	0,50 / 0,50	0,53 / 0,50	0,89 / 0,51	0,98 / 0,51	0,99 / 0,51
10	0,50 / 0,50	0,51 / 0,50	0,81 / 0,50	0,96 / 0,50	0,99 / 0,51

В данной таблице $\delta_{A,B} = \frac{n_{A,B}}{b}$, $\delta_{E,A} = \frac{n_{E,A}}{b}$, где $n_{A,B}, n_{E,A}$ – количество совпадающих бит в $S_r^A(d)$ и $S_r^B(d)$, $S_r^E(d)$ и $S_r^A(d)$ соответственно. Из таблицы видно, что при $r \geq 5$ величина $M[\delta_{A,B}]$ близка к 1,0 уже начиная от $d=2500$, в то время как величина $M[\delta_{E,A}]$ остается близкой к 0,5 (0,5 свидетельствует о статистической независимости $S_r^E(d)$ и $S_r^A(d)$). В [6] показано, что увеличивая r , можно экспоненциально увеличить объем отложенного перебора (табл. 2).

Таблица 2. Объем отложенного перебора

Table 2. Deferred search volume

P_{EA}	r			
	5	10	20	50
0,001	$3 \cdot 10^{15}$	$3 \cdot 10^{30}$	$3 \cdot 10^{60}$	$3 \cdot 10^{150}$
0,005	$9,3 \cdot 10^{12}$	$2,9 \cdot 10^{23}$	$2,8 \cdot 10^{46}$	$2,6 \cdot 10^{115}$
0,010	$3 \cdot 10^{10}$	$3 \cdot 10^{20}$	$3 \cdot 10^{40}$	$3 \cdot 10^{100}$
0,050	$2,8 \cdot 10^7$	$9,7 \cdot 10^{14}$	$2,8 \cdot 10^{26}$	$2,6 \cdot 10^{65}$

Кроме того, в [6] показано, что с ростом r закон распределения вероятностей $S_r^A(d)$ и $S_r^B(d)$ близок к равномерному, что делает неэффективным частотный анализ этих БП.

Положительным свойством комбинированного метода является и то, что на этапе синхронизации для A и B нет необходимости добиваться совпадения $S_r^A(d)$ с $S_r^B(d)$ и подтверждения этого, следовательно, и E не имеет критерия для остановки перебора.

Атака, основанная на знании четностей пар. На втором этапе метода, когда абоненты A и B оглашают четности пар БП, сформированных с помощью СИНС, у криптоаналитика E появляется возможность сравнить эти четности с четностями своей БП и сделать определенные выводы относительно формируемого общего секрета. Оценим эффективность атаки, описанной в [1]. Для этого проведем анализ влияния параметров сетей на процесс устранения несовпадений битов на втором этапе.

Поскольку процедура устранения несовпадений битов оперирует с парами битов, то целесообразно проводить анализ на уровне пар, а не отдельных битов. Анализ может быть выполнен аналитически с использованием результатов, полученных в [1], или методом статистического моделирования.

Обозначим длину БП, сформированных путем синхронизации сетей A и B через b . Тогда число пар равно $D = \frac{b}{2}$, если b окажется нечетным, то его следует привести к четному, отбросив последний бит. Тогда, согласно [1], среднее число совпадающих пар битов в анализируемых БП равно $m_{c,c} = \frac{b_{A,B}^2}{b^2} \cdot D = \frac{b_{A,B}^2}{2b}$, где $b_{A,B}$ – количество совпадающих битов в БП A и B .

Среднее число пар битов, содержащих один совпадающий бит, равно $m_{c,c} = 2D \frac{b_{A,B}}{b} \frac{(b - b_{A,B})}{b} = \frac{b_{A,B}(b - b_{A,B})}{b}$.

Среднее число пар битов, содержащих два несовпадающих бита, равно $m_{н,н} = D \frac{(b - b_{A,B})^2}{b^2} = \frac{(b - b_{A,B})^2}{2b}$.

Пары, содержащие один совпадающий бит, в дальнейшем согласовании не участвуют, так как подлежат удалению. Поэтому представляет интерес только величины $m_{c,c}$ и $m_{н,н}$. В табл. 3 приведены значения этих величин в зависимости от количества совпадающих битов для $b=12000$.

Таблица 3. Значения величины $m_{c,c}$ и $m_{н,н}$ в зависимости от количества совпадающих битов

Table 3. The value of $m_{c,c}$ and $m_{н,н}$ in depending on the number of matching bits

$b_{A,B} / b$	0,500	0,583	0,666	0,750	0,833	0,9166	1,000
$m_{c,c}$	1500	2041	2666	3375	4166	5401	6000
$m_{н,н}$	1500	1041	666	375	166	41	0
$m_{c,c} + m_{н,н}$	3000	3082	3332	3750	5832	5442	6000

Обозначим БП абонентов A и B , получившиеся после прерванной синхронизации, через $S_r^A(d)$ и $S_r^B(d)$, а итоговую БП $S_r^{AB}(d)$.

После остановки синхронизации и оглашения четностей пар битов E знает, что A и B оставят для дальнейшего рассмотрения только пары, у которых четности совпадают $C_A^{(i)} = C_B^{(i)}$. Поэтому E будет рассматривать только те свои пары битов, для которых выполняется $C_E^{(i)} = C_A^{(i)} = C_B^{(i)}$. Для битов каждой из этих пар можно выдвинуть следующие гипотезы:

$$H_0 : e_j = a_j = b_j, e_{j+1} = a_{j+1} = b_{j+1};$$

$$H_1 : e_j = \bar{a}_j = \bar{b}_j, e_{j+1} = \bar{a}_{j+1} = \bar{b}_{j+1};$$

$$H_2 : e_j = a_j = \bar{b}_j, e_{j+1} = a_{j+1} = \bar{b}_{j+1};$$

$$H_3 : e_j = \bar{a}_j = b_j, e_{j+1} = \bar{a}_{j+1} = b_{j+1}.$$

Например,

$$H_0 : C_E^{(i)} = 1 \oplus 1; C_A^{(i)} = 1 \oplus 1; C_B^{(i)} = 1 \oplus 1;$$

$$H_1 : C_E^{(i)} = 1 \oplus 1; C_A^{(i)} = 0 \oplus 0; C_B^{(i)} = 0 \oplus 0;$$

$$H_2 : C_E^{(i)} = 1 \oplus 1; C_A^{(i)} = 1 \oplus 1; C_B^{(i)} = 0 \oplus 0;$$

$$H_3 : C_E^{(i)} = 1 \oplus 1; C_A^{(i)} = 0 \oplus 0; C_B^{(i)} = 1 \oplus 1.$$

Зная параметры сетей и d , можно априорно оценить вероятности этих гипотез путем моделирования, многократно повторяя первый этап метода и подсчитывая количество исходов, в которых имело место событие, соответствующее той или иной гипотезе $P(k) \approx \frac{n(k)}{n_c}$, где

$k = 0, 1, 2, 3$; $n(k)$ – число пар, соответствующее гипотезе H_k , n_c – общее число пар, у которых

$C_E^{(i)} = C_A^{(i)} = C_B^{(i)}$. Для наглядности описываемого процесса на рис. 1 представлены диаграммы, поясняющие распределения пар битов с различными свойствами.

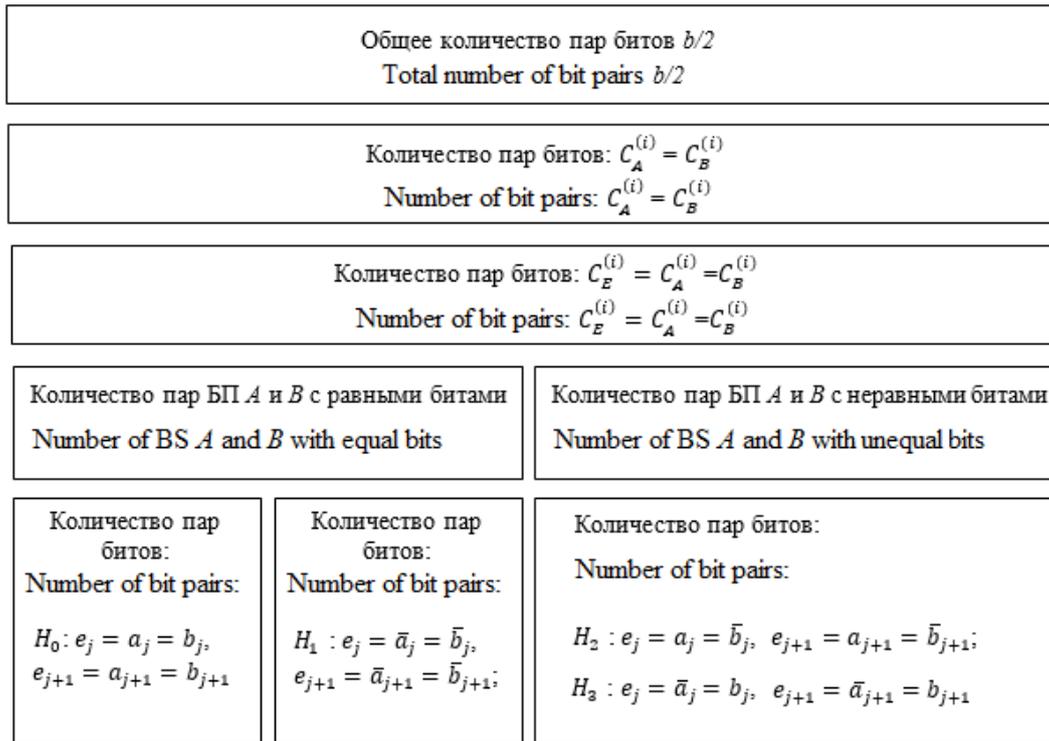


Рис. 1. Диаграммы распределения пар битов с различными свойствами

Fig. 1. Distribution diagrams of couples of bits with the different properties

В табл. 4 приведены результаты моделирования для $K = 3, n = 1000, L = 8, r = 5$.

Таблица 4. Результаты моделирования
Table 4. Simulation results

$P(k)$	d					
	500	1000	2000	2500	3000	10000
$P(0)$	0,257	0,302	0,483	0,501	0,505	0,506
$P(1)$	0,267	0,363	0,457	0,490	0,495	0,493
$P(2)$	0,245	0,214	0,029	0,003	0,001	0,000
$P(3)$	0,245	0,215	0,029	0,003	0,001	0,000

Из всех пар битов, для которых $C_A^{(i)} = C_B^{(i)}$, в итоговую БП $S_r^{AB}(d)$ пройдут только пары, соответствующие гипотезам H_0, H_1 . Поэтому E предполагает, что те биты его БП, для которых выполнялось $C_E^{(i)} = C_A^{(i)} = C_B^{(i)}$ и которые у A и B прошли в итоговую БП, с вероятностью $P(0)$ равны битам последовательностей A и B , а с вероятностью $P(1)$ – противоположны им. Однако из табл. 2 видно, что значения вероятностей $P(0)$ и $P(1)$ в диапазоне предлагаемых значений d близки к 0,5, и, следовательно, E не может различить свои отслеживаемые биты. Данное свойство объясняется тем, что корреляция БП $S_r^A(d), S_r^B(d)$ и $S_r^E(d)$ очень слабая и с ростом d $S_r^E(d)$ остается практически статистически независимой от $S_r^A(d), S_r^B(d)$, и, следовательно, в ней число пар, соответствующих гипотезам H_0, H_1 , остается одинаковым.

Заклучение

По результатам анализа и нейтрализации уязвимостей базового алгоритма формирования криптографического ключа с помощью СИНС удалось создать комбинированный метод. На первом этапе при формировании бинарной последовательности с математическим ожиданием доли несовпадающих битов менее 0,5 добавляется функция свертки, что позволяет обеспечить требуемую конфиденциальность формируемого общего секрета, а также делает данный способ устойчивым к атаке, основанной на знании четностей пар, на втором этапе. Изложенная двухэтапная процедура является, по мнению авторов, достаточно эффективным методом формирования общего секрета. В его основе лежит комбинация полученных ранее результатов. Это позволило существенно сократить количество обменов информацией и повысить криптостойкость по отношению к атаке «отложенный перебор».

Список литературы

1. Пивоваров В.Л., Голиков В.Ф. Способ формирования криптографического ключа для слабо совпадающих бинарных последовательностей. *Информатика*. 2016;3(51):31-37.
2. Shannon C.E. Communication theory of secrecy systems. *Bell system technical journal*. 1949;28(4):656-715.
3. Kanter I., Kinzel W. The Theory of Neural Networks and Cryptography, Quantum Computers and Computing. 2005;5(1):130-140.
4. Ruttor A., Kanter I., Kinzel W. Dynamics of neural cryptography. *Phys. Rev. E*. 2007;75(5):056104.
5. Голиков В.Ф., Радюкевич М.Л. Формирование общего секрета с помощью искусственных нейронных сетей. *Системный анализ и прикладная информатика*. 2019;(2):49-56.
6. Радюкевич М.Л., Голиков В.Ф. Усиление секретности криптографического ключа, сформированного с помощью синхронизируемых искусственных нейронных сетей. *Информатика*. 2020;17(1):102-108.
7. Голиков В.Ф., Ксенович А.Ю. Атака на синхронизируемые искусственные нейронные сети, формирующие общий секрет, методом отложенного перебора. *Доклады БГУИР*. 2017;(8):48-53.

References

1. Pivovarov V.L., Holikau U.F. [Method of generating common cryptographic keys for loosely coincident binary sequences]. *Informatics*. 2016; 3(51):31-37. (In Russ.)
2. Shannon C.E. Communication theory of secrecy systems. *Bell system technical journal*. 1949;28(4):656-715.
3. Kanter I., Kinzel W. The Theory of Neural Networks and Cryptography, Quantum Computers and Computing. 2005;5(1):130-140.
4. Ruttor A., Kanter I., Kinzel W. Dynamics of neural cryptography. *Phys. Rev. E*. 2007;75(5):056104.
5. Golikov V.F., Radziukevich M.L. [The formation of a common secret using artificial neural networks]. *Sistemnyy analiz i prikladnaya informatika*. 2019;(2):49-56. (in Russ.).
6. Radziukevich M.L., Golikov V.F. [Enhancing the secrecy of a cryptographic key generated using synchronized artificial neural networks]. *Informatics*. 2020;17(1):102-108. (In Russ.)
7. Golikov V.F., Ksenovich A.Y. [Attack on synchronized artificial neural networks, forming a common secret by deferred search]. *Doklady BGUIR = Doklady BGUIR*. 2017;(8):48-53. (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

Радюкевич М.Л., м.т.н., начальник испытательной лаборатории по требованиям безопасности информации Государственного предприятия «НИИ ТЗИ».

Голиков В.Ф., д.т.н., профессор кафедры информационных технологий в управлении Белорусского национального технического университета.

Адрес для корреспонденции

220088, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. Первомайская, 26, корп. 2,
Государственное предприятие «НИИ ТЗИ»
тел. +375-17-294-01-71;
e-mail: 1218a@list.ru
Радюкевич Марина Львовна

Information about the authors

Radziukevich M.L., M. Sci., Head of the Testing Laboratory for Information Security Requirements of State Enterprise "NII TZI".

Golikov V.F., D.Sci, Professor of the Information Technologies in Management Department of the Belarusian National Technical University.

Address for correspondence

220088, Republic of Belarus,
Minsk, Pervomayskaya str. 26, bldg. 2,
State Enterprise "NII TZI"
tel. +375-17-294-01-71;
e-mail: 1218a@list.ru
Radziukevich Maryna Lvovna



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2021-19-1-88-95>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.382.33–027.45

ИНДИВИДУАЛЬНОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ ТРАНЗИСТОРОВ БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ ДЛЯ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ МЕДИЦИНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

С.М. БОРОВИКОВ, В.О. КАЗЮЧИЦ

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

Поступила в редакцию 26 октября 2020

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2021

Аннотация. При сборке электронных комплексов медицинского назначения важным является постановка в электронные устройства высоконадежных полупроводниковых приборов. В работе с использованием экспериментальных исследований на примере биполярных транзисторов большой мощности показано, как можно выполнять отбор экземпляров повышенного уровня надежности для их последующего монтажа в ответственные электронные устройства. Для отбора высоконадежных экземпляров использовано индивидуальное прогнозирование по информативным параметрам, измеряемым у конкретного экземпляра в начальный момент времени. Экспериментальные исследования (обучающий эксперимент) включали измерение в начальный момент времени у каждого экземпляра выборки транзисторов электрических параметров, которые могут содержать информацию о надежности, а затем проведение ускоренных испытаний транзисторов на безотказность в течение времени, соответствующего нормальным условиям для наработки, указанной в технической документации. Обучающий эксперимент выполняют один раз и используют для получения прогнозирующего правила, которое применяют для других однотипных экземпляров, которые не участвовали в обучающем эксперименте. Для получения прогнозирующего правила использован метод мажоритарной логики. Прогнозирование выполняется в виде отнесения конкретного экземпляра к классу высоконадежных экземпляров для заданной будущей наработки. Для выполнения прогнозирования у интересующего конкретного экземпляра в начальный момент времени измеряют значения информативных параметров, преобразовывают их в двоичные числа (ноль или единицу) с использованием пороговых значений, найденных по результатам обучающего эксперимента, а решение о соответствии экземпляра классу высоконадежных транзисторов принимают по набору двоичных чисел. Для отнесения экземпляра к классу высоконадежных экземпляров достаточно, чтобы число единиц превышало число нулей в полученном наборе двоичных чисел.

Ключевые слова: полупроводниковые приборы, надежность, индивидуальное прогнозирование, информативные параметры, метод мажоритарной логики.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарности. Авторы выражают благодарность администрации и работникам испытательного центра филиала «Завод Транзистор» ОАО «ИНТЕГРАЛ», при содействии которых были организованы измерения электрических параметров биполярных транзисторов на сертифицированных установках.

Для цитирования. Боровиков С.М., Казючиц В.О. Индивидуальное прогнозирование надежности транзисторов большой мощности для электронных устройств медицинского назначения. Доклады БГУИР. 2021; 19(1): 88-95.

INDIVIDUAL PREDICTION OF THE RELIABILITY OF HIGH POWER TRANSISTORS FOR ELECTRONIC DEVICES OF MEDICAL PURPOSES

SERGEI M. BOROVIKOV, VLADISLAV O. KAZIUCHYTS

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

Submitted 26 October 2020

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2021

Abstract. When assembling electronic complexes for medical purposes, it is important to install highly reliable semiconductor devices in electronic equipment. Experimental studies and the example of high-power bipolar transistors in this work show how you can select copies of an increased level of reliability for their subsequent installation in critical electronic devices. To select highly reliable samples, individual forecasting was used according to informative parameters measured for a particular sample at the initial moment in time. Experimental studies (training experiment) included measuring at the initial moment of time for each sample of transistors of electrical parameters, which may contain information on reliability, and then conducting accelerated tests of transistors for reliability for a time corresponding to normal operating conditions specified in the technical documentation. The training experiment is performed once and used to obtain a predictive rule, which is applied to other similar samples that did not participate in the training experiment. To obtain a predictive rule, the method of majority logic was used. Prediction is performed in the form of assigning a specific sample to the class of highly reliable samples for a given future operating time. To perform prediction, the values of the informative parameters are measured at the initial moment of time for a particular sample of interest, they are converted into binary numbers (zero or one) using the threshold values found from the results of the training experiment, and the decision on the correspondence of the sample to the class of highly reliable transistors is made by a set of binary numbers. To classify a sample as a highly reliable one, it is sufficient that the number of ones exceeds the number of zeros in the resulting set of binary numbers.

Keywords: semiconductor devices, reliability, individual forecasting, informative parameters, majority logic method.

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

Gratitude. The authors are grateful to the administration and employees of the Testing Center of the Branch “Transistor Plant” of JSC “INTEGRAL” with whose assistance measurements of the electrical parameters of bipolar transistors were organized on certified equipment.

For citation. Borovikov S.M., Kaziuchyts V.O. Individual prediction of the reliability of high power transistors for electronic devices of medical purposes. Doklady BGUIR. 2021; 19(1): 88-95.

Введение

Работоспособность устройств и комплексов медицинского назначения во многом определяется надежностью используемых полупроводниковых приборов [1]. Одним из способов получения экземпляров (приборов) повышенного уровня надежности является их отбор из изготовленных партий путем индивидуального прогнозирования безотказности по информативным параметрам [2–4]. При таком способе отбора в начальный момент времени у конкретного экземпляра измеряют значения информативных параметров, обрабатывают результаты измерения по определенному правилу, называемому прогнозирующим правилом, и принимают решение о соответствии или несоответствии данного экземпляра требованию повышенного уровня надежности. Отметим, что изготовленные полупроводниковые приборы прошли выходной контроль на заводе-изготовителе и в начальный момент времени отвечают требованиям технической документации, однако экземпляры отличаются друг от друга по уровню надежности (времени до отказа). Под информативным понимают такой электрический параметр полупроводникового прибора, значение которого в начальный момент времени несет

информацию о надежности (безотказности) экземпляра для заданной наработки. Прогнозирующее правило получают с помощью предварительных исследований выборки полупроводниковых приборов (примерно 50...100 экземпляров). Эти исследования являются обучающим экспериментом [2, 3]. Суть такого эксперимента состоит в измерении в начальный момент времени у каждого экземпляра обучающей выборки значений информативных параметров и проведении ускоренных (обычно форсированных) испытаний в течение времени, которое эквивалентно наработке полупроводниковых приборов, указанной в документации или заданной заказчиком электронной аппаратуры. После окончания ускоренных испытаний выясняют техническое состояние экземпляров обучающей выборки: работоспособное или неработоспособное. Если экземпляр не отказал по типу внезапный или постепенный отказ, то он на момент окончания испытаний является работоспособным и считается отвечающим требованию по надежности, в противном случае – неработоспособным и являющимся в начальный момент времени потенциально ненадежным. Обучающий эксперимент позволяет получить в неявном виде связь между значениями информативных параметров в начальный момент времени и номером класса экземпляров выборки с точки зрения надежности: K_1 – класс экземпляров повышенного уровня надежности, K_0 – класс потенциально ненадежных экземпляров. Прогнозирующее правило получают один раз по результатам обучающего эксперимента. Оно должно показывать, как по значениям информативных параметров конкретного экземпляра в начальный момент времени принимать решение о классе экземпляра с точки зрения его надежности в будущем. При индивидуальном прогнозировании это правило применяют к однотипным экземплярам, не принимавшим участия в обучающем эксперименте.

Многие электронные устройства и комплексы медицинского назначения содержат в своем составе биполярные транзисторы большой мощности (источники питания, генераторы излучений, схемы управления), которые во многом определяют надежность электронных изделий. Поэтому выполнение процедуры прогнозирования надежности для биполярных транзисторов является актуальной задачей.

Методика проведения эксперимента

Экспериментальные исследования предусматривали обучающий эксперимент, методика проведения которого включала следующие этапы:

- выбор для исследований типа биполярных транзисторов большой мощности;
- планирование и проведение обучающего эксперимента;
- построение прогнозирующего правила и оценка его эффективности.

В качестве исследуемых биполярных транзисторов, на примере которых решалась задача индивидуального прогнозирования надежности, были выбраны биполярные транзисторы большой мощности типа КТ872А. Их выбор был обусловлен интересами заказчика электронных устройств.

Планирование обучающего эксперимента предусматривало уточнение объема обучающей выборки, определение режима и времени проведения ускоренных испытаний биполярных транзисторов на безотказность, определение для выбранных транзисторов перечня электрических параметров, исследуемых на информативность.

Проведение обучающего эксперимента предусматривало:

- создание экспериментальной установки для ускоренных испытаний;
- измерение в начальный момент времени у каждого экземпляра обучающей выборки значений электрических параметров, которые гипотетически могли оказаться информативными;
- проведение самих ускоренных испытаний;
- контроль технического состояния экземпляров обучающей выборки на момент окончания испытаний.

Для ускорения испытаний на надежность транзисторов использовались известные подходы [5–7]. Ускорение испытаний достигалось применением тепловой нагрузки и обратного электрического напряжения, прикладываемого к коллекторному переходу (табл. 1).

Таблица 1. Данные о транзисторах и условиях проведения ускоренных испытаний
Table 1. Data on transistors and conditions for conducting accelerated tests

Характеристика, параметр, величина Characteristic, parameter, magnitude	Значение Value
Характеристики и величины, выбранные из технических источников или принятые для расчета Characteristics and values selected from technical sources or taken for calculation	
Наработка, указываемая в технической документации, ч	15 000
Максимальная мощность рассеивания коллектором при $T \leq 25$ °С, P_{\max} , Вт	100
Предельно допустимое напряжение коллектор-эмиттер U_{\max} , В	700
Тепловое сопротивление кристалл-корпус $R_{кр-корп}$, °С/Вт	1,25
Усредненное значение использованной в расчетах энергии активации E_a , эВ	0,7
Температура ускоренных испытаний T_y , °С	135
Обратное напряжение U_y , прикладываемое к коллекторному переходу при испытании, В	600
Режим, принятый за обычные (нормальные) условия работы Mode taken as usual (normal) working conditions	
Коэффициент нагрузки по мощности $K_n^{(P)}$	0,5
Коэффициент нагрузки по напряжению $K_n^{(U)}$	0,7
Температура окружающей среды (корпуса транзистора) T_{cp} , °С	+55
Расчетные величины Calculated values	
Время ускоренных испытаний (при значении E_a), ч	238
Значение P_{\max} при $T = +55$ °С, Вт	78
Перегрев ΔT (в °С), имитирующий мощность P_{\max} при $T_{cp} = +55$ °С	47,5
Коэффициент ускорения испытаний за счет повышенной температуры, $K_y^{(T)}$	5,6
Коэффициент ускорения испытаний за счет обратного напряжения, $K_y^{(U)}$	11,25
Общий коэффициент ускорения, K_y	63

В качестве основы экспериментальной установки использована печь, обеспечивающая нагрев до температуры +200 °С с погрешностью поддержания выбранной температуры не более ± 2 °С. Плата с испытываемыми транзисторами помещалась в печь. В состав экспериментальной установки входили также технические средства, выполняющие вспомогательные функции (источник питания, вольтметр, предохранители на каждый экземпляр испытываемой выборки, помехоподавляющие конденсаторы).

Измерение большинства электрических параметров исследуемых биполярных транзисторов выполнялось на сертифицированных измерительных установках «ИНЕЙ» и «ГАММА» испытательного центра ОАО «ИНТЕГРАЛ». Некоторые специфические параметры измерялись с использованием стандартных измерительных приборов в лабораториях университета. Объем обучающей выборки – 96 экземпляров.

Результаты и их обсуждение

После завершения ускоренных испытаний уточнялось техническое состояние транзисторов обучающей выборки. В случае отсутствия внезапного отказа или нахождения функционального электрического параметра в пределах норм, указанных в технической документации, экземпляр считался отвечающим требованию повышенной надежности для наработки 15 000 ч (обозначен как класс K_1), в противном случае – потенциально ненадежным (обозначен как класс K_0). В качестве электрического параметра, по значению которого принималось решение о наличии постепенного отказа транзистора, рассматривалось напряжение насыщения коллектор-эмиттер $U_{КЭнас}$ при токе коллектора $I_K = 4,5$ А и токе базы $I_B = 2$ А.

В качестве результатов обучающего эксперимента использовались данные, полученные при ускоренных испытаниях. Их запись отвечает виду табл. 2.

Таблица 2. Вид результатов обучающего эксперимента
Table 2. Form of the results of the training experiment

Номер экземпляра Sample number	Значение электрического параметра, исследуемого на информативность (начальный момент времени) The value of the electrical parameter studied for informational content (initial moment of time)				Класс экземпляра для наработки 15 000 ч (момент окончания ускоренных испытаний) Sample class for operating time 15 000 h (moment of completion of accelerated tests)
	Параметр 1 Parameter 1	Параметр 2 Parameter 2	...	Параметр 22 Parameter 22	
1	$x_1^{(1)}$	$x_2^{(1)}$		$x_{22}^{(1)}$	K_s ($s = 1$ или 0)
...					...
96	$x_1^{(96)}$	$x_2^{(96)}$		$x_{22}^{(1)}$	K_s ($s = 1$ или 0)

Данные вида табл. 2 использованы для определения информативных параметров [8, 9], а далее – для получения прогнозирующего правила. Электрические параметры, исследуемые на информативность и используемые в качестве информативных, в табл. 2 и при построении прогнозирующего правила обозначены символом x с соответствующим индексом.

Используя результаты обучающего эксперимента (см. табл. 2), были определены наиболее информативные параметры из числа исследуемых. Решение о степени информативности принималось по значению модуля коэффициента парной корреляции между электрическим параметром в начальный момент времени и номером класса (1 или 0) на момент окончания ускоренных испытаний, а также по значению информационной меры Кульбака $D(x_i)$, определяемой по выражению [8]

$$D(x_i) = \frac{[M(x_i | K_1) - M(x_i | K_0)]^2}{\sigma^2(x_i | K_1) + \sigma^2(x_i | K_0)}, \quad (1)$$

где $M(x_i | K_1)$, $M(x_i | K_0)$ – математические ожидания (средние значения) параметра x_i , для экземпляров соответственно класса K_1 и класса K_0 ; $\sigma(x_i | K_1)$, $\sigma(x_i | K_0)$ – стандартные отклонения x_i для экземпляров соответственно класса K_1 и класса K_0 .

В табл. 3 для наиболее информативных параметров, из числа исследуемых на информативность, приводятся коэффициенты линейной корреляции с номером класса, а также значения информационной меры Кульбака.

Таблица 3. Информативные параметры
Table 3. Informative parameters

Параметр, Parameter	Режим измерения Measurement Mode	Используемое обозначение Used notation	Коэффициент корреляции Correlation coefficient	Информационная мера Кульбака $D(x_i)$ Kullback Information Measure $D(x_i)$	Пороговый уровень x_{i0} Threshold level of x_{i0}	Условие получения $z_i = 1$ Condition for obtaining of $z_i = 1$
$h_{21Э}$	$I_K = 7$ А	x_1	0,452	0,498	3,38	$\geq x_{10}$
$I_{КЭ0}$	$U_{КЭ} = 500$ В	x_2	0,453	0,487	0,22 мкА	$\leq x_{20}$
$U_{КЭнас}$	$I_K = 7$ А, $I_B = 3,5$ А	x_3	0,443	0,435	598 мВ	$\leq x_{30}$

Пояснение параметров, включенных в табл. 3: $h_{21Э}$ – статический коэффициент усиления по току в схеме с общим эмиттером; $I_{КЭ0}$ – обратный ток коллекторного перехода; $U_{КЭнас}$ – напряжение насыщения коллектор-эмиттер. Если измеренное значение параметра x_i не отвечает условию последнего столбца табл. 3, то принимается $z_i = 0$.

Получение прогнозирующего правила

Для получения прогнозирующего правила использован метод пороговой логики [10], согласно которому значения информативных параметров x_1 , x_2 и x_3 преобразовываются в двоичные числа z_1 , z_2 и z_3 (единицу или нуль), пользуясь заранее найденными по результатам обучающего эксперимента пороговыми уровням x_{i0} (см. табл. 3). Пороговый уровень x_{i0}

и соотношение для преобразования выбираются таким образом, чтобы экземплярам повышенного уровня надежности (класс K_1) в основном соответствовали значения $z_i = 1$, а потенциально ненадежным экземплярам (класс K_0) – значения $z_i = 0$.

Для получения прогнозирующего правила необходимо для каждого j -го экземпляра обучающей выборки ($j = 1, 2, \dots, 96$) получить набор двоичных чисел $z_1^{(j)}, z_2^{(j)}$ и $z_3^{(j)}$ и поставить этому набору в соответствие значение решающей функции $F^{(j)}$, причем функция F выбирается так, чтобы для обучающей выборки ее большие значения в основном отвечали экземплярам класса K_1 , меньшие значения – экземплярам класса K_0 [2].

Авторами для получения значений решающей функции F предлагается новый способ, основанный на использовании понятий «частная информация о событии», содержащаяся в сообщении о другом событии [2]. Применительно к прогнозированию по информативным параметрам в качестве таких понятий могут рассматриваться частная информация о принадлежности экземпляра к классу K_1 (обозначена как $I(K_1 | z_i = \xi)$) и частная информация о принадлежности этого же экземпляра к классу K_0 (обозначена как $I(K_0 | z_i = \xi)$), содержащаяся в сообщении о том, что i -й двоичный сигнал z_i принял конкретное значение $z_i = \xi$ ($\xi = 1$ или $\xi = 0$).

Предлагаемый алгоритм получения $F^{(j)}$ учитывает информацию, которую содержит полученный набор двоичных чисел как о классе K_1 , так и о классе K_0 :

$$F^{(j)} = \sum_{i=1}^k I(K_1 | z_i^{(j)} = \xi) - \sum_{i=1}^k I(K_0 | z_i^{(j)} = \xi) = \sum_{i=1}^k \log \frac{P(K_1 | z_i^{(j)} = \xi)}{P(K_1)} - \sum_{i=1}^k \log \frac{P(K_0 | z_i^{(j)} = \xi)}{P(K_0)}, \quad (2)$$

где k – число используемых информативных параметров и, следовательно, двоичных чисел z_i ; $P(K_s | z_i^{(j)} = \xi)$ – вероятность принадлежности экземпляра к классу K_s при условии, что в результате преобразования информативного параметра $x_i^{(j)}$ j -го экземпляра в двоичное число $z_i^{(j)}$ последнее приняло значение, равное ξ ($\xi = 1$ или $\xi = 0$); $P(K_s)$ – начальная вероятность принадлежности экземпляра к классу K_s ($s = 1$ или $s = 0$).

Для двоичных чисел $z_i = 1$ частная информация о классе K_1 будет положительной, а для $z_i = 0$ – отрицательной. Информация о классе K_0 , определяемая по алгоритму (2), для $z_i = 1$ будет отрицательной, а для $z_i = 0$ – положительной.

В табл. 4 приведены полученные по результатам обучающего эксперимента вероятности, используемые в алгоритме (2), и значения частной информации о классах K_1 и K_0 .

Таблица 4. Данные для подсчета решающей функции

Table 4. Data for calculating the decision function

z_i	$P(K_1 1)$	$P(K_1 0)$	$P(K_1)$	$I(K_1 1)$	$I(K_1 0)$	$P(K_0 1)$	$P(K_0 0)$	$P(K_0)$	$I(K_0 1)$	$I(K_0 0)$
z_1	0,776	0,333	0,564	0,460	-0,758	0,224	0,667	0,436	-0,958	0,612
z_2	0,717	0,294	0,564	0,346	-0,939	0,283	0,706	0,436	-0,622	0,695
z_3	0,719	0,233	0,564	0,350	-1,273	0,281	0,767	0,436	-0,633	0,814

В табл. 5 указаны сочетания, построенные из двоичных чисел z_1, z_2 и z_3 для класса K_1 , записаны значения F и значения частной информации о классе K_1 и классе K_0 .

Таблица 5. Прогнозирующее правило в виде логической таблицы для класса K_1

Table 5. Predictive rule as a logical table for class K_1

Сочетание z_i Combination z_i			Значение F , подсчитанное по алгоритму (2) F value calculated by algorithm (2)	$\sum_{i=1}^k I(K_1 z_i = \xi)$	$\sum_{i=1}^k I(K_0 z_i = \xi)$
z_1	z_2	z_3			
1	1	1	3,369	1,156	-2,213
1	1	0	0,299	-0,467	-0,766
1	0	1	0,767	-0,129	-0,896
0	1	1	0,581	-0,062	-0,643

Сочетания, не приведенные в табл. 5, соответствуют прогнозу о принадлежности экземпляра к классу K_0 . Для этих сочетаний значение F , подсчитанное по алгоритму (2), будет отрицательным. Порогом разделения классов является значение $F = 0$, при этом, как следует из анализа обучающей выборки, вероятность правильного распознавания по прогнозу экземпляров повышенного уровня надежности (класс K_1) составляет 0,93.

Заключение

Экспериментально установлено, что электрические параметры ($h_{21Э}$ – статический коэффициент усиления по току в схеме с общим эмиттером, $I_{КЭ0}$ – обратный ток коллекторного перехода, $U_{КЭнас}$ – напряжение насыщения коллектор-эмиттер), используемые в качестве информативных для исследуемого типа биполярных транзисторов (КТ872А), имеют примерно одинаковую информативность, поэтому для получения прогнозирующего правила представилось возможным использовать метод мажоритарной логики [2], являющийся частным случаем метода пороговой логики [10]. Прогнозирующее правило, полученное методом мажоритарной логики, позволяет в начальный момент времени принимать решение о принадлежности биполярных транзисторов к классу высоконадежных экземпляров по большинству единиц в наборе двоичных чисел, получаемом для конкретного экземпляра путем преобразования его информативных параметров (результатов измерения параметров) в двоичный код. Для отнесения конкретного экземпляра к классу высоконадежных экземпляров достаточно, чтобы число единиц превышало число нулей в полученном для него наборе двоичных чисел. При применении предлагаемого метода для решения практических задач с использованием логических таблиц отпадает необходимость выполнения математических расчетов на этапе прогнозирования надежности однотипных экземпляров, не принимавших участия в обучающем эксперименте.

Список литературы

1. Харченко В.А. Проблемы надежности электронных компонентов. *Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники*. 2015;18(1):52-57.
2. Боровиков С.М. *Статистическое прогнозирование для отбраковки потенциально ненадежных изделий электронной техники*. Москва: Новое знание; 2013.
3. Пиганов М.Н. *Индивидуальное прогнозирование качества элементов и компонентов микросборок*. Москва: Новые технологии; 2002.
4. Горлов М.И., Сергеев В.А. *Современные диагностические методы контроля качества и надежности полупроводниковых изделий*. Ульяновск: УЛГТУ; 2015.
5. Robinson L.E. Life expectancy in electronic components and 10th rule. *Testing*. 1998;1:16.
6. Bipolar Power Transistor. Data Book 1998. *TEMIC Semiconductors*. 1997;12:35-42.
7. Боровиков С.М., Шнейдеров Е.Н., Плебанович В.И., Бересневич А.И., Бурак И.А. Экспериментальное исследование деградации изделий электронной техники. *Доклады БГУИР*. 2017;2(104):45-52.
8. Боровиков С.М., Цырельчук И.Н., Шнейдеров Е.Н., Бересневич А.И. *Прогнозирование надежности изделий электронной техники*. Минск: МГВРК; 2010.
9. Мишанов Р.О., Пиганов М.Н. Методика определения набора информативных параметров для проведения индивидуального прогнозирования качества и надежности радиоэлектронных средств. *Надежность и качество сложных систем*. 2017;17(1):93-103.
10. Боровиков С.М., Бересневич А.И., Хмыль А.А., Емельянов А.В., Цырельчук И.Н. Метод прогнозирования надежности изделий электронной техники. *Доклады Национальной академии наук Беларуси*. 2006;50(4):105-109.

References

1. Kharchenko V.A. [Problems of Reliability of Electronic Components]. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Materialy Elektronnoi Tekhniki = Proceedings of higher educational institutions. Materials of Electronics Engineering*. 2015;18(1):52-57. (In Russ.)
2. Borovikov S.M. [Statistical forecasting for the rejection of potentially unreliable electronic products]. Moscow: New Knowledge; 2013. (In Russ.)
3. Piganov M.N. [Individual prediction of the quality of elements and components of micro-assemblies]. Moscow: New technologies; 2002. (In Russ.)
4. Gorlov M.I., Sergeev V.A. [Modern diagnostic methods of quality control and reliability of semiconductor products]. Ulyanovsk: UISTU; 2015. (In Russ.)
5. Robinson L. E. Life expectancy in electronic components and 10th rule. *Testing*. 1998;1:16.
6. Bipolar Power Transistor. Data Book 1998. *TEMIC Semiconductors*. 1997;12:35-42.

7. Borovikov S.M., Shneiderov E.N., Plebanovich V.I., Beresnevich A.I., Burak I.A. [An experimental study of the degradation of electronic products]. *Doklady BGUIR = Doklady BGUIR*. 2017;2 (104):45-52. (In Russ.)
8. Borovikov S.M., Tsyrelchuk I.N., Shneiderov E.N., Beresnevich A.I. [*Predicting the reliability of electronic products*]. Minsk: MGVRK; 2010. (In Russ.)
9. Mishanov R.O., Piganov M.N. [Methodology for determining a set of informative parameters for individual prediction of the quality and reliability of radio electronic equipment]. *Nadejnost i kachestvo slojnih sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2017;17(1):93-103. (In Russ.)
10. Borovikov S.M., Beresnevich A.I., Khmyl A.A., Emelyanov A.V., Tsyrelchuk I.N. [Method for predicting the reliability of electronic products]. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*. 2006;50(4):105-109. (In Russ.)

Вклад авторов

Все авторы в равной степени внесли вклад в написание статьи.

Authors' contribution

All authors have equally contributed to writing the article.

Сведения об авторах

Боровиков С.М., к.т.н., доцент, доцент кафедры проектирования информационно-компьютерных систем Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Казючиц В.О., м.т.н., ассистент кафедры проектирования информационно-компьютерных систем Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Information about the authors

Borovikov S.M., PhD, Associate Professor of the Information and Computer Systems Design Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Kaziuchyts V.O., M.Sci, Assistant of the Information and Computer Systems Design 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. +375-17-293-88-38;
e-mail: bsm@bsuir.by
Боровиков Сергей Максимович

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki str., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
tel. +375-17-293-88-38;
e-mail: bsm@bsuir.by
Borovikov Sergei Maksimovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2021-19-1-96-104>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 541.64: 537.5

СПОСОБ АНАЛИЗА СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ РЕГЕНЕРИРОВАННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ ВОЛОКНИСТЫХ ФИЛЬТРОМАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ТОНКОЙ ОЧИСТКИ ВОЗДУХА

А.Г. КРАВЦОВ, М.В. ТУМИЛОВИЧ, Л.П. ПИЛИНЕВИЧ

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

Поступила в редакцию 10 июля 2020

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2021

Аннотация. Ужесточение требований к качеству и надежности выпускаемых изделий, а также необходимость повышения сроков службы машин, механизмов и различных устройств, эксплуатация которых связана с использованием жидких или газовойоздушных сред, является причиной появления новых и совершенствования традиционных методов получения фильтрующих материалов с более высокими эксплуатационными характеристиками. Предложена методика всестороннего анализа свойств регенерированных фильтроматериалов для тонкой очистки воздуха. Подавляющее большинство фильтров после выработки своего ресурса не поддается регенерации, поскольку это, как правило, связано с большими энергетическими затратами. Вместе с тем достаточно большую актуальность с точки зрения ресурсосбережения имеет разработка способов такой регенерации. В связи с этим целью настоящей работы является привлечение ряда физических методов исследования с целью всестороннего анализа полимерных волокнистых фильтроматериалов для очистки воздуха, прошедших регенерацию. Для исследований были выбраны фильтрующие материалы, полученные методом «melt-blowing» из полимерных гранул путем переработки гранулята в экструдере, аэродинамического распыления расплава и формирования волокнисто-пористого слоя на формообразующей оправке. Исследованы основные фильтрационные характеристики исходных и регенерированных фильтроматериалов (коэффициент проскока, аэродинамическое сопротивление), а также электрофизические свойства первичного и вторичного фильтроматериалов, наличие спонтанного электростатического заряда. Описаны основные этапы регенерации и оценки физико-химических, механических и эксплуатационных свойств прошедших вторичную термо-аэродинамическую переработку волокнисто-пористых материалов в сравнении с исходными. Показано, что исследованные материалы сохраняют свои основные свойства, при этом изменяется структура волокон и усиливается электростатический эффект.

Ключевые слова: полимерные волокна, волокнистые фильтрующие материалы, очистка воздуха, процесс «melt-blowing», электростатический эффект, регенерация фильтроэлементов.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Кравцов А.Г., Тумилович М.В., Пилинович Л.П. Способ анализа структуры и свойств регенерированных полимерных волокнистых фильтроматериалов для тонкой очистки воздуха. Доклады БГУИР. 2021; 19(1): 96-104.

METHOD FOR ANALYSIS OF THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF REGENERATED POLYMER FIBROUS FILTER MATERIALS FOR THIN CLEANING OF AIRL

ALIAKSANDAR G. KRAVTSOV, MIRASLAU V. TUMILOVICH, LEANID P. PILINEVICH

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

Submitted 10 July 2020

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2021

Abstract. Stricter requirements for the quality and reliability of manufactured products, as well as the need to increase the service life of machines, mechanisms and various devices, the operation of which is associated with the use of liquid or gas-air media, is the reason for the emergence of new and improvement of traditional methods for obtaining filter materials with higher performance characteristics. A method for a comprehensive analysis of the properties of regenerated filter materials for fine air purification is proposed. The overwhelming majority of filters, after their service life is exhausted, cannot be regenerated, since this, as a rule, is associated with high energy costs. At the same time, the development of methods for such regeneration is quite relevant from the point of view of resource conservation. In this regard, the purpose of this work is to use a number of physical research methods for the purpose of a comprehensive analysis of polymeric fibrous filter materials for air purification that have undergone regeneration. Filtration materials obtained by the «melt-blowing» method from polymer granules by processing the granulate in an extruder, aerodynamic spraying of the melt and the formation of a fibrous-porous layer on a forming mandrel were selected for research. The main filtration characteristics of the original and regenerated filter materials (breakthrough coefficient, aerodynamic drag), as well as the electrophysical properties of the primary and secondary filter materials, the presence of a spontaneous electret charge have been investigated. The main stages of regeneration and evaluation of physicochemical, mechanical and operational properties of fibrous-porous materials that have undergone secondary thermo-aerodynamic processing in comparison with the original ones are described. It is shown that the studied materials retain their basic properties, while the structure of the fibers changes and the electret effect is enhanced.

Keywords: polymer fibers, fibrous filter materials, air purification, the «melt-blowing» process, electret effect, filter element regeneration.

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

For citation. Kravtsov A.G., Tumilovich M.V. Pilinevich L.P. Method for analysis of the structure and properties of regenerated polymer fibrous filter for thin cleaning of airl. Doklady BGUIR. 2021; 19(1): 96-104.

Введение

Наметившаяся в последнее время интенсификация работ в области создания и применения фильтрующих материалов обусловлена рядом причин. Среди них можно отметить ужесточение требований к качеству и надежности выпускаемых изделий, а также необходимость повышения сроков службы машин, механизмов и различных устройств, эксплуатация которых связана с использованием жидких или газоздушных сред.

Известно, что основное требование к фильтрам и фильтроматериалам – способность к эффективному разделению на фазы дисперсных систем «жидкость – твердое тело» или «газ (воздух) – твердое тело», содержащих твердые частицы микронных или субмикронных размеров. Обычно фильтроматериалы изготавливают из стекла, керамики, металлов, полимеров и других веществ. Существующие методики анализа характеристик фильтроматериалов не всегда оказываются в состоянии обеспечить возрастающие потребности разработчиков и потребителей фильтров.

подавляющее большинство фильтров после выработки своего ресурса не поддаются регенерации, поскольку это, как правило, связано с большими энергетическими затратами.

Вместе с тем достаточно большую актуальность с точки зрения ресурсосбережения имеет разработка способов такой регенерации. В связи с неизбежным при этом дополнительным воздействием на материалы логично предполагать изменение основных эксплуатационных и физико-химических характеристик последних и даже приобретение ими совершенно новых свойств. Этот факт, подтвержденный практикой, обуславливает необходимость привлечения дополнительных методов исследования таких материалов.

В связи с вышеизложенным цель настоящей работы – привлечение ряда физических методов исследования с целью всестороннего анализа полимерных волокнистых фильтроматериалов для очистки воздуха, прошедших регенерацию.

Методика проведение экспериментов

Для формирования полимерных волокнистых фильтроматериалов использовали технологию «melt-blowing». Данный технологический процесс получения фильтроматериалов включает [1] переработку гранулята в экструдере, аэродинамическое распыление расплава и формирование волокнисто-пористого слоя на формообразующей оправке. В эксперименте применяли гранулированный полиэтилен высокого давления марки ПЭВД 15803-020 (температура плавления $T_{пл} = 110$ °С определена методом дифференциального термического анализа). Изготавливали полотна размером $70 \times 50 \times 0,5$ см (далее – первичный фильтроматериал), которые устанавливали для работы в системах тонкой очистки воздуха в помещениях.

Технологическая схема регенерации выработавших ресурс фильтроматериалов включала плавление полотен на воздухе ($T_{пл} = 220$ °С) и измельчение полимерной массы в пневмоструйной мельнице с выделением трех фракций:

- 1 – микронная составляющая (размер частиц 50–300 мкм);
- 2 – субмикронная составляющая (10–50 мкм);
- 3 – летучая фракция (менее 10 мкм).

Фракции 1 и 2 смешивали и гранулировали. Полученный гранулят вновь подвергали пневмодиспергированию методом «melt-blowing» с сохранением технологических режимов, изготавливая полотна размером $70 \times 50 \times 0,5$ см (далее – вторичный фильтроматериал).

Предложенный способ регенерации пневмоструйным измельчением основан на том, что большинство захваченных фильтроматериалом микронных и субмикронных частиц загрязнителя переходит в летучую фракцию, далее отсеиваемую.

Фильтрационные свойства анализировали путем измерения аэродинамического сопротивления и коэффициента проскока масляного тумана согласно ГОСТ 12.4.294-2015 (EN 149:2001+A1:2009).

Результаты исследований и их обсуждение

Исследование фильтрационных характеристик первичного и вторичного материалов показало (рис. 1), что эффективность фильтрации масляного аэрозоля для вторичных материалов несколько выше, а аэродинамическое сопротивление – ниже, чем для первичных. При сравнении фильтрационных свойств волокнисто-пористых фильтроматериалов, получаемых аэродинамическим распылением расплава полимера, и неэлектризованного микрофильтра Петрянова для очистки воздуха установлено, что исследуемые показатели для «melt-blown» материалов выше. Такие результаты могут быть обусловлены наличием в «melt-blown» материалах спонтанного электростатического заряда. Электростатический заряд является полезным фактором при очистке газовых сред от субмикронных частиц загрязнителей [1]. Наличие статического заряда (электретный эффект) обеспечивает более эффективное улавливание за счет захвата кулоновскими силами заряженных частиц загрязнителя, а также нейтральных частиц, приобретающих наведенный дипольный момент в поле электрета.

Ранее было установлено [2], что в пневмодиспергируемых волокнистых полимерных материалах существует спонтанный электретный эффект, обусловленный особенностями технологического процесса – повышенными температурами в зоне обработки полимеров,

близкими к тем, при которых начинается интенсивная термоокислительная деструкция макромолекул, воздействием распыливающего воздуха, существованием в расплаве полимера макромолекул с «врожденными» дефектами, которые выступают в роли структурных ловушек носителей заряда, и т. п. В этой связи важную информацию о фильтрационных свойствах этих материалов и о реализуемых ими механизмах фильтрации могут предоставить классические методы анализа такого феномена, как электретное состояние полимерных диэлектриков.

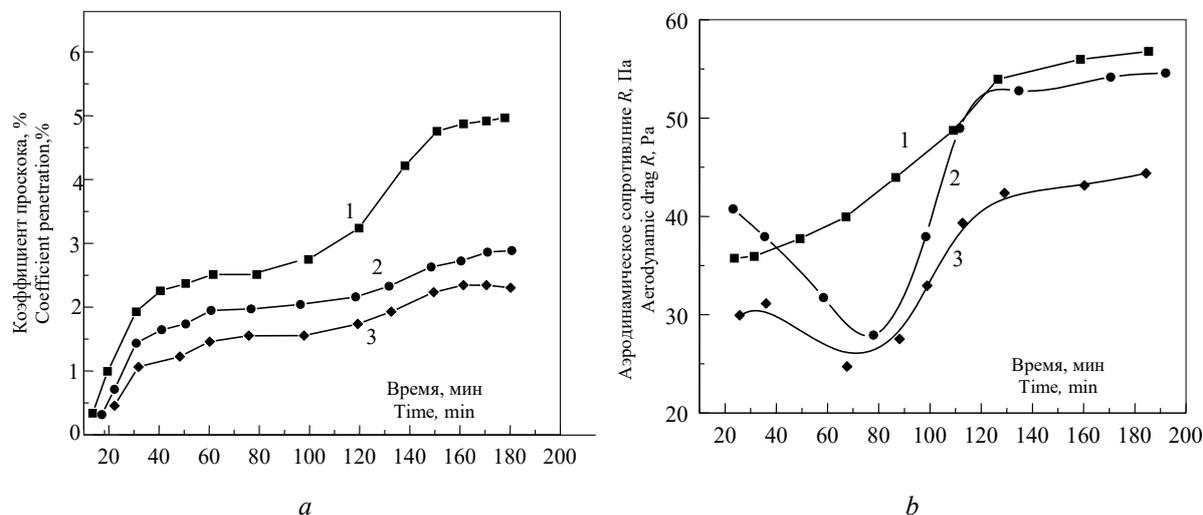


Рис. 1. Фильтрационные свойства волокнисто-пористых материалов: *a* – коэффициент проскока масляного тумана (средний размер частиц аэрозоля $\approx 0,2$ мкм); *b* – аэродинамическое сопротивление: микрофильтр Петрянова (1), первичный материал (2), вторичный материал (3)

Fig. 1. Filtration properties of fibrous-porous materials: *a* – oil mist penetration coefficient (average aerosol particle size ≈ 0.2 μm); *b* – aerodynamic drag: Petryanov microfilter (1), primary material (2), secondary material (3)

При исследовании электрофизических свойств первичного и вторичного фильтроматериалов изучали наличие спонтанного электретного заряда, помещая образец между двумя электродами, нагревая с некоторой линейной скоростью и фиксируя протекающий в цепи ток. График тока в функции температуры представляет собой спектр термостимулированных токов (ТСТ), по характеру которого судят о механизмах, ответственных за проявление электретного эффекта. Преимуществом выбранного метода электретно-термического анализа является высокая чувствительность и разрешающая способность, а также возможность проследить релаксационные процессы в веществе, находящемся в различных фазовых состояниях, с регистрацией температур перехода между ними. ТСТ фиксировали при скорости нагрева образца 5 $^{\circ}\text{C}/\text{мин}$. Также определяли эффективную поверхностную плотность заряда (ЭППЗ) бесконтактным компенсационным методом [3]. Измерение электретных характеристик полимерных материалов осуществляли согласно ГОСТ 25209-82.

На рис.2 представлены спектры ТСТ «melt-blown» материалов. Видно, что у вторичных волокнистых материалов при увеличении ЭППЗ в 2 раза возрастает интенсивность пика ТСТ с $T_{\text{max}} \sim 60\text{--}63$ $^{\circ}\text{C}$. Характерный для ПЭВД [4] пик ТСТ – в температурном интервале $100\text{--}105$ $^{\circ}\text{C}$, который соответствует началу фазового перехода при плавлении. У вторичного материала он смещается на $5\text{--}10$ $^{\circ}\text{C}$ в сторону более низких значений T , причем интенсивность его повышается.

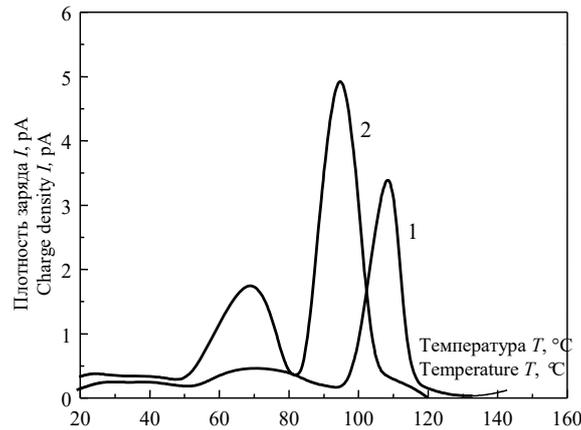


Рис. 2. ТСТ-спектры melt-blown образцов: первичный материал (ЭППЗ, $\sigma_{эф} = 0,65$ нКл/см²) (1), регенерированный материал ($\sigma_{эф} = 1,2$ нКл/см²) (2)

Fig. 2. TST spectra of melt-blown samples: primary material (EPPZ, $\sigma_{eff} = 0.65$ nC/cm²) (1), regenerated material ($\sigma_{eff} = 1.2$ nC/cm²) (2)

Для выявления факторов, обуславливающих проявление полимерными волокнистыми материалами электретных свойств, целесообразно применить ИК-спектроскопию. На ИК-спектрах пропускания (записаны с помощью спектрометра UR-20) «melt-blown» образцов (рис. 3, *a*) идентифицированы пики, соответствующие винилиденовым, винильным и трансвиниленовым группам [4]. Эти группы могут выступать в качестве нейтральных центров захвата по отношению к носителям заряда [5]. На ИК-спектрах вторичного материала (рис. 3, *b*) отмечено значительное увеличение интенсивности пика в области 1720 см⁻¹, который отвечает кислородсодержащим функциональным группам – гидроксильным ОН и карбонильным С=О. Эти группы, обладающие дипольным моментом и способные вносить вклад в дипольную поляризацию, могут быть ответственны за появление на спектрах ТСТ вторичного материала интенсивного низкотемпературного пика ($T_{max} \sim 60-63$ °С). Увеличение содержания таких групп в материале, по-видимому, является следствием повторного пневмодиспергирования и причиной отмеченного снижения температуры фазового перехода на 5–10 °С в связи с изменением химической структуры «melt-blown» волокон.

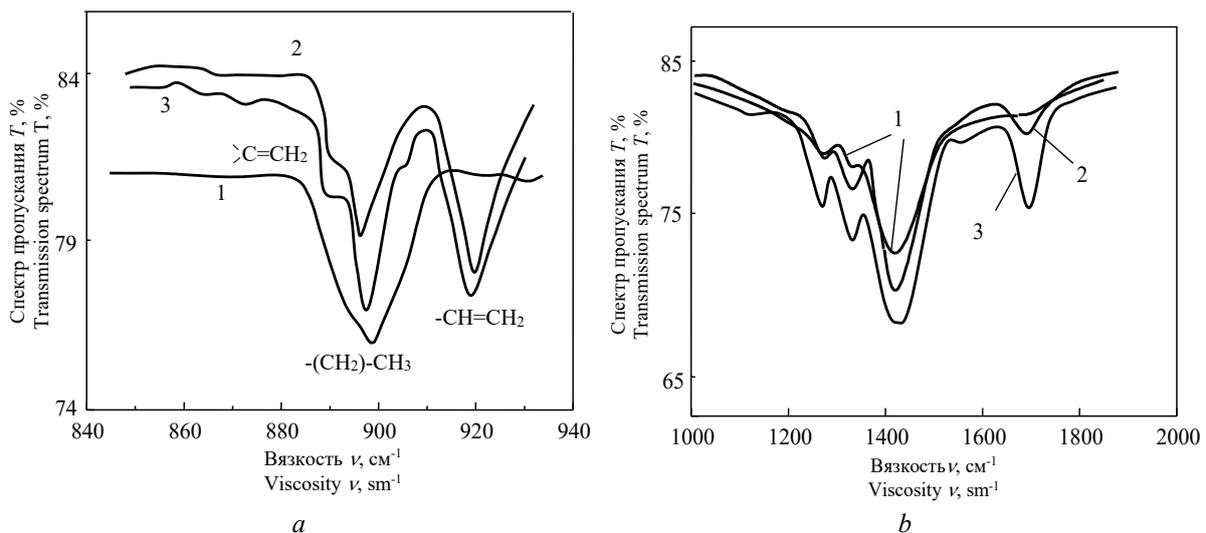


Рис. 3. ИК-спектры пропускания пленок ПЭВД, полученных из первичного (1), вторичного (2) волокнистого материала и из исходного полимера (3) для «melt-blown» образцов (*a*) и для вторичного материала (*b*)

Fig. 3. IR transmission spectra of LDPE films obtained from primary (1), secondary (2) fibrous material and from the starting polymer (3) for melt-blown samples (*a*) and for secondary material (*b*)

Очевидно, примененная схема регенерации обеспечивает усиление электретного эффекта в полимерных волокнистых материалах, что, как показано выше, связано с улучшением эксплуатационных свойств последних.

Динамическую вязкость расплава η «melt-blown» материалов определяли по скорости сдвига γ согласно международному стандарту ISO 1133 (рис. 4). Пористость образцов изучали с помощью автоматического анализатора изображений «Mini Magiscan».

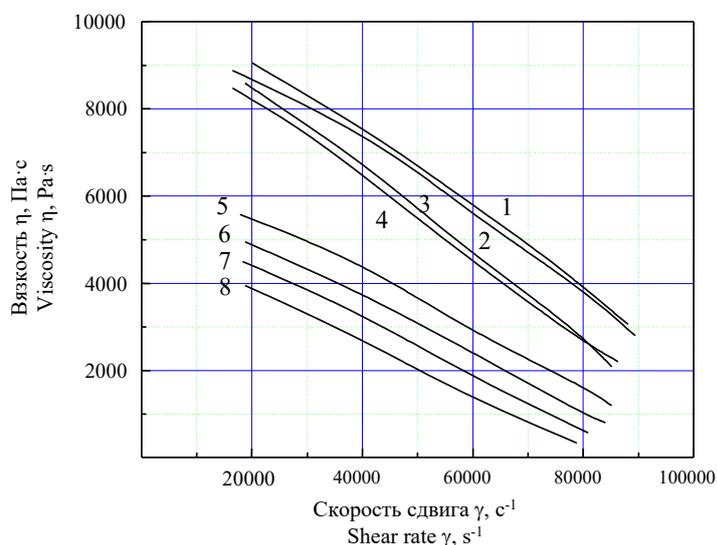


Рис. 4. Температурные зависимости вязкости расплава «melt-blown» материалов из ПЭВД: первичный (1–4), вторичный материал (5–8); температура экспозиции: $T = 190\text{ °C}$ (1, 5), $T = 220\text{ °C}$ (2, 6), $T = 280\text{ °C}$ (3, 7), $T = 340\text{ °C}$ (4, 8)

Fig. 4. Temperature dependences of the «melt-blown» melt viscosity of LDPE materials: (1–4) – primary, (5–8) – secondary material; exposure temperature: $T = 190\text{ °C}$ (1, 5), $T = 220\text{ °C}$ (2, 6), $T = 280\text{ °C}$ (3, 7), $T = 340\text{ °C}$ (4, 8)

Анализ данных экспериментальных результатов, приведенных на рис. 4, показывает, что вязкость вторичного материала уменьшается в несколько раз. Установлены минимальная – 320 °C (300 °C) и оптимальная – 350 °C (330 °C) температуры формирования волокон для первичного и вторичного материалов соответственно. Известно, что высокая вязкость подразумевает низкий показатель текучести расплава и высокий молекулярный вес. В то же время неизбежным следствием распыления полимеров в вязкотекучем состоянии является уменьшение длины макромолекул.

Исследовано влияние технологических факторов (частоты вращения шнека экструдера n , давления p и температуры T распыливающего воздуха, расстояния L от сопла до формообразующей оправки) на некоторые структурные свойства сформированных волокон. Отмечено, что с увеличением текучести расплава при меньших температурах связано уменьшение толщины волокон вторичных образцов при одинаковых технологических режимах процесса «melt-blowing»: на рис. 5 видно, что эта толщина значительно меньше для всех исследованных образцов.

Микроскопические исследования (контроль размеров частиц фракций и параметров волокон) проводили с применением электронного микроскопа «NANOLAB-7» при 500-кратном увеличении. Анализ изображений (рис. 6) позволяет оценить геометрические параметры волокон. Подтверждается факт уменьшения толщины волокон (до диаметра 1 мкм). Установлено также, что пористость как первичных, так и вторичных образцов составляет около 90% .

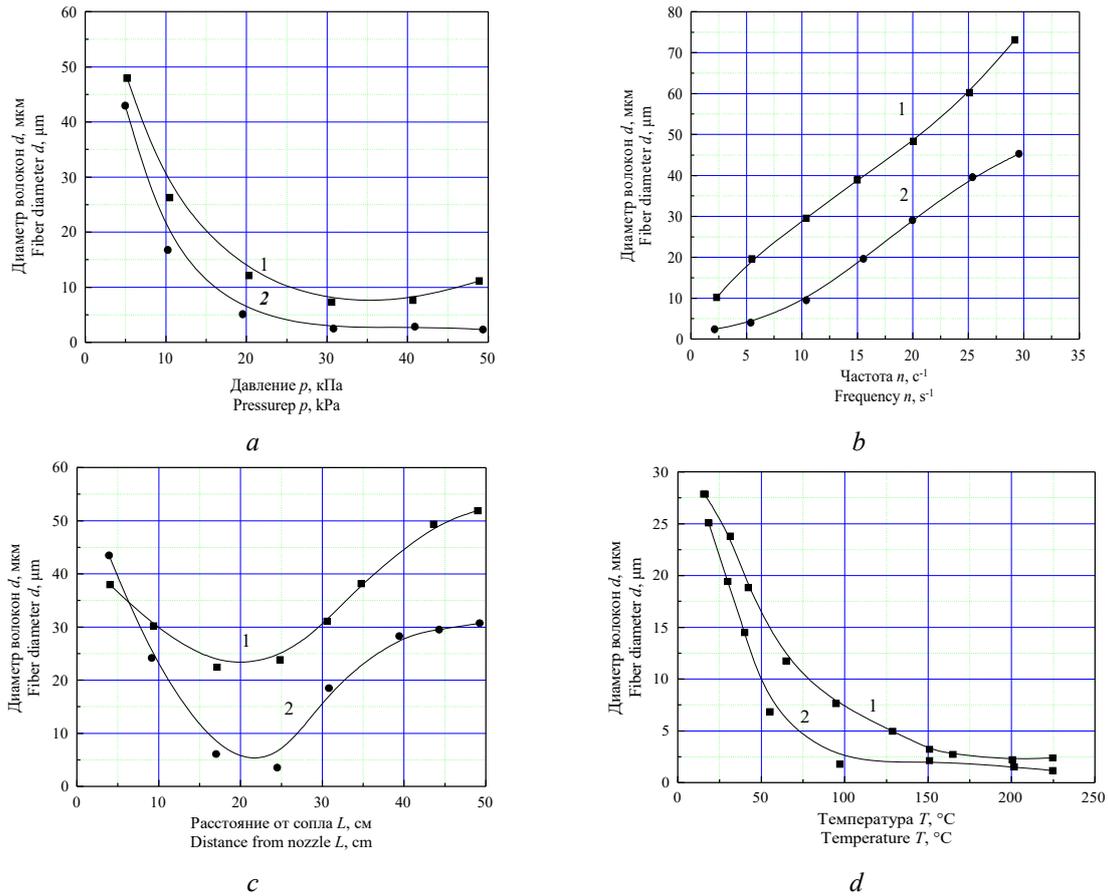


Рис. 5. Зависимости диаметра волокон материала от: *a* – давления p распыливающего воздуха, *b* – частоты n вращения шнека экструдера, *c* – расстояния L от сопла до формообразующей оправки, *d* – температуры T распыливающего воздуха. Кривая (1) – первичный, кривая (2) – вторичный материал
Fig. 5. Dependences of the fiber diameter of the material on: *a* – the pressure p of the spraying air, *b* – the frequency n of the rotation of the screw of the extruder, *c* – the distance L from the nozzle to the forming mandrel, *d* – the temperature T of the spraying air. Curve (1) – primary, curve (2) – secondary material

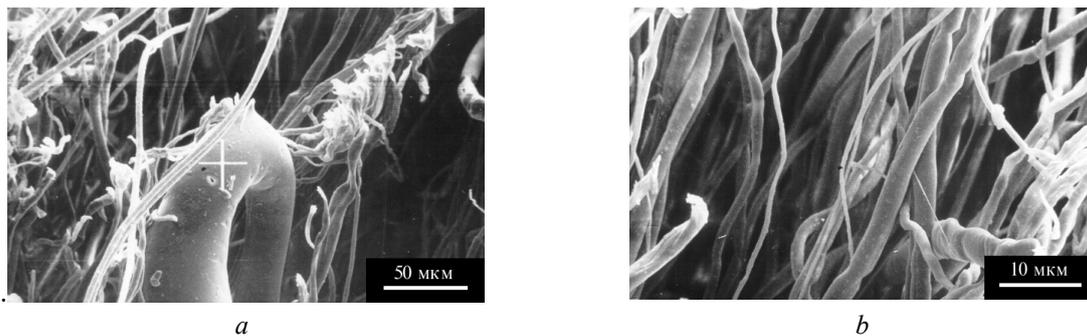


Рис. 6. Структура волокнистых материалов при 500-кратном увеличении: *a* – первичный; *b* – вторичный фильтроматериал

Fig. 6. The structure of fibrous materials at a 500-fold increase: *a* – primary; *b* – secondary filter material

Известно [6], что диаметр волокон и плотность материала являются определяющими характеристиками для волокнистых фильтрующих материалов. Чем ниже диаметр волокон и выше плотность их укладки, тем меньше размер пор в материале, что повышает эффективность очистки. Это вполне применимо к вторичному материалу, для которого предполагаемое повышение тонкости и эффективности фильтрации должно быть обусловлено значительным увеличением количества мелких пор при сохранении суммарного значения пористости.

На основании проведенных экспериментальных исследований разработана схема комплексного анализа фильтроматериалов, включающая в себя несколько операций, проводимых независимо друг от друга как взаимодополняющие, представленная на рис. 7.

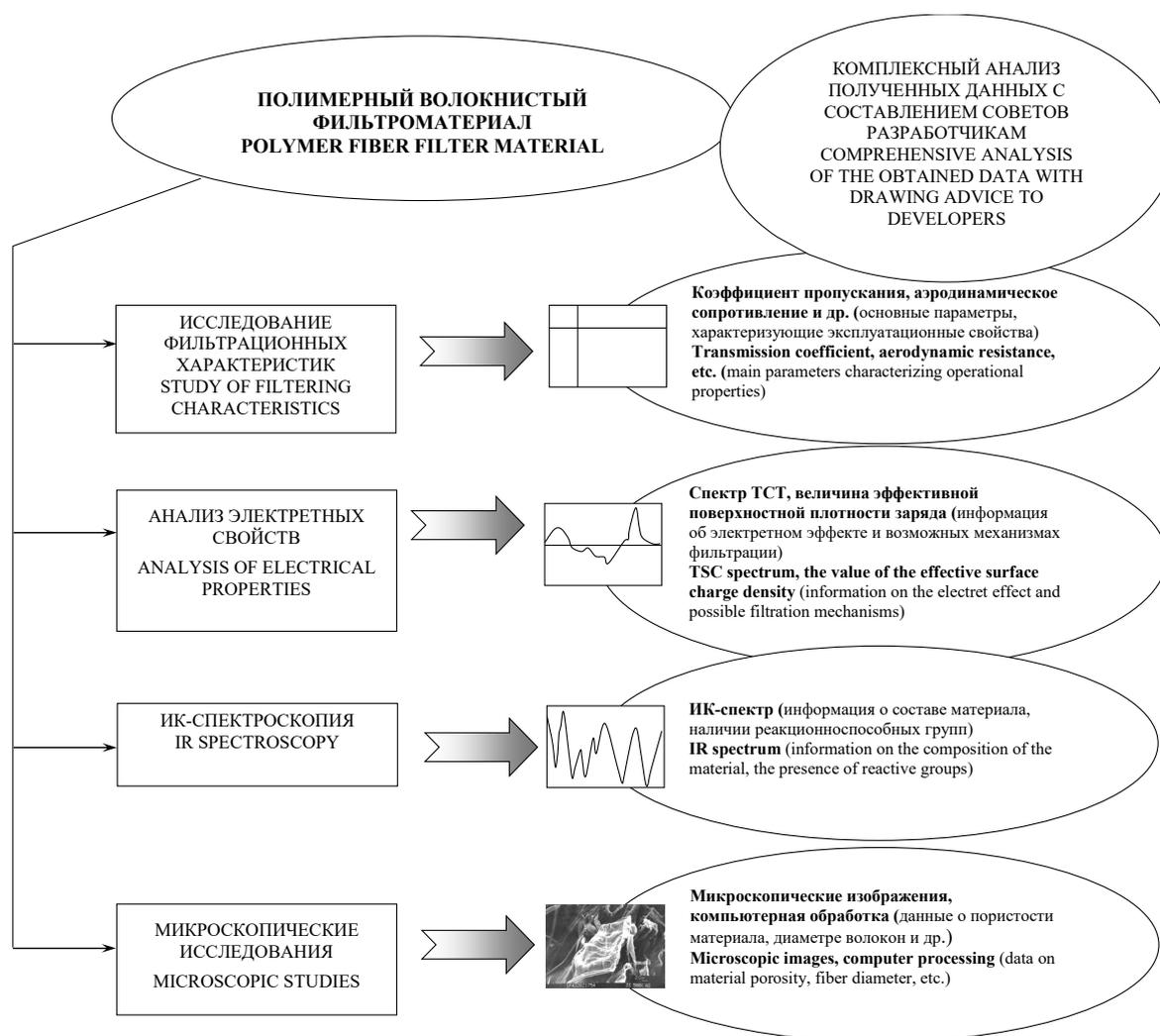


Рис. 7. Предлагаемая схема комплексной диагностики полимерных волокнисто-пористых фильтрующих материалов после их регенерации

Fig. 7. The proposed scheme for the comprehensive diagnostics of polymer fiber-porous filter materials after their regeneration

Заключение

Проведенные экспериментальные исследования и полученные результаты позволяют сделать вывод, что совокупность использованных методов исследования полимерных волокнистых фильтроматериалов дает достаточно полную информацию о целом ряде их важных функциональных параметров. Предложенная схема оценки свойств применима как к исходным полимерным волокнистым фильтроматериалам, так и к прошедшим регенерацию с помощью воздушно-струйного измельчения. В последнем случае материал, подвергаемый дополнительному воздействию факторов процесса «melt-lowing», приобретает ряд свойств, способствующих повышению его фильтрующей способности для тонкой очистки воздуха. Приведенные экспериментальные данные достаточно хорошо иллюстрируют возможности предлагаемой схемы анализа. Полученные тонковолокнистые электретные материалы находят применение в качестве фильтроэлементов в респираторах – современных надежных средствах индивидуальной защиты органов дыхания от аэрозолей, пыли, дыма, тумана или вредных (в том числе угарных) газов. Электретный эффект волокон способствует очистке вдыхаемого воздуха от частиц аэрозолей менее 1 мкм. Данные материалы используются в таких известных брендах в области средств защиты органов дыхания, как 3М, Лепесток, FFP1, FFP2 и др.

Список литературы

1. Петрянов И.В., Козлов В.И., Басманов П.И., Огородников Б.И. *Волокнистые фильтрующие материалы*. Москва: Знание; 1968.
2. Kravtsov A.G., Brünig H. *Polymer Science*. 2000; Ser. B., 42(5-6).
3. *Electrets*. Ed. by Sessler G.M. Berlin: Springer-Verlag; 1987.
4. Као К., Хуанг В. *Перенос электронов в твердых телах* (Ч. 1). Москва: Мир; 1984.
5. Кравцов А.Г., Марченко С.А., Зотов С.В., Станкевич В.М., Наумов А.Д. *Полимерные волокнисто-пористые фильтрующие материалы*; под общ. ред. Плескачевского Ю.М. Гомель: БелГУТ; 2012.
6. Кравцов А.Г. *Волокнистые фильтры*. Электронное издание (монография). Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing; 2015.

References

1. Petryanov I.V., Kozlov V.I., Basmanov P.I., Ogorodnikov B.I. [*Fibrous filter media*]. Moscow: Knowledge; 1968. (In Russ.)
2. Kravtsov A.G., Brünig H. *Polymer Science*. 2000; Ser. B., 42(5-6).
3. *Electrets*. Ed. by Sessler G.M. Berlin: Springer-Verlag; 1987.
4. Kao K., Huang V. [*Electron transport in solids*] (P. 1). Moscow: Mir; 1984. (In Russ.)
5. Kravtsov A.G., Marchenko S.A., Zotov S.V., Stankevich V.M., Naumov A.D. [*Polymeric fiber-porous filtering materials*]; under the general. ed. Pleskachevsky Yu.M. Gomel: BelsUT; 2012. (In Russ.)
6. Kravtsov A.G. [*Fibrous filters*]. Electronic edition (monograph). Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing; 2015. (In Russ.)

Вклад авторов

Кравцов А.Г., написал введение, заключение, провел анализ полученных результатов.
Тумилович М.В. сформулировал цель и задачи исследований, провел экспериментальные исследования и обработку полученных данных.
Пилиневич Л.П. провел теоретический анализ исследуемой проблемы.

Authors' contribution

Kravtsov A.G., wrote an introduction, conclusion, conducted an analysis of the results.
Tumilovich M.V. formulated the goal and objectives of the research, conducted experimental research and processing of the data.
Pilinevich L.P. conducted a theoretical analysis of the investigated problem.

Сведения об авторах

Кравцов А.Г., д.т.н., профессор, профессор кафедры инженерной психологии и эргономики Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Тумилович М.В., д.т.н., доцент, начальник управления подготовки научных кадров высшей квалификации Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Пилиневич Л.П., д.т.н., профессор, профессор кафедры инженерной психологии и эргономики 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. +375-17-293-88-83;
e-mail: tumilovich@bsuir.by
Тумилович Мирослав Викторович

Information about the authors

Kravtsov A.G., D.Sci, Professor, Professor of the Engineering Psychology and Ergonomics Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Tumilovich M.V., D.Sci, Associate Professor, Head of the preparation of scientific shots of the top skills Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Pilinevich L.P., D.Sci, Professor, Professor of the Engineering Psychology and Ergonomics Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki str., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
+375-17-293-88-83;
e-mail: tumilovich@bsuir.by
Tumilovich Miraslau Victorovich