
ДОКЛАДЫ БГУИР

Выходит два раза в квартал

Научный журнал издается с января 2003 года

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

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

Главный редактор

Вадим Анатольевич Богуш

Ректор Белорусского государственного университета
информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь

Редакционная коллегия:

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

Редакционный совет:

И.И. Абрамов, В.Е. Агабеков, И.С. Азаров, В.В. Баранов, А.И. Белоус,
И.В. Боднар, С.В. Бордусов, С.В. Гапоненко, Н.В. Гапоненко, В.В. Голенков,
В.Ф. Голиков, Л.И. Гурский, А.П. Достанко, В.А. Емельянов, А.А. Иванюк,
В.М. Колешко, Ф.Ф. Комаров, Ф.П. Коршунов, В.А. Куренев,
В.И. Курмашев, Н.И. Листопад, В.Е. Матюшков, Ф.И. Пантелеенко,
В.А. Пилипенко, С.Л. 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

Ильинков В.А., Мойсевич Ю.С. Расширение возможностей моделирования сигналов систем телекоммуникаций и радиоэлектроники	5
Шарамет А.В. Анализ влияния программно-аппаратных шумов на результаты цифровой обработки сигналов.....	14
Шафранов А.Ю., Борботько Т.В. Разборчивость и узнаваемость речи диктора при электроакустических преобразованиях в трансформаторе.....	21

Михнёнок Е.И., Хижняк А.В. Оценка эффективности обработки изображений в задаче обнаружения движущихся объектов оптико-электронной системой наблюдения	29
Казючиц В.О., Калита Е.В., Боровиков С.М., Бересневич А.И. Ускоренные испытания транзисторов большой мощности на длительную наработку при решении задач прогнозирования их надежности методом имитационных воздействий	36
Ковальчук Н.С., Омельченко А.А., Пилипенко В.А., Солодуха В.А., Демидович С.А., Колос В.В., Филипена В.А., Шестовский Д.В. Исследования электрофизических свойств тонких подзатворных диэлектриков, полученных методом быстрой термообработки	44
Гребнев В.П., Чубенко Е.Б., Бондаренко В.П. Формирование и свойства композитных гетеросистем на основе макропористого кремния, графитоподобного нитрида углерода и полупроводниковых соединений	53
Баранова М.С. Низкоразмерный магнетизм в соединениях с различной размерностью магнитного взаимодействия.....	62
Ярмолик В.Н., Иванюк А.А. Физически неклонированные функции типа арбитра с заведомо асимметричными парами путей	71
Вишняков В.А., Чжифэн Ху. Разработка и оптимизация сети Интернета вещей для мониторинга качества продукции	80
Пилиневич Л.П., Тумилович М.В., Румянцев Д.М., Гриб К.В., Бунас А.Г. Очистка воздуха в закрытых помещениях от высокодисперсных частиц и аэрозолей.....	88
Щербина Н.В. Дифференциальная диагностика способности к выработке навыка релаксации у машинистов локомотивных бригад	96

Ответственный секретарь редакции Т. В. Мироненко

Корректор Л. В. Кондакова

Специалист по компьютерному дизайну и верстке А. Д. Гурбо

Подписано в печать 24.06.2022. Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная. Отпечатано на ризографе.

Усл. печ. л. 12,32. Уч.-изд. л. 11,2. Тираж 100 экз. Заказ 119.

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 24.12.2020. 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6.

© УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», 2022

DOKLADY BGUIR

Published twice quarterly

The journal is being published since January, 2003

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

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

Chief Editor

Vadim Anatol'evich Bogush

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

Editor office address: P. Brovka St., 6, off. 326,
Minsk, 220013, Republic of Belarus

Editor office phone number: +375-17-293-88-41

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

CONTENTS

ELECTRONICS, RADIOPHYSICS, RADIOENGINEERING, INFORMATICS

Ilyinkov V.A., Maisiyevich Y.S. Expanding the Possibilities of Modeling Signals of Telecommunications and Radioelectronics Systems.....	5
Sharamet A.V. Analysis of the Influence of Software and Hardware Noise on the Results of Digital Signal Processing.....	14
Shafranov A.Y., Borbotko T.V. Intelligibility and Recognition of Announcer's Speech during Electric Acoustic Conversions in a Transformer.....	21
Mikhnionok E.I., Khizniak A.V. Evaluating the Effectiveness of Image Processing in the Task of Detecting Moving Objects by an Optoelectronic Surveillance System	29
Kaziuchyts V.O., Kalita E.V., Borovikov S.M., Berasnevich A.I. Accelerated Testing of High Power Transistors for Long Operation when Solving Problems of Prediction of their Reliability by the Method of Imitation Simulation	36
Kovalchuk N.S., Omelchenko A.A., Pilipenko V.A., Solodukha V.A., Demidovich S.V., Kolos V.V., Filipenia V.A., Shestovski D.V. Research of Electrophysical Properties of Thin Gate Dielectrics Obtained by Rapid Thermal Processing Method	44
Grebnev V.P., Chubenko E.B., Bondarenko V.P. Formation and Properties of Heterosystems Based on Porous Silicon, Graphitic Carbon Nitride and Semiconductor Compounds	53
Baranova M.S. Low-dimensional Magnetism in Compounds with Different Dimensions of Magnetic Interaction.....	62

Yarmolik V.N., Ivaniuk A.A. Arbiter Physical Unclonable Functions with Asymmetric Pairs of Paths	71
Vishniakou U.A., Zhifeng Hu. Development and Optimization of the Internet of Things Network for Product Quality Monitoring	80
Pilinevich L.P., Tumilovich M.V., Rumyantsev D.M., Grib K.V., Bunas A.G. Cleaning of Indoor Air from Highly Dispersed Particles and Aerosols.....	88
Shcherbina N.V. Differential Diagnosis of the Ability to Develop the Skill of Relaxation in the Drivers of Locomotive Crews.....	96



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2022-20-4-5-13>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.391.83:681.5

РАСШИРЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ МОДЕЛИРОВАНИЯ СИГНАЛОВ СИСТЕМ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

В.А. ИЛЬИНКОВ, Ю.С. МОЙСИЕВИЧ

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

Поступила в редакцию 29 ноября 2021

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2022

Аннотация. На основе предложенной библиотеки вспомогательных функций разработана специальная процедура формирования отсчетных значений множества сигналов систем телекоммуникаций и радиоэлектроники (СТР), которая обеспечивает простоту и удобство применения, существенно расширяет возможности моделирования сигналов. Построена операторная модель реакции произвольной линейной системы на составной трапецеидальный (периодический, непериодический финитный) сигнал. Построена математическая модель (во временной области) реакции линейной системы на множество сигналов СТР, отличающихся по форме, времени существования и способу задания. Разработан единый алгоритм математического моделирования линейных искажений сигналов СТР. В соответствии с последним разработана удобная для использования программа математического моделирования множества сигналов СТР во временной области, представляющая исследуемую реакцию в графическом (с возможностью масштабирования по осям), табличном и файловом видах.

Ключевые слова: сигнал, звено, реакция, моделирование, комплексная плоскость, временная область.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Ильинков В.А., Мойсевич Ю.С. Расширение возможностей моделирования сигналов систем телекоммуникаций и радиоэлектроники. Доклады БГУИР. 2022; 20(4): 5-13.

EXPANDING THE POSSIBILITIES OF MODELING SIGNALS OF TELECOMMUNICATIONS AND RADIOELECTRONICS SYSTEMS

VALERI A. ILYINKOV, YURY S. MAISIYEVICH

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

Submitted 29 November 2021

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2022

Abstract. The special procedure for the formation of reference values for a set of signals from telecommunication and radioelectronic systems (STR) has been developed based of the proposed library of auxiliary functions, which provides simplicity, ease of use and significantly expands the possibilities of signal modeling. An operator model of the response of an arbitrary linear system to a composite trapezoidal (periodic, non-periodic finite) signal is constructed. The mathematical model (in the time domain) of the linear system reaction to a set of the STR signals has been built, varying in form, time of existence, and method of assignment. The unified algorithm for mathematical modeling of linear distortions of the STR signals has been developed. In accordance with the latter, an ease of use of the program for mathematical modeling of the STR signal set in the time domain has been developed, representing the investigated reaction in graphical (with the ability to scale along the axes), tabular, and file forms.

Keywords: signal, link, response, modeling, complex plane, time domain.

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

For citation. Ilyinkov V.A., Maisiyevich Y.S. Expanding the Possibilities of Modeling Signals of Telecommunications and Radioelectronics Systems. Doklady BGUIR. 2022; 20(4): 5-13.

Введение

Стремительное развитие систем телекоммуникаций и радиоэлектроники (СТР) предполагает математическое моделирование (ММ) в качестве основного метода проектирования. ММ интенсифицирует анализ и синтез, решает задачи, невыполнимые (часто) другими методами, многократно снижает затраты по созданию сложных систем при одновременном повышении их качества. При этом различают структурно- и схемотехническое ММ, выполняемое на уровнях структурной и принципиальной схем [1–7].

Важный компонент структурно-технического моделирования – ММ линейных искажений. На его основе разрабатывают обоснованные требования к частотным и временным характеристикам отдельных функциональных блоков и системы в целом. С учетом многообразия СТР при ММ линейных искажений применяют множество различных по форме (гармонические, импульсные; униполярные, биполярные; простые, составные), времени существования (периодические; непериодические финитные; непериодические бесконечно протяженные) и способам задания (аналитический; табличный; из файла) континуальных детерминированных сигналов [8–11]. Это приводит к необходимости использования разных методов и программ ММ, что дополнительно усложняет процедуру моделирования и весьма неудобно на практике.

Цель работы – разработка удобного для применения алгоритма ММ линейных искажений множества сигналов СТР, отличающихся по форме, времени существования и способу задания. Для решения задачи необходимо разработать: процедуру формирования отсчетных значений моделируемого сигнала; математические модели (на комплексной плоскости и во временной области) реакции произвольной линейной системы на составной трапецеидальный сигнал.

Процедура формирования отсчетных значений моделируемого сигнала

Суть процедуры состоит в формировании множества отсчетных значений

$$\varphi_n = \overline{\varphi(n\Delta t)} \quad (n = 0, N-1, N = T / \Delta t) \quad (1)$$

моделируемого сигнала и последующем сохранении их в одномерном массиве данных $D_n = \varphi_0, \varphi_1, \dots, \varphi_n, \varphi_{n+1}, \dots, \varphi_{N-1}$. Понятно, что содержание процедуры напрямую зависит от способа задания сигнала.

Процедура формирования при аналитическом способе задания. Сравнительный анализ показывает [8–11], что наиболее сложными для аналитического описания являются составные сигналы, отдельное подмножество которых составляют сигналы аналоговых и цифровых видов модуляции. С учетом изложенного моделируемый составной сигнал $\varphi(t)$ представляется линейной суперпозицией M сигналов, задаваемых сложными функциями

$$\varphi(t) = \sum_{m=1}^M \varphi_m^{III} \left[\varphi_{m1}^I(\varphi_{m1}^I(t)) + \varphi_{m2}^I(\varphi_{m2}^I(t)) + \varphi_{m3}^I(\varphi_{m3}^I(t)) \right], \quad (2)$$

где $\varphi_m^{III}(t)$ – функции третьего (высшего) уровня; $\varphi_{m1}^I(t)$, $\varphi_{m2}^I(t)$, $\varphi_{m3}^I(t)$ – функции второго уровня; $\varphi_{m1}^I(t)$, $\varphi_{m2}^I(t)$, $\varphi_{m3}^I(t)$ – функции первого (низшего) уровня.

Последующий анализ разновидностей используемых при ММ составных сигналов показывает, что все они аналитически описываются формой (2), если в качестве компонентов $\varphi_m^I(t) - \varphi_m^{III}(t)$ применять соответствующие элементы из предлагаемой библиотеки вспомогательных функций (табл. 1). Областью определения вспомогательных функций $f_i(t)$ ($i = \overline{1,15}$) является интервал $[t_{1i}, t_{2i}]$, причем $0 \leq t_{1i} < t_{2i} < T$. За пределами указанного интервала значения функций равны нулю.

Программная реализация процедуры предполагает, что пользователю представляется форма (2). Он задает необходимые значения параметров M (количество сигналов) и N (количество отсчетных значений, например $N = 1000$), выбирает из библиотеки соответствующую функцию $\varphi_{11}^I(t)$ и рассчитывает N отсчетных значений $\varphi_{11}^I(n\Delta t)$ ($n = \overline{0, N-1}$; $\Delta t = T / N$). Далее выбирается функция $\varphi_{11}^I(t)$ и рассчитываются значения $\varphi_{11}^I(n\Delta t)$, при этом в качестве аргумента функции $\varphi_{11}^I(t)$ используются значения $\varphi_{11}^I(n\Delta t)$ функции $\varphi_{11}^I(t)$. Аналогично выбираются и рассчитываются значения $\varphi_{12}^I(n\Delta t)$, $\varphi_{12}^I(n\Delta t)$, $\varphi_{13}^I(n\Delta t)$, $\varphi_{13}^I(n\Delta t)$. Далее выбирается функция $\varphi_1^{III}(t)$ и рассчитываются значения $\varphi_1^{III}(n\Delta t)$, являющиеся отсчетными значениями $\varphi_1(n\Delta t)$ сигнала $\varphi_1(t)$. Понятно, аргументом t функции $\varphi_1^{III}(t)$ в точке $t = n\Delta t$ выступает сумма значений $\varphi_{11}^I(n\Delta t)$, $\varphi_{12}^I(n\Delta t)$ и $\varphi_{13}^I(n\Delta t)$. По аналогичной схеме рассчитываются значения $\varphi_2(n\Delta t) - \varphi_M(n\Delta t)$ сигналов $\varphi_2(t) - \varphi_M(t)$. Суммированием значений $\varphi_1(n\Delta t) - \varphi_M(n\Delta t)$ образуется необходимая последовательность отсчетных значений воздействия $\varphi(t)$, сохраняемых в виде одномерного массива данных D_n .

Таблица 1. Библиотека вспомогательных функций
Table 1. Library of auxiliary functions

Вид вспомогательной функции Auxiliary function type	Вид вспомогательной функции Auxiliary function type
$f_1(t) = a_1 t^3 + a_2 t^2 + a_3 t + d + a_4 \sqrt{t} + a_5 \sqrt[3]{t}$	$f_{10}(t) = a \operatorname{ctg}(bt + c) + d$
$f_2(t) = at^{-1} + d$	$f_{11}(t) = a \arcsin(bt) + c$
$f_3(t) = ae^{ct} + d$	$f_{12}(t) = a \arccos(bt) + c$
$f_4(t) = a^{ct} + d$	$f_{13}(t) = a \operatorname{arctg}(bt) + c$
$f_5(t) = a \ln(bt + c) + d$	$f_{14}(t) = a \operatorname{arcctg}(bt) + c$
$f_6(t) = a \lg(bt + c) + d$	$f_{15}(t) = 0$
$f_7(t) = a \sin(bt + c) + d$	$f_{16}(t) = a \int_0^t f(t) dt \equiv a \frac{\Delta t}{2} \sum_{k=1}^N (f(k\Delta t) + f((k-1)\Delta t))$
$f_8(t) = a \cos(bt + c) + d$	
$f_9(t) = a \operatorname{tg}(bt + c) + d$	$f_{17}(t) = \emptyset$

Выбор функций I–III уровней выполняется из присутствующей в программе библиотеки вспомогательных функций $f_i(t)$ ($i = \overline{1,17}$), предлагаемой пользователю в виде табл. 1. Функции $f_1(t) - f_{15}(t)$ используются в качестве функций I–III уровней, функции $f_{16}(t)$, $f_{17}(t)$ – II–III уровней. Выбор требуемой вспомогательной функции $f_i(t)$ достигается активацией соответствующей строки табл. 1, при этом пользователю предоставляется форма, позволяющая ввести необходимый набор параметров.

Выбор элемента $f_{15}(t)$ библиотеки означает, что значения этой функции в точках $n = 0, N - 1$ принимаются равными нулю. Выбор элемента $f_{17}(t)$ (пустое множество), например,

в качестве функции $\varphi_{12}^I(t)$, означает, что значения $\varphi_{12}^I(n\Delta t)$ принимаются равными значениям соответствующей функции меньшего порядка (в данном случае $\varphi_{12}^I(n\Delta t) = \varphi_{12}^I(n\Delta t)$).

В качестве примера рассмотрим радиосигнал с частотой, изменяющейся по линейному закону [8, 9] (так называемый сигнал ЛЧМ), определяемый на интервале $[0, T)$ и описываемый выражением $\varphi(t) = U_m \cos\left(2\pi f_c t + \Phi_0 + 2\pi \int_0^t (\Delta f / T) t dt\right)$, где f_c – опорная частота; Δf – приращение частоты; Φ_0 – начальная фаза. Следуя предлагаемой процедуре, он представляется в виде (см. (2)) $\varphi(t) = \varphi_1^{III} \left[\varphi_{11}^I(\varphi_{11}^I(t)) + \varphi_{12}^I(\varphi_{12}^I(t)) + \varphi_{13}^I(\varphi_{13}^I(t)) \right]$, где $\varphi_{11}^I(t) = f_1(t)$, $\varphi_{11}^{II}(t) = f_{17}(t)$, $\varphi_{12}^I(t) = f_1(t)$, $\varphi_{12}^{II}(t) = f_{15}(t)$, $\varphi_{13}^I(t) = f_{16}(t)$, $\varphi_{13}^{II}(t) = f_{17}(t)$, $\varphi_1^{III}(t) = f_8(t)$. Очевидно, выбирая необходимое значение параметра M и соответствующие вспомогательные функции, можно задать в аналитическом виде любые составные сигналы, включая множество сигналов аналоговых и цифровых видов модуляции.

Процедура формирования при табличном способе задания. Программная реализация процедуры предусматривает, что пользователь задает число N отсчетных значений, после чего моделирующая программа предоставляет ему шаблон таблицы из N строк для ввода отсчетных значений. Пользователь вводит последовательность значений $\varphi_n = \varphi(n\Delta t)$, которые по выполнению операции «Ввод» образуют одномерный массив D_n .

Процедура формирования при способе задания из файла. При задании из файла для расширения возможностей моделирования и повышения удобства применения пользователю необходимо обеспечить возможность:

- использования файлов данных, содержащих одномерный массив $D_k = \xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k, \xi_{k+1}, \dots, \xi_K$ данных с любым количеством K отсчетных значений (в общем случае $K \neq N$; N – количество отсчетных значений формируемого массива $D_n = \varphi_0, \varphi_1, \dots, \varphi_n, \varphi_{n+1}, \dots, \varphi_{N-1}$);

- промежуточного образования из массива D_k усеченного массива $D_k^I = \xi_{K_1}, \xi_{K_1+1}, \dots, \xi_{K_2-1}, \xi_{K_2}$ ($1 \leq K_1 < K_2 \leq K$; $K_2 - K_1 \leq N - 1$);

- формирования требуемого массива D_n посредством дополнения (слева, справа) массива D_k^I необходимым количеством нулевых значений;

- изменения положения (сдвига) в массиве D_n элементов, соответствующих элементам массива D_k^I .

С учетом изложенного программная реализация процедуры предусматривает, что пользователь обращается к имеющемуся файлу данных, содержащему одномерный массив D_k с количеством членов K ($K \neq N$), и открывает его. Далее последовательно вводятся численные значения параметров N (количество элементов массива D_n), K_1 и K_2 (номера граничных элементов массива D_k , соответствующих массиву данных D_k^I) и N_1 (номер элемента массива D_n , соответствующего нижнему граничному элементу ξ_{K_1} массива D_k^I ; $N_1 \leq N - K_2 + K_1 - 1$). По выполнению операции «Ввод» осуществляется автоматическое формирование массива D_n , элементы φ_n которого по алгоритму

$$\varphi_n = \begin{cases} \xi_{n+K_1-N_1}, & N_1 \leq n \leq N_1 + K_2 - K_1 \\ 0, & 0 \leq n < N_1, N_1 + K_2 - K_1 < n \leq N - 1 \end{cases} \quad (3)$$

образуются из соответствующих элементов ξ_k массива D_k .

Варьируя значениями параметров K_1 , K_2 и N_1 , можно из имеющегося массива D_k данных «вырезать» требуемую часть и поместить ее (с необходимым сдвигом по положению) в состав образуемого массива D_n отсчетных значений φ_n .

Анализ полученных результатов позволяет заключить, что разработанная процедура обеспечивает формирование отсчетных значений множества сигналов СТР при аналитическом, табличном и файловом способах их задания, характеризуется простотой и удобством применения, существенно расширяет возможности моделирования сигналов.

Операторная математическая модель реакции линейной системы на составной трапецидальный сигнал

Для систематизации последующего изложения отметим, что известны различные системы классификации множества сигналов СТР [1, 8–11]. Наиболее общей является классификация по: способу задания на осях «амплитуда – время» (континуальные, дискретные, квантованные, цифровые); времени существования (периодические, непериодические финитные, непериодические бесконечно протяженные); согласованию с каналом (модулирующие, модулированные); форме (гармонические, импульсные; униполярные, биполярные; простые, составные). При этом к простым (составным) относят сигналы, описываемые одной (двумя и более) образующими аналитическими функциями $\varphi(t)$. При моделировании линейных искажений в качестве воздействий используют [1] простые непериодические финитные $\varphi_{0(1,2)T}(t)$, простые периодические $\varphi_{0(1,2)}(t)$ и простые бесконечно протяженные $\alpha_{0(1,2)}(t)$ сигналы (рис. 1, а).

Значения сигналов $\varphi_{0T}(t)$, $\varphi_{1(2)T}(t)$, $\alpha_0(t)$ и $\alpha_{1(2)}(t)$ на интервалах соответственно $[t_1, t_2)$, $[0, t_{1(2)})$, $[0, \infty)$ и $[t_{1(2)}, \infty)$ равны значениям образующей функции $\varphi(t)$, принимают нулевые значения за пределами указанных интервалов. Сигналы $\varphi_{0(1,2)}(t)$, определяемые на бесконечном интервале $(-\infty, \infty)$, образуются периодическим с периодом T повторением сигналов $\varphi_{0(1,2)T}(t)$. Линейную суперпозицию рассматриваемых сигналов применяют в качестве составных воздействий (сигналов).

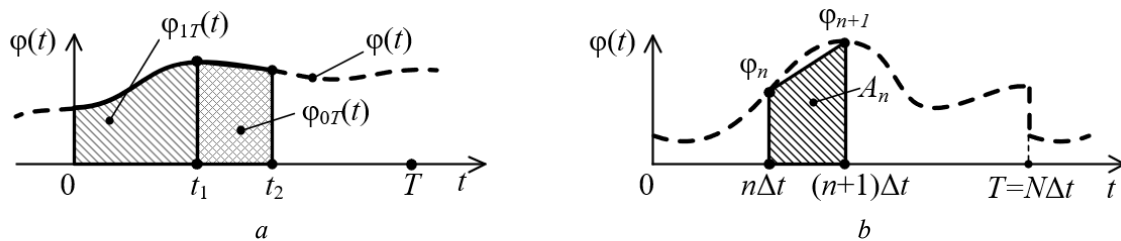


Рис. 1. Входные воздействия: а – простые непериодические; б – трапецидальный элемент
Fig. 1. Input actions: а – simple non-periodic; б – trapezoidal element

По выполнению процедуры задания воздействия образуется одномерный массив $D_n = \varphi_0, \varphi_1, \dots, \varphi_n, \varphi_{n+1}, \dots, \varphi_{N-1}$ отсчетных значений φ_n (1) входного сигнала. Используя эти значения, можно выполнить аппроксимацию моделируемого воздействия. Из известных методов аппроксимации [12] применительно к решаемой задаче при одновременном учете сложности и точности представления предпочтительна аппроксимация по способу трапеций, при которой воздействие на интервале $[0, T)$ представляется суммой трапецидальных элементов (простых сигналов):

$$\varphi_T(t) = \varphi(t) = \sum_{n=0}^{N-1} A_n^T(t), \quad (4)$$

где $A_n^T(t)$ – n -й трапецидальный элемент, соответствующий отсчетным значениям φ_n и φ_{n+1} массива D_n (рис. 1, b).

Оптимальным описанием образованного сигнала (4) является его задание на комплексной плоскости [13], при этом согласно известной теореме [14, 15] лапласовские изображения $\overline{\varphi_{0(1,2)T}(p)}$ простых сигналов $\varphi_{0(1,2)T}(t)$ представляются в виде

$$\overline{\varphi_{1(2)T}(p)} = S_{1(2)}(p)e^{-p^{t_1(2)}} - S_0(p), \quad \overline{\varphi_{0T}(p)} = S_2(p)e^{-p^{t_2}} - S_1(p)e^{-p^{t_1}}. \quad (5)$$

Учитывая изложенное, выполняя необходимые преобразования, принимая $t_2 = (n+1)\Delta t$ и $t_1 = n\Delta t$, применительно к элементу $A_n^T(t)$ получаем следующие представления функций $S_{2,n}(p)$, $S_{1,n}(p)$ и $S_{0,n}(p)$:

$$S_{0(1,2),n}(p) = (p + a_{0(1,2),n}) / (C_{0(1,2),n} p^2), \quad (6)$$

где $a_{0,n} = (\varphi_{n+1} - \varphi_n) / (\Delta t(\varphi_n - n(\varphi_{n+1} - \varphi_n)))$; $a_{1,n} = (\varphi_{n+1} - \varphi_n) / (\Delta t\varphi_n)$;
 $a_{2,n} = (\varphi_{n+1} - \varphi_n) / (\Delta t\varphi_{n+1})$; $C_{0,n} = (-1) / (\varphi_n - n(\varphi_{n+1} - \varphi_n))$; $C_{1,n} = (-1) / \varphi_n$;
 $C_{2,n} = (-1) / \varphi_{n+1}$.

Переходя (посредством суммирования) от изображения одиночного элемента к изображению всего сигнала, учитывая механизм образования изображений периодических сигналов [13], имеем изображение $\overline{\varphi}(p)$ составного периодического трапецидального сигнала:

$$\overline{\varphi}(p) = \sum_{n=0}^{N-1} (S_{2,n}(p)e^{-p^{t_2}} - S_{1,n}(p)e^{-p^{t_1}}) / (1 - e^{-p^T}). \quad (7)$$

Входное воздействие $\varphi(t)$ поступает на вход линейной системы (звена, канала), математическую модель которой целесообразно задавать на комплексной плоскости с помощью операторной передаточной функции $K_Z(p)$ специального вида [1]:

$$K_Z(p) = \frac{A_Z(p)}{C_Z B_Z(p)} = \frac{\prod_{x=1}^{NZ3} (p + a_{Z3x})^{nZ3x} \prod_{y=1}^{NZ4} (p^2 + 2a_{Z4y}p + a_{Z4y}^2 + \omega_{Z4y}^2)^{nZ4y}}{C_Z \prod_{s=1}^{NZ1} (p + a_{Z1s})^{nZ1s} \prod_{l=1}^{NZ2} (p^2 + 2a_{Z2l}p + a_{Z2l}^2 + \omega_{Z2l}^2)^{nZ2l}}, \quad (8)$$

где $C_Z \neq 0$ – масштабный действительный коэффициент; $(a_{Z1s}, a_{Z2l}, \omega_{Z2l}, \omega_{Z4y}) \in F_1$; $(a_{Z3x}, a_{Z4y}) \in F_2$; F_1 – множество положительных (не равных нулю) действительных чисел; F_2 – множество действительных чисел.

Модель (8) удовлетворяет условиям физической реализуемости и устойчивости, описывает (не)минимально-фазовые линейные системы с различными формами частотных характеристик, хорошо согласуется с используемым методом описания входного воздействия.

Располагая моделями воздействия $\overline{\varphi}(p)$ и системы $K_Z(p)$, окончательно имеем

$$\overline{\Psi}(p) = \overline{\varphi}(p)K_Z(p). \quad (9)$$

Выражение (9) (с учетом соотношений (7), (8)) представляет собой искомую операторную модель реакции $\Psi(t)$ произвольной линейной системы на составной трапецидальный периодический сигнал $\varphi(t)$.

Математическая модель реакции линейной системы на составной трапецеидальный сигнал во временной области

С физической точки зрения реакция $\Psi(t)$ является линейной суперпозицией $\Psi(t) = \sum_{n=0}^{N-1} \Psi_n(t)$ N реакций $\Psi_n(t)$, где $\Psi_n(t)$ – реакция на периодическую последовательность $A_n(t)$ соответствующих трапецеидальных элементов (см. рис. 1, *b*).

Поэтому для решения задачи вначале необходимо найти реакцию $\Psi_n(t)$ системы на периодический сигнал $A_n(t)$, после чего, выполняя суммирование реакций на периодические последовательности всех трапецеидальных элементов, перейти к искомой реакции $\Psi(t)$. Описанное наиболее целесообразно выполнить модифицированным операционным методом [14, 15], который, в отличие от классического операционного [13], представляет реакцию не тригонометрическим рядом Фурье (в незамкнутом виде), а конечным числом слагаемых (в замкнутом виде).

Последовательным выполнением необходимых преобразований (при $n_{Z1s} = n_{Z2l} = 1$) получена искомая математическая модель (10) реакции $\Psi(t)$ системы на периодическое воздействие $\varphi(t)$.

Модель (10) является точным аналитическим выражением реакции произвольной линейной системы на составной трапецеидальный периодический сигнал. Она представляет реакцию конечным числом слагаемых (в замкнутом виде), количество которых определяется лишь полюсами лапласовского изображения воздействия и операторной передаточной функции. Подобное представление минимизирует объем и время моделирования, исключает проблему оценки точности результата.

При значениях параметров $\delta \rightarrow 0$ и $T < \infty$ ($\delta = (t_2 - t_1) / T$ – относительная длительность сигнала (воздействия) $\varphi_T(t)$; T – период повторения) модель описывает реакцию на составной трапецеидальный непериодический сигнал (см. рис. 1, *a*), а при $\delta \rightarrow 1$ и $T \rightarrow \infty$ – на составной непериодический бесконечно протяженный сигнал. Это позволяет заключить, что с учетом разработанной процедуры формирования отсчетных значений модель (10) описывает реакцию во временной области произвольной линейной системы на множество сигналов СТР, отличающихся по форме, времени существования и способу задания.

$$\begin{aligned} \Psi_n = \Psi(n\Delta t) = & -R_{0Z0,n}^0 n\Delta t - R_{0Z0,n}^I + \sum_{s=1}^{N_{Z1}} \left[\left(M_{21s} R_{1Z1s,n}^0 - M_{11s} R_{2Z1s,n}^0 e^{a_{Z1s}\Delta t} \right) + \sum_{k=n+1}^{N-1} \left(M_{11s} \times \right. \right. \\ & \times \left. \left(R_{1Z1s,k}^0 e^{a_{Z1s}(k-n)\Delta t} - R_{2Z1s,k}^0 e^{a_{Z1s}(k-n+1)\Delta t} \right) \right) + \sum_{k=1}^n \left(M_{21s} \left(R_{1Z1s,n-k}^0 e^{-a_{Z1s}k\Delta t} - R_{2Z1s,n-k}^0 \times \right. \right. \\ & \times \left. \left. e^{-a_{Z1s}(k-1)\Delta t} \right) \right) + \sum_{l=1}^{N_{Z2}} \left[\left(\frac{R_{1Z2l,n}^0}{\omega_{Z2l}} \left(N_{22l} \sin \varphi_{1Z2l,n}^0 - M_{12l} \cos \varphi_{1Z2l,n}^0 \right) - \frac{R_{2Z2l,n}^0}{\omega_{Z2l}} e^{a_{Z2l}\Delta t} \times \right. \right. \\ & \times \left. \left(N_{12l} \sin \left(-\omega_{Z2l}\Delta t + \varphi_{2Z2l,n}^0 \right) - M_{12l} \cos \left(-\omega_{Z2l}\Delta t + \varphi_{2Z2l,n}^0 \right) \right) \right) + \sum_{k=n+1}^{N-1} \left(\frac{R_{1Z2l,k}^0}{\omega_{Z2l}} \times \right. \\ & \times \left. e^{a_{Z2l}(k-n)\Delta t} \left(N_{12l} \sin \left(\omega_{Z2l}(n-k)\Delta t + \varphi_{1Z2l,k}^0 \right) - M_{12l} \cos \left(\omega_{Z2l}(n-k)\Delta t + \varphi_{1Z2l,k}^0 \right) \right) - \right. \\ & - \left. \frac{R_{2Z2l,k}^0}{\omega_{Z2l}} e^{a_{Z2l}(k-n+1)\Delta t} \left(N_{12l} \sin \left(\omega_{Z2l}(n-k-1)\Delta t + \varphi_{2Z2l,k}^0 \right) - M_{12l} \cos \left(\omega_{Z2l}(n-k-1) \times \right. \right. \\ & \times \left. \left. \Delta t + \varphi_{2Z2l,k}^0 \right) \right) \right) + \sum_{k=1}^n \left(\frac{R_{1Z2l,n-k}^0}{\omega_{Z2l}} e^{-a_{Z2l}k\Delta t} \left(N_{22l} \sin \left(\omega_{Z2l}k\Delta t + \varphi_{1Z2l,n-k}^0 \right) - M_{12l} \times \right. \right. \\ & \cos \left(\omega_{Z2l}k\Delta t + \varphi_{1Z2l,n-k}^0 \right) \right) - \frac{R_{2Z2l,n-k}^0}{\omega_{Z2l}} e^{-a_{Z2l}(k-1)\Delta t} \times \left(N_{22l} \sin \left(\omega_{Z2l}(k-1)\Delta t + \varphi_{2Z2l,n-k}^0 \right) - \right. \\ & \left. - M_{12l} \cos \left(\omega_{Z2l}(k-1)\Delta t + \varphi_{2Z2l,n-k}^0 \right) \right) \left. \right] \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned}
 &\text{где } R_{1(2)Z_{1s}.n}^0 = R_{1(2)Z.n}(p) \cdot (p + a_{Z_{1s}}) \Big|_{p=-a_{Z_{1s}}}; R_{0Z_{0.n}}^0 = R_{0Z.n}(p) \cdot p^2 \Big|_{p=0}; R_{0Z_{0.n}}^I = (R_{0Z.n}(p) \times \\
 &\times p^2)' \Big|_{p=0}; R_{1(2)Z_{2l}.n}^0 e^{j\varphi_{1(2)Z_{2l}.n}^0} = R_{1(2)Z.n}(p) \cdot (p^2 + 2a_{Z_{2l}}p + a_{Z_{2l}}^2 + \omega_{Z_{2l}}^2) \Big|_{p=-a_{Z_{2l}} + j\omega_{Z_{2l}}}; \\
 &R_{0(1,2)Z.n}(p) = S_{0(1,2).n}(p)K_Z(p); M_{11s} = (1 - e^{a_{Z_{1s}}T})^{-1}; M_{21s} = (e^{-a_{Z_{1s}}T} - 1)^{-1}; \\
 &M_{12l} = e^{a_{Z_{2l}}T} \sin(\omega_{Z_{2l}}T) / P_{2l}; N_{12l} = (1 - e^{a_{Z_{2l}}T} \cos(\omega_{Z_{2l}}T)) / P_{2l}; \\
 &N_{22l} = (e^{a_{Z_{2l}}T} \cos(\omega_{Z_{2l}}T) - e^{2a_{Z_{2l}}T}) / P_{2l}; P_{2l} = e^{2a_{Z_{2l}}T} - 2e^{a_{Z_{2l}}T} \cos(\omega_{Z_{2l}}T) + 1.
 \end{aligned} \tag{11}$$

Используя полученные результаты, разработан единый алгоритм ММ линейных искажений множества сигналов СТР. Он состоит из следующих этапов.

1. *Задание входного воздействия.* Выбирается вид входного сигнала (воздействия) и способ его задания. По разработанной процедуре формируется одномерный массив $D_n = \varphi_0, \varphi_1, \dots, \varphi_n, \varphi_{n+1}, \dots, \varphi_{N-1}$ отсчетных значений $\varphi_n = \varphi(n\Delta t)$ ($n = 0, N-1, N = T / \Delta t$).

2. *Задание модели линейной системы.* Свойства моделируемой линейной системы задаются введением необходимых численных значений параметров операторной передаточной функции $K_Z(p)$ (8).

3. *Вычисление реакции.* Для минимизации объема вычислений предварительно, согласно выражений (11), формируются и заносятся в оперативную память (не зависящие от времени) одномерные массивы значений параметров $R_{1(2)Z_{1s}.n}^0$, двумерные массивы значений параметров $R_{1(2)Z_{2l}.n}^0$ и $\varphi_{1(2)Z_{2l}.n}^0$. Используя соответствующие элементы последних, по модели (10) рассчитывается одномерный массив $G_n = \Psi_0, \Psi_1, \dots, \Psi_n, \Psi_{n+1}, \dots, \Psi_{N-1}$ отсчетных значений $\Psi_n(n\Delta t)$ реакции $\Psi(t)$.

В соответствии с предлагаемым алгоритмом разработана удобная для применения программа моделирования множества сигналов СТР, представляющая исследуемую реакцию в графическом (с возможностью масштабирования по осям), табличном и файловом видах.

Заключение

1. Разработана простая и удобная для применения процедура формирования отсчетных значений множества сигналов СТР при различных способах их задания.

2. Построена операторная модель реакции произвольной линейной системы на составной трапецидальный периодический сигнал.

3. Построена математическая модель реакции произвольной линейной системы на множество сигналов СТР, отличающихся по форме, времени существования и способу задания.

4. Разработан единый алгоритм математического моделирования линейных искажений множества сигналов СТР.

Список литературы

1. Беленкевич Н.И., Ильинков В.А. Совместное описание сигналов, линейных звеньев и реакций систем телекоммуникаций и радиоэлектроники. *Вест. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук.* 2017;4:93-104.
2. Трухин М.П. *Основы компьютерного проектирования и моделирования радиоэлектронных средств.* Москва: Горячая линия–Телеком; 2015.
3. Васильев К.К. *Математическое моделирование систем связи.* Ульяновск: УлГТУ; 2010.
4. Голяницкий И. А. *Математические модели и методы в радиосвязи.* Москва: Эко-Трендз; 2005.
5. Загидуллин Р.Ш. *SystemView. Системотехническое моделирование устройств обработки сигналов.* Москва: Горячая линия–Телеком; 2005.
6. Шестеркин А.Н. *Система моделирования и исследования радиоэлектронных устройств Multisim 10.* Москва: ДМК Пресс; 2012.
7. Болотовский Ю.И. *OrCAD 9.x. OrCAD 10.x. Практика моделирования.* Москва: СОЛОН-Пресс; 2008.
8. Гоноровский И.С. *Радиотехнические цепи и сигналы.* Москва: Дрофа; 2006.

9. Баскаков С.И. *Радиотехнические цепи и сигналы*. Москва: Ленанд; 2016.
10. Скляр Б. *Цифровая связь*. Москва: Издат. дом «Вильямс»; 2003.
11. Проakis Дж. *Цифровая связь*. М.: Радио и связь; 2000.
12. Бахвалов Н.С. *Численные методы*. Москва: БИНОМ. Лаборатория знаний; 2008.
13. Лаврентьев М.А. *Методы теории функций комплексного переменного*. СПб.: Лань; 2002.
14. Ильинков В.А. Метод расчета реакции линейной системы на периодическое воздействие. *Радиотехника*. 1990;10:14-16.
15. Ильинков В.А. Метод расчета реакции линейной системы на периодическое и непериодическое воздействие. *Вестник БГУ. Сер. 1: Физика, математика, информатика*. 1999;3:33-38.

References

1. Belenkevich N.I., Ilyinkov V.A. [The compatible mathematical description of signals, linear links and responses of telecommunications and radioelectronics systems]. *Vestsi Natsyyanal' nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*. 2017;4:93-104. (In Russ.)
2. Truhin M.P. [Fundamentals of computer development and simulation of radioelectronic facilities]. Moscow: Goryachaya liniya–Telekom Publ.; 2015. (In Russ.)
3. Vasil'ev K.K. [Mathematical modeling of communications systems]. Ulyanovsk: UISTU Publ.; 2010. (in Russ.)
4. Golyanickij I.A. [Mathematical models and methods in radio communication]. Moscow: Eko-Trendz Publ.; 2005. (In Russ.)
5. Zagidullin R. Sh. [System modeling of signal data processor]. Moscow: Goryachaya liniya–Telecom Publ.; 2005.
6. Shesterkin A.N. [Multisim 10 is a system of modeling and research into radio electronic devices]. Moscow: DMK Press Publ.; 2012. (In Russ.)
7. Bolotovskij Yu.I. [OrCAD 9.x. OrCAD 10.x. Simulations practice]. Moscow: Solon PRESS Publ.; 2008. (In Russ.)
8. Gonorovskij I.S. [Radio technical circuits and signals]. Moscow: Drofa Publ.; 2006. (In Russ.)
9. Baskakov S.I. [Radio technical circuits and signals]. Moscow: Lenand Publ.; 2016. (In Russ.)
10. Sklar B. [Digital Communications: Fundamentals and Applications]. Moscow: Izdat. dom «Williams» Publ.; 2003. (In Russ.)
11. Proakis J. [Digital communications]. Moscow: Radio i svyaz Publ.; 2000. (In Russ.)
12. Bakhvalov N.S. [Numerical methods]. Moscow: BINOM. Labolatoria znanii Publ.; 2008. (In Russ.)
13. Lavrent'ev M.A. [Methods of the theory of functions of a complex variable]. Saint Petersburg: Lan' Publ.; 2002.
14. Ilyinkov V.A. [A method of the computation of a linear system's response to a periodic action]. *Radiotekhnika = Radio Engineering*. 1990;10:14-16 (In Russ.)
15. Ilyinkov V.A., Ilyinkova N.I. [A method of the computation of a linear system's response to periodic and non-periodic actions]. *Vestnik BGU. Seriya 1: Fizika, matematika, informatika = Vestnik BSU. Series 1: Physics. Mathematics. Informatics*. 1999;3:33-38 (in Russ.)

Вклад авторов / Authors' contribution

Все авторы внесли равный вклад в написание статьи / All authors contributed equally to the writing of the article.

Сведения об авторах

Ильинков В.А., к.т.н., доцент, доцент кафедры инфокоммуникационных технологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Мойсевич Ю.С., аспирант кафедры инфокоммуникационных технологий 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. +375-33-648-05-69;
e-mail: jura96m@mail.ru
Мойсевич Юрий Сергеевич

Information about the authors

Ilyinkov V.A., Cand. Of Sci., Associate Professor, Associate Professor at the Department of Infocommunication Technologies of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Maisiyevich Y.S., Postgraduate at the Department of Infocommunication Technologies of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka St., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics;
tel. +375-33-648-05-69;
e-mail: jura96m@mail.ru
Maisiyevich Yury Sergeevich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2022-20-4-14-20>

Оригинальная статья / Original paper

УДК 004.383:621.391

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫХ ШУМОВ НА РЕЗУЛЬТАТЫ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ

А.В. ШАРАМЕТ

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

*ОАО "КБ Радар" - управляющая компания холдинга "Системы радиолокации"
(г. Минск, Республика Беларусь)*

Поступила в редакцию 18 января 2022

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2022

Аннотация. Достижение более высокого качества обработки сигнала происходит в том числе за счет усложнения алгоритмов его обработки, т. е. увеличения объема вычислений. Данная обработка должна быть осуществлена в реальном масштабе времени. Одним из направлений преодоления данной проблемы является разбиение сложного алгоритма на несколько более простых частей, которые должны быть параллельно выполнены и потом объединены. Для этого используются цифровые вычислительные платформы, которые строятся на основе различных дискретных элементов, таких как программируемые логические интегральные схемы, микроконтроллеры или многоядерные цифровые сигнальные процессоры. По результатам проведенных исследований получено математическое выражение, которое показывает, что конечное отношение сигнал/шум существенно зависит от частоты обработки. Данное отношение также зависит от элементной базы, на основе которой реализованы алгоритмы цифровой обработки. На примере характеристик отдельных микросхем показано, что применение одних типов микросхем в ряде случаев предпочтительней потому, что позволяет реализовать данную обработку в более широком диапазоне тактовых частот.

Ключевые слова: реальный масштаб времени, многопоточность, вычислительная платформа, тактовая частота обработки, отношение сигнал/шум, фазовый шум.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Шарамет А.В. Анализ влияния программно-аппаратных шумов на результаты цифровой обработки сигналов. Доклады БГУИР. 2022; 20(4): 14-20.

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF SOFTWARE AND HARDWARE NOISE ON THE RESULTS OF DIGITAL SIGNAL PROCESSING

ANDREI V. SHARAMET

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

Submitted 18 January 2022

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2022

Abstract. The achievement of a higher quality signal processing occurs, among other things, due to the complication of its processing algorithms, i. e., an increase in the amount of calculations. This processing must be carried out in real time. One of the ways to overcome this problem is to split a complex algorithm into several simpler parts that must be executed in parallel and then combined. For this purpose, digital computing platforms are used, which are built on the basis of various discrete elements, such as programmable logic integrated circuits, microcontrollers or multi-core digital signal processors. Based on the results of the research, a mathematical expression was obtained that shows that the final signal-to-noise ratio significantly depends on the processing frequency. This ratio also depends on the element base on the basis of which digital processing algorithms are implemented. Using the characteristics of individual chips as an example, it is shown that the use of certain chip types is preferable in some cases because it allows the processing to be implemented in a wider clock frequency range.

Keywords: real-time scale, multithreading, computing platform, processing clock frequency, signal-to-noise ratio, phase noise.

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

For citation. Sharamet A.V. Analysis of the Influence of Software and Hardware Noise on the Results of Digital Signal Processing. Doklady BGUIR. 2022; 20(4): 14-20.

Введение

В процессе реализации сложных алгоритмов цифровой обработки сигнала всегда необходимо принимать стратегическое решение по составу элементной базы, на основе которой данные алгоритмы будут реализованы. В настоящее время наибольшее распространение получили вычислительные платформы, которые построены на основе программируемых логических интегральных схем (ПЛИС), микроконтроллеров (МК) или многоядерных цифровых сигнальных процессоров (ЦСП).

Для достижения высокого качества и скорости обработки разработано большое количество алгоритмов, в основе которых лежит не только оценка параметров сигнала в текущий момент времени, но и обработка с учетом ранее полученной информации (междупериодная и межобзорная). Необходимость реализации данных алгоритмов в реальном масштабе времени вполне закономерно приводит к распараллеливанию алгоритмов цифровой обработки, а также, ввиду различности требуемого объема вычисления, к многоскоростной обработке. Таким образом, синхронное решение задач хранения, обработки и передачи обработанной цифровой копии аналогового сигнала на всех этапах обработки на практике реализовать не всегда представляется возможным. Это вызвано тем, что в процессе синхронизации возникает программно-аппаратный шум, который накапливается от элемента к элементу. Особо остро данная проблема проявляется при проектировании устройств, в составе которых имеются задающие генераторы [1], системы фазовой автоподстройки частоты [2], синтезаторы частот [3] и скоростные интерфейсы. Дополнительным источником возникновения данного шума могут стать алгоритмы, в основе которых лежат передискретизация сигнала и ограниченность разрядной сетки. Все это приводит не только к снижению скорости обмена данными, точности вычислений, но в ряде случаев и к потере целостности данных.

Постановка задачи

Несмотря на существенные различия в принципах разработки программного обеспечения при реализации цифровых алгоритмов на базе ПЛИС, МК и ЦСП, они обладают общими свойствами:

- наличие возможности разделения потока информации для параллельной его обработки;
- наличие проблемы обеспечения синхронности при объединении отдельных потоков информации;
- непрерывно изменяющийся во времени аналоговый сигнал представляется в виде фиксированного количества разрядов, что в большей степени присуще ПЛИС, а в ряде случаев и отдельным алгоритмам на базе МК и ЦСП;
- значения отсчетов определены только в дискретный момент времени, которые имеют случайную составляющую.

Своевременность вычислений обеспечивается с помощью синхронных импульсов (СИ). При этом результаты промежуточных вычислений хранятся в регистрах, которые запоминают их на определенное время. Для ПЛИС таким элементом являются регистры, для МК – потоки, для ЦСП – ядра.

На основе разработанного программного кода синтезатор создает проект в ПЛИС, физически соединяя дискретные элементы. Алгоритм обработки реализуется по общей схеме, которая включает в себя работающие синхронно и, как правило, от одного источника входной и выходной регистры, а также набор дискретных логических элементов. На основе дискретных элементов логики несинхронно реализуется алгоритм обработки (рис. 1, а). При увеличении скорости обработки или сложности проекта целостность данных внутри ПЛИС будет нарушена. Одним из основных подходов для решения данной проблемы является снижение тактовой частоты, что не всегда допустимо по условиям технического задания. Другим подходом является разбиение сложной конструкции программы на несколько простых с добавлением в состав каждой части синхронных регистров (количество которых ограничено). При таком подходе увеличивается тактовая частота, но вырастет задержка выполнения.

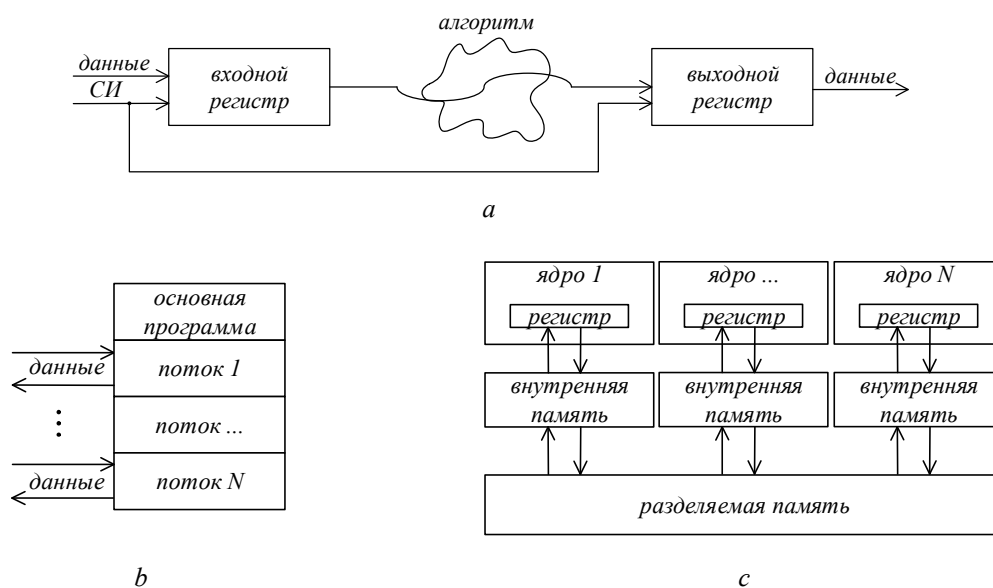


Рис. 1. Принципы организации параллельной обработки информации на базе: *a* – ПЛИС; *b* – МК; *c* – ЦСП
Fig. 1. Principles of organization of parallel processing of information based on: *a* – FPGA; *b* – CPU; *c* – DSP

При увеличении сложности алгоритма, реализуемого на базе МК, часто возникает задача, для решения которой необходимо одновременно выполнять несколько действий, некоторые из которых не связаны друг с другом, а другие, наоборот, являются частями одного алгоритма. Тогда возникает необходимость в использовании операционной системы, на базе которой можно реализовать многопоточное приложение (рис. 1, *b*). При этом необходимо учитывать, что даже при использовании операционной системы с вытеснением (выделяемое время на выполнение каждой задачи распределено равномерно) часто дополнительно используются приоритеты и таймеры. Кроме того, обмен с внешними потребителями информации может выполняться как по синхронным, так и асинхронным запросам. Все это приводит к тому, что время, затраченное на выполнение алгоритма в разные моменты времени, может существенно отличаться.

В случае использования ЦСП в составе вычислительной платформы алгоритмы реализуются на базе нескольких ядер (рис. 1, *c*), которые объединены единым разделяемым адресным пространством. Каждое ядро фактически представляет собой МК. Разделяемая память используется для обмена данными между ядрами после их обработки или передачи внешним потребителям с использованием высокоскоростных аппаратных схем.

Независимо от выбора элементной базы, которая является основой любой вычислительной платформы, необходимо определить потенциально достижимое отношение сигнал/шум и максимально возможную частоту обработки, которые могут быть достигнуты.

Решение задачи

Представление непрерывного сигнала в виде дискретного набора его значений в определенные моменты времени, которые не могут быть стабильными [4], приводит к возникновению фазовой модуляции сигнала. В общем виде фазовый шум ω_{Δ} оказывает более существенное влияние на параметры системы, чем амплитудная нестабильность x_{Δ} . При этом его величина существенно меньше ширины спектра сигнала $\Delta\omega$ и его несущей частоты ω_0 , т. е. выполняется условие $\omega_{\Delta} = \Delta\omega = \omega_0$. В общем виде фаза сигнала может быть описана в виде [3]: $\varphi_{\Delta}(t) = x_{\Delta} \sin(\omega_{\Delta} t)$. (1)

Тогда гармонический сигнал, подлежащий оцифровке с учетом программно-аппаратных шумов, может быть представлен в виде

$$x(t) = x_0 \cos(\omega_0 t + x_{\Delta} \sin(\omega_{\Delta} t)) = x_0 \cos(\omega_0 t) \cos(x_{\Delta} \sin(\omega_{\Delta} t)) - x_0 \sin(\omega_0 t) \sin(x_{\Delta} \sin(\omega_{\Delta} t)). \quad (2)$$

Ввиду того, что выражение (1) очень мало с учетом того, что $\cos(x_{\Delta} \sin(\omega_{\Delta} t)) \gg 1$ и $\sin(x_{\Delta} \sin(\omega_{\Delta} t)) \gg x_{\Delta} \sin(\omega_{\Delta} t)$, выражение (2) можно привести к виду

$$x(t) = x_0 \cos(\omega_0 t) - x_0 \sin(\omega_0 t) x_{\Delta} \sin(\omega_{\Delta} t) = x_0 \cos(\omega_0 t) - \frac{x_0 x_{\Delta}}{2} \cos(\omega_0 t - \omega_{\Delta} t) + \frac{x_0 x_{\Delta}}{2} \cos(\omega_0 t + \omega_{\Delta} t). \quad (3)$$

Анализ выражения (3) показывает, что амплитуда боковых составляющих (второй и третий член выражения) зависит от величины фазового шума и амплитуды гармонического сигнала [5]. Отношение мощности одной из боковых составляющих к мощности сигнала на несущей частоте составляет

$$s(f) = \frac{|x_{+v}|^2}{|x_0|^2} = \frac{x_{\Delta}^2}{4}. \quad (4)$$

В соответствии с выражением (3) гармонический сигнал после его дискретизации представляет собой сумму постоянной составляющей на частоте ω_0 и симметрично расположенных относительно него боковых составляющих (смещенных на величину фазового шума ω_{Δ}), при этом мощность боковых составляющих меньше на $10 \log_{10} U_{\Delta}^2/4$ постоянной.

Анализ графика (рис. 2) показывает, что фазовый шум с учетом его случайности приводит к появлению дополнительных боковых составляющих и, как следствие, к расширению спектра сигнала, что может быть использовано в качестве основы для оценки потенциально достижимого отношения сигнал/шум в условиях наличия фазового шума.

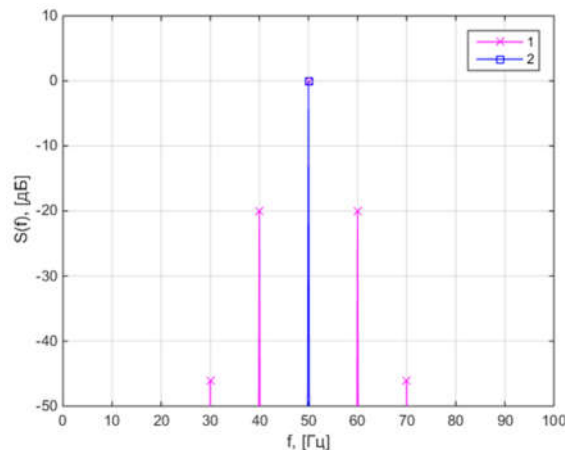


Рис. 2. Спектр сигнала в результате воздействия фазового шума: 1 – модулированный; 2 – немодулированный
Fig. 2. Signal spectrum as a result of exposure to phase noise: 1 – modulated; 2 – unmodulated

Примем, что на вход аналого-цифрового преобразователя поступило гармоническое колебание вида $x(t) = x_0 \sin(2\pi f_0 t)$. Для данного сигнала видно, что величина ошибки квантования dx зависит от амплитуды фазового шума dt . Анализ данного рисунка показывает, что величина ошибки квантования зависит от формы сигнала и, соответственно, она максимальна в те моменты времени, когда производная в этот момент максимальна:

$$\frac{dx}{dt} = x'(t). \quad (5)$$

Из данного выражения следует, что dx – это и есть непосредственно величина фазового шума, которая может быть представлена в следующем виде:

$$x_{noise}(t) = x'(t)dt = x_0 2\pi f_0 dt \cos(2\pi f_0 t). \quad (6)$$

Тогда отношение мощности сигнала к мощности фазового шума с учетом принятого допущения и выражения (6) в дискретные моменты времени Δt имеет вид

$$SNR_{noise} = 20 \lg \left[\frac{x_0^2 / 2}{(x_0 2\pi f_0 \Delta t)^2 / 2} \right] = 20 \lg \left[\frac{1}{(2\pi f_0 \Delta t)^2} \right] = -20 \lg (2\pi f_0 \Delta t)^2. \quad (7)$$

Анализ выражения (7) показывает, что с ростом частоты входного сигнала величина SNR_{noise} уменьшается.

В процессе формирования цифровой копии аналогового сигнала (рис. 1, *b*) максимально возможная амплитуда входного напряжения, которая не приводит к переполнению, определяется выражением

$$x_0 = \frac{q 2^n}{2}, \quad (8)$$

где q – цена младшего разряда; n – количество разрядов.

Исходя из этого, среднеквадратичное значение входного сигнала

$$\sigma_x = \frac{x_0}{\sqrt{2}} = \frac{q 2^n}{2\sqrt{2}}. \quad (9)$$

Ввиду того, что ошибки квантования имеют пилообразный закон распределения (рис. 1, *b*), среднее значение шума составляет

$$\sigma_{quant}(t) = \frac{q}{2\sqrt{3}}. \quad (10)$$

Тогда отношение мощности входного сигнала к мощности ошибки квантования в соответствии с выражениями (9), (10) имеет вид

$$SNR_{quant} = 20 \lg \left[\frac{q 2^n / 2\sqrt{2}}{q / 2\sqrt{3}} \right] = 20 \lg 2^n + 20 \lg \sqrt{3/2} = 6,02 n + 1,76. \quad (11)$$

Анализ выражения (11) показывает, что с ростом количества разрядов АЦП величина SNR_{quant} увеличивается.

Суммарное значение SNR_{Σ} определяется ошибками квантования и величиной фазового шума:

$$SNR_{\Sigma} = SNR_{quant} + SNR_{noise}. \quad (12)$$

При объединении отдельных цифровых элементов каждый последующий элемент за счет конечности времени распространения сигнала вносит свой вклад в результирующий SNR_{Σ} вычислительной платформы, т. е. происходит накопление фазового шума. Справедливости ради необходимо отметить, что в ряде случаев накопление происходит с отрицательным знаком, т. е. фактически происходит вычитание. При разработке систем целесообразно ориентироваться на наихудший случай. Данный эффект зависит от многих

факторов, в том числе и от характеристик конкретных элементов, которые используются в основе вычислительной платформы. В табл. 1 представлены типичные значения величины амплитуды фазового шума микросхем различного типа и назначения [6].

Таблица 1. Значение фазового шума микросхем
Table 1. The value of the phase noise of the microchips

Тип микросхемы Chip type	Величина джиттера, ps Jitter value, ps
FPGA (для встроенных элементов DLL и PLL)	33 ... 50
74LS00	4,94
74НСТ00	2,20
74АСТ00 (CMOS)	0,99
МС100ЕL16 (PECL)	0,70
AD9510	0,22
NBSG16 (ECL)	0,20

С практической точки зрения интерес представляет анализ совместного влияния ошибок квантования и фазового шума, которые в соответствии с выражением (12) для различного типа микросхем представлены на рис. 3.

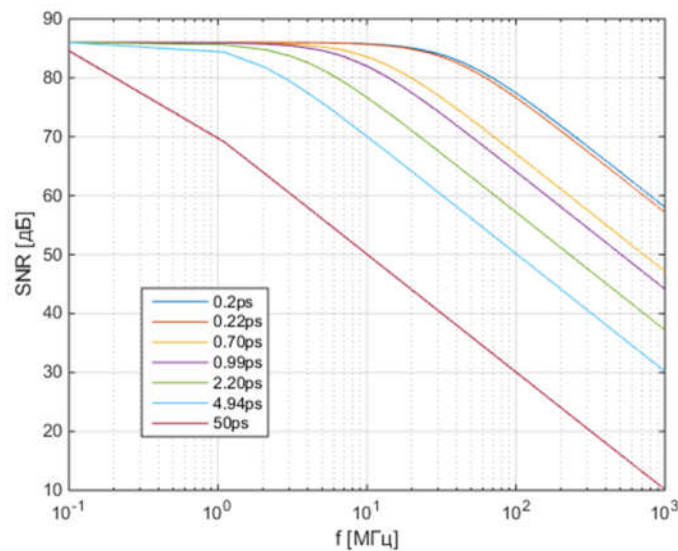


Рис. 3. Результирующее значение SNR_{Σ} (действительных 14 разрядов)

Fig. 3. The resulting value SNR_{Σ} (valid 14 digits)

Анализ рис. 3 показывает, что в процессе цифровой обработки сигнала на малых тактовых частотах доминируют ошибки квантования SNR_{quant} , которые ограничивают динамический диапазон элемента, а при реализации алгоритмов на большой тактовой частоте доминируют ошибки, вызванные фазовыми шумами SNR_{noise} .

Заключение

Поведенный анализ показывает, что воздействие программно-аппаратных шумов способно оказывать существенное влияние на результирующее значение отношения сигнал/шум. По результатам проведенного анализа можно сделать следующие выводы:

- при увеличении частоты обработки ПЛИС результирующее отношение сигнал/шум начинает резко уменьшаться, что говорит о необходимости использования нескольких ПЛИС при необходимости реализации сложных алгоритмов в широком диапазоне тактовых частот. Пренебрежение данным требованием может привести к локальному резко изменяющемуся коэффициенту передачи, что в замкнутых системах (например, адаптивных) приводит к потере устойчивости системы в целом;

- микросхемы, разработанные по технологии PECL (ECL) и CMOS, обладают наилучшими характеристиками, что предопределяет их использование для применения в наиболее ответственных узлах (например, ФАПЧ);
- получено математически обоснованное выражение, которое показывает, что величина отношения сигнал/шум, полученная по результатам цифровой обработки, определяется не только количеством разрядов, участвовавших в вычислениях, но и существенно зависит от выбранной элементной базой вычислительной платформы и тактовой частоты.

Список литературы

1. Drakhlis B. *Calculate Oscillator Jitter by Using Phase Noise Analysis*. Microwaves & RF; Jan/Feb 2001.
2. Kundert K. *Modeling and Simulation of Jitter in Phase-Locked Loops*. Boston: Springer; 1997.
3. Лайонс Р. *Цифровая обработка сигналов*. Москва: ООО Бинум-пресс; 2013.
4. Srinivasan, Venkatesh *Timing Jitter in Symmetric Load Ring Oscillators and the Estimation of Aperture Uncertainty in A-D Converters*. Master's Thesis, University of Tennessee; 2002.
5. Venkatesh S., Syed K. Islam, Gary T. Hendrickson A. *Method for the Estimation of Aperture Uncertainty in A-D Converters*. in Proc. *2002 IEEE International Symposium on Circuits and Systems, May 2002*: III-125–III-128.
6. Brannon B., Barlow A. *Aperture. Uncertainty and ADC System Performance (AN-501)*. *Analog Devices*; 2006.

References

1. Drakhlis B. *Calculate Oscillator Jitter by Using Phase Noise Analysis*. Microwaves & RF; Jan/Feb 2001.
2. Kundert K. *Modeling and Simulation of Jitter in Phase-Locked Loops*. Boston: Springer; 1997.
3. Laions R. [*Cifrovaya obrabotka signalov*]. Moskov: ООО Binom-press; 2013. (in Russ.)
4. Venkatesh S. *Timing Jitter in Symmetric Load Ring Oscillators and the Estimation of Aperture Uncertainty in A-D Converters*. Master's Thesis, University of Tennessee; 2002.
5. Venkatesh S., Syed K. Islam, Gary T. Hendrickson A. *Method for the Estimation of Aperture Uncertainty in A-D Converters*. in Proc. *2002 IEEE International Symposium on Circuits and Systems, May 2002*: III-125–III-128.
6. Brannon B., Barlow A. *Aperture. Uncertainty and ADC System Performance (AN-501)*. *Analog Devices*; 2006.

Сведения об авторах

Шарамет А.В., к.т.н, доцент, докторант кафедры электронных вычислительных средств Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, начальник тематического отдела ОАО "КБ Радар" – управляющая компания холдинга "Системы радиолокации".

Information about the authors

Sharamet A.V., Cand. Of Sci., Associate Professor, Doctoral Student at the Department of Electronic Computing of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Head of the Thematic Department of JSC "KB Radar" – Managing Company of "Radar Systems" Holding.

Адрес для корреспонденции

220062, Республика Беларусь,
г. Минск, пр-т Независимости, 117а,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники;
тел. +375-29-633-68-84;
e-mail: a.sharamet@kbradar.by
Шарамет Андрей Владимирович

Address for correspondence

220062, Republic of Belarus,
Minsk, Independence Ave., 117a,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics;
tel. +375-29-633-68-84;
e-mail: a.sharamet@kbradar.by
Sharamet Andrei Vladimirovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2022-20-4-21-28>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 004.934:534.86

РАЗБОРЧИВОСТЬ И УЗНАВАЕМОСТЬ РЕЧИ ДИКТОРА ПРИ ЭЛЕКТРОАКУСТИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАНИЯХ В ТРАНСФОРМАТОРЕ

А.Ю. ШАФРАНОВ, Т.В. БОРБОТЬКО

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

Поступила в редакцию 25 января 2022

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2022

Аннотация. Целью статьи является изложение порядка проведения и результатов исследования влияния расстояния от источника звука до трансформатора на разборчивость речи и узнаваемость диктора по голосу при электроакустическом преобразовании в трансформаторе. Из всех существующих методов измерения разборчивости речи и узнаваемости голоса диктора использовался объективизированный метод артикуляционных слоговых таблиц. Выбор метода обусловлен тем, что при большом числе продиктованных и соответственно принятых слогов влияние различных факторов усредняется. Усреднение происходит также, если в испытаниях принимают участие различные группы дикторов и аудиторов. В этом и заключается объективизированность артикуляционного метода. Получить объективные результаты также помогает воспроизведение с помощью речи именно звукосочетаний, не имеющих смысловой нагрузки, так как при приеме слов или фраз можно додумать и восстановить искаженные трактом связи элементы речи. Была определена методика проведения эксперимента. Для исследования в качестве электроакустического преобразователя использовался трансформатор, а в качестве контрольно-измерительной аппаратуры – многофункциональный поисковый прибор ST031M «Пиранья». В состав бригады для проведения исследования был выполнен отбор дикторов и аудиторов. Отбор проводился среди мужчин и женщин в возрасте от 18 до 30 лет, не имеющих явных дефектов речи и слуха и являющихся носителями русского языка. Выведены зависимости значений уровня разборчивости речи и узнаваемости голоса диктора от расстояния между источником звука и трансформатором. Определены расстояния от источника звука до трансформатора, при которых разборчивость речи соответствует различным классам качества согласно ГОСТ 16600-72.

Ключевые слова: разборчивость речи, узнаваемость голоса, электроакустическое преобразование, класс качества разборчивости речи, канал утечки информации.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Шафранов А.Ю., Борботько Т.В. Разборчивость и узнаваемость речи диктора при электроакустических преобразованиях в трансформаторе. Доклады БГУИР. 2022; 20(4): 21-28.

INTELLIGIBILITY AND RECOGNITION OF ANNOUNCER'S SPEECH DURING ELECTRIC ACOUSTIC CONVERSIONS IN A TRANSFORMER

ALEXANDER Y. SHAFRANOV, TIMOPHEY V. BORBOTKO

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

Submitted 25 January 2022

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2022

Abstract. The purpose of the article is to outline the procedure and the results of the study of the influence of the distance from the sound source to the transformer on speech intelligibility and speaker recognition by voice during electro-acoustic conversion in a transformer. Of all the existing methods for measuring speech intelligibility and voice recognition, the objectified method of articulatory syllabary tables was used. The choice of the method is due to the fact that with a large number of dictated and, accordingly, adopted syllables, the influence of various factors is averaged out. Averaging also occurs if different groups of speakers and auditors take part in the tests. This is the objectivity of the articulatory method. Objective results can also be obtained by using speech to precisely reproduce sound combinations that do not have a semantic load, since when receiving words or phrases, it is possible to think out and restore the elements of the speech distorted by the communication path. The experimental procedure was determined. For the study, a transformer was used as an electroacoustic transducer, and a multifunctional search device ST031M "Piranha" was used as a control and measuring equipment. The selection of speakers and auditors was carried out for the research team. The selection was carried out among men and women between the ages of 18 and 30 who had no obvious speech and hearing impairments and were native speakers of the Russian language. The dependences of the values of the level of speech intelligibility and recognition of the speaker's voice on the distance between the sound source and the transformer are derived. The distances from the sound source to the transformer are determined, at which speech intelligibility corresponds to different quality classes according to GOST 16600-72.

Keywords: speech intelligibility, voice recognition, electroacoustic transformation, speech intelligibility quality class, information leakage channel.

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

For citation. Shafranov A.Y., Borbotko T.V. Intelligibility and Recognition of Announcer's Speech during Electric Acoustic Conversions in a Transformer. Doklady BGUIR. 2022; 20(4): 21-28.

Введение

Большинство современной электронной техники имеет в своем составе устройства преобразования электрической энергии, такие как трансформаторы, размещаемые во вторичном источнике электропитания [1]. Такие источники, как правило, непосредственно включаются в сеть электропитания, а трансформатор в них является электроакустическим преобразователем ввиду того, что обладает микрофонным эффектом. Указанное выше в целом обуславливает возникновение акустоэлектрического канала утечки речевой информации.

Целью данной работы являлось исследование влияния расстояния от источника звука до трансформатора на разборчивость речи и узнаваемость диктора по голосу при электроакустическом преобразовании в трансформаторе.

Разборчивость речи может быть определена с помощью методов субъективной оценки (с привлечением дикторов и аудиторов) и методов объективной оценки (с помощью исследования физических свойств и физических характеристик объектов) [2]. Из всех существующих методов измерения разборчивости речи и узнаваемости голоса диктора использовался объективизированный метод артикуляционных слоговых таблиц.

Выбор метода обусловлен тем, что при большем числе продиктованных и соответственно принятых слогов влияние различных факторов усредняется. Усреднение происходит также, если в испытаниях принимают участие различные группы дикторов

и auditors. В этом и заключается объективизированность артикуляционного метода. Получить объективные результаты также помогает воспроизведение с помощью речи именно звукосочетаний, не имеющих смысловой нагрузки, так как при приеме слов или фраз можно додумать и восстановить искаженные трактом связи элементы речи [3].

Основные достоинства данного метода:

- универсальность (метод применим к любому типу тракта);
- простота подбора дикторов и auditors;
- отсутствие требований к наличию специальных технических знаний у организаторов.

Недостатками данного метода являются:

- громоздкость процедуры измерений (требуются значительные затраты временных, материальных и человеческих ресурсов);
- создание артикуляционных таблиц (в случае недостаточности того количества таблиц, которое представлено в ГОСТ Р 50840-95);
- сложность автоматизации процесса;
- влияние на результат особенностей речи и слуха.

Методика проведения эксперимента

Для исследования использовался трансформатор, имеющий шихтованный сердечник броневое типа. Ранее в [4] было показано, что при электрическом сопротивлении обмотки трансформатора менее 500 Ом с помощью применяемой контрольно-измерительной аппаратуры электрический сигнал в ней не регистрируется. Поэтому для проведения исследования был выбран трансформатор с сопротивлением обмотки 659 Ом, что обусловлено наличием соответствующего трансформатора.

В качестве контрольно-измерительной аппаратуры использовался многофункциональный поисковый прибор ST031M «Пирания», содержащий в комплекте источник звука. Все измерения выполнялись при значении коэффициента усиления многофункционального поискового прибора, составляющем +12 дБ.

Расстояние от источника звука варьировали в пределах от некоторого максимального значения (расстояния, при котором слоговая разборчивость составляет не менее 10 %) до минимального значения (расстояния, при котором не наблюдается увеличение уровня слоговой разборчивости).

Измерения выполняли в режиме, при котором обмотка трансформатора, к которой подключалась контрольно-измерительная аппаратура, работала в режиме холостого хода (без нагрузки). Все измерения проводились при нормальных климатических условиях.

Согласно требованиям ГОСТ 25902-2016 и ГОСТ Р ИСО 9921-2013 для чтения слоговых таблиц следует привлекать профессиональных дикторов (мужчин и женщин). Допускается привлечение профессиональных актеров-чтецов. В то же время данные требования не учитывают реальные (повседневные) условия эксплуатации помещений, в которых циркулирует информация, предоставление и (или) распространение которой ограничено. Поэтому для проведения отбора дикторов и auditors руководствовались требованиями ГОСТ 16600-72 и ГОСТ Р 50840-95. Следует подчеркнуть, что для большей достоверности результатов исследования сознательно применялись наиболее жесткие требования из каждого ГОСТ.

Для измерения разборчивости речи и узнаваемости диктора по голосу был выполнен отбор дикторов и auditors в состав бригады для проведения исследования. Отбор проводился среди мужчин и женщин в возрасте от 18 до 30 лет, не имеющих явных дефектов речи и слуха [5]. Учитывая тот факт, что снижение разборчивости речи наблюдается при разговоре на неродном языке даже у хорошо владеющих им людей, а также при прослушивании речи на неродном языке, в состав бригады входили только носители русского языка [2].

Дикторы, разборчивость речи которых, и auditors, узнаваемость голоса которых имели систематическое отклонение от средних значений по бригаде более чем на величины, указанные в табл. 1, были исключены из бригады [5].

Таблица 1. Величины отклонений от среднего значения, при котором аудиторы и дикторы подлежат замене или исключению из бригады [5]

Table 1. The magnitude of deviations from the mean value at which auditors and speakers are subjects to replacement or exclusion from the team [5]

Среднее значение разборчивости речи и узнаваемости диктора по голосу по бригаде, % Average value of speech intelligibility and announcer's recognition by voice in the brigade, %	Отклонение разборчивости речи и узнаваемости диктора по голосу от среднего значения, % Deviation of speech intelligibility and voice recognition of the speaker from the mean, %
91 и более	5
86–90	6
81–85	7
71–80	8
70 и менее	9

Было отобрано 6 дикторов (четыре мужчины и две женщины) и 16 аудиторов.

Перед выполнением артикуляционных исследований с помощью ПЭВМ записаны артикуляционные слоговые таблицы с участием дикторов. Воспроизведение записей обеспечивалось с помощью акустической системы, входящей в комплект ST031M «Пиранья».

Схема электроакустического канала утечки речевой информации представлена на рис. 1.

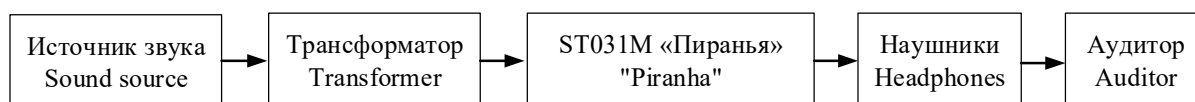


Рис. 1. Схема электроакустического канала утечки речевой информации
Fig. 1. Diagram of the electroacoustic channel of speech information leakage

Запись фонограммы слоговых таблиц была проведена в заглушенной камере. Технические параметры фонограммы соответствовали параметрам аппаратуры, применяемой для воспроизведения звука.

Измерение разборчивости речи заключалось в передаче серии артикуляционных слоговых таблиц, записи принятых звуков и обработки результатов [6]. Время работы артикуляционной бригады, непосредственно занятой измерениями, с учетом небольших перерывов между измерениями не превышало 3 ч за один день. После приема 5 таблиц объявлялся перерыв 5–10 мин, а примерно через 1,5 ч объявлялся перерыв на 15–20 мин [7]. Общее число таблиц за одно измерение (один рабочий день) не превышало 20.

Измерения проводила бригада аудиторов, прошедшая тренировку, путем прослушивания записей дикторов через наушники, слоговых артикуляционных таблиц, указанных в приложении Б ГОСТ Р 50840-95.

В начале обучения аудиторы и дикторы знакомились со структурой артикуляционных слоговых таблиц, осваивали технику их произношения, а также адаптировались к восприятию речи [5], получаемой посредством электроакустического канала утечки речевой информации.

Перед началом измерений, для подготовки операторов, были проведены пробные передачи произвольно взятых звукосочетаний из артикуляционных таблиц в течение 2–3 мин. Пробные передачи проводились в тех же условиях, как и передачи для измерений [6]. Перед чтением артикуляционных таблиц слогов диктор сообщал аудиторам номер таблицы. При измерениях передача звукосочетаний проводилась со скоростью одна таблица за 2–3 мин, ровным голосом, четко, но без подчеркивания отдельных звуков [6]. Слоги читались в следующем ритме: один слог в 3 с [5].

Одним из основных параметров, влияющих на разборчивость речи, является уровень звукового давления речевого сигнала, который зависит от голосового усилия говорящего. Голосовое усилие определяют с помощью эквивалентного скорректированного по А уровня звукового давления, измеренного на расстоянии 1 м от диктора. Связь между голосовым усилием и соответствующим уровнем звукового давления речи приведена в табл. 2 для диктора мужчины [2].

Таблица 2. Голосовое усилие мужчины и соответствующий скорректированный по А уровень звукового давления речи (дБ относительно 20 мкПа), измеренный на расстоянии 1 м от диктора [2]

Table 2. Male voice effort and the corresponding A-weighted speech sound pressure level (dB relative to 20 μPa), measured at a distance of 1 m from the speaker [2]

Голосовое усилие Voice effort	$L_{S,A,1M}$, дБ (dB)
Очень громкая речь	78
Громкая речь	72
Речь повышенной громкости	66
Речь нормальной громкости	60
Речь слабой громкости	54

Одним из исходных условий для проведения измерений разборчивости речи организационной группой было определено требование к дикторам говорить с нормальной громкостью. В силу того, что технически дикторам неудобно контролировать постоянный уровень речи нормальной громкости на расстоянии 1 м от диктора, было принято решение, что микрофон ПЭВМ и шумомер будут располагаться на расстоянии 50 см от диктора. Для этого был вычислен уровень звукового давления речи (дБ относительно 20 мкПа), соответствующий нормальной громкости, измеренный на расстоянии 50 см от диктора. На основе уровня звукового давления речи в месте нахождения диктора ($L_{S,A,1M}$) может быть аппроксимирован уровень звукового давления речи в месте нахождения технического средства записи информации (микрофона ПЭВМ) ($L_{S,A,L}$). Для этого использовали уравнение [2]

$$L_{S,A,L} = L_{S,A,1M} - 20 \lg \frac{r}{r_0}, \quad (1)$$

где $L_{S,A,L}$ – эквивалентный непрерывный скорректированный по А уровень звукового давления, измеренный рядом с техническим средством записи информации; $L_{S,A,1M}$ – эквивалентный непрерывный скорректированный по А уровень звукового давления речи, измеренный на расстоянии 1 м напротив рта диктора; r – расстояние между говорящим и слушателем, м; $r_0 = 1$ м.

Из уравнения (1) следует, что при каждом увеличении расстояния в два раза уровень звукового давления речи снижается на 6 дБ. Это справедливо как для речи в помещении, так и вне помещения на расстоянии до 2 м [2]. Следовательно, речи нормальной громкости соответствует звуковое давление (дБ относительно 20 мкПа), измеренное на расстоянии 50 см от диктора, которое равно 66 дБ.

Перед началом измерений диктор произносил несколько раз испытательную фразу «Не видали мы такого невода» и добивался такой громкости речи [6], при которой шумомер на расстоянии 50 см от диктора показывал уровень 66 дБ. При чтении таблиц поддерживался постоянный уровень и ритм речи, который контролировался шумомером. Дикторы произносили, а аудиторы записывали слоги последовательно по строчкам артикуляционных таблиц слогов.

Запись принятых звукоочетаний производилась на бланке, который разработан специально для проведения исследования, путем компиляции бланков, приведенных в вышеуказанных ГОСТ. Качественная подготовка аудиторов для проведения измерений позволила добиться четкой и разборчивой записи принятых звукоочетаний и исключить написание сходных по графике букв [6]. Когда аудитор не понимал переданного слога, повторение его диктором не допускалось, аудитор прочеркивал соответствующую строку в бланке принятых слогов [5].

Правильность произношения диктором слов контролировалась непосредственно по слоговым таблицам или с помощью контрольной записи на ПЭВМ. В случае когда диктор делал ошибку, для оценки принимали действительно произнесенный слог.

Слог считали принятым правильно, если все звуки в нем соответствовали основному или дополнительному варианту написания, указанному в таблице над основным. Прочеркнутый слог и слог, в котором хотя бы один звук записан неправильно, пропущен или добавлен, считали принятым неправильно, за исключениями, предусмотренными ГОСТ 16600-72.

После окончания передачи определялось значение разборчивости в процентах по каждой таблице. Определение процента правильно принятых звуков производилось проверяющим, ознакомленным с порядком пользования таблицами и правилами проверки, путем сравнения записи с переданной таблицей. Проверка таблицы аудитором исключалась [6].

Результаты и их обсуждение

Оформление результатов измерения разборчивости речи производилось в сводной таблице. При этом в измерении участвовало 16 аудиторов и 6 дикторов. Все аудиторы (расстояние между источником звука и трансформатором 2 см, 4 см, 6 см, 8 см, 10 см, 12 см, 14 см, 16 см, 18 см) слушали по одной таблице каждого диктора, то есть 6 таблиц. Таким образом, каждый аудитор прослушал $6 \times 9 = 54$ таблицы. Следует отметить, что все 54 таблицы были разные и ни разу не повторились. При этом каждый диктор записал по 9 таблиц. В итоге оформления результатов измерения разборчивости речи было получено девять сводных таблиц, по одной на каждом выбранном значении. Результаты полученных измерений отражены на рис. 2.

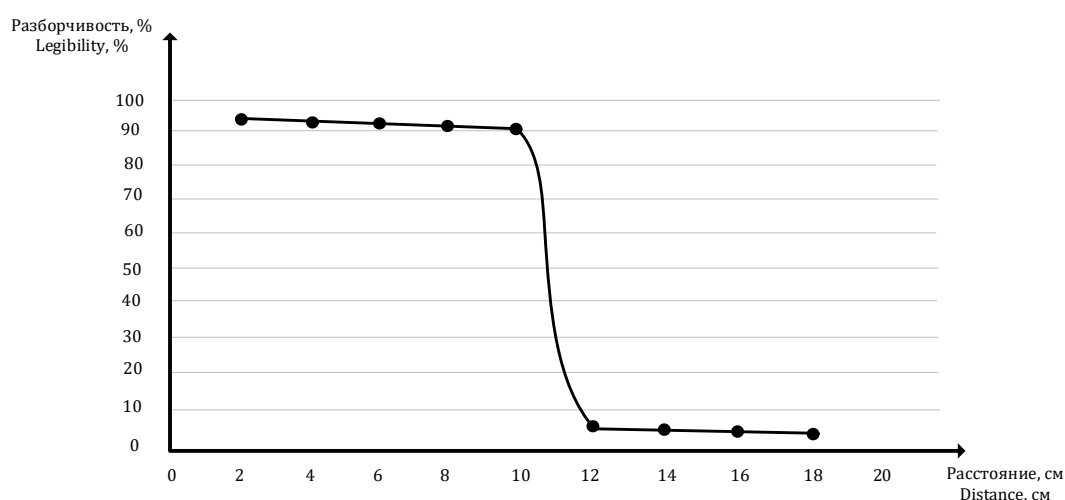


Рис. 2. Зависимость уровня разборчивости речи от расстояния между источником звука и трансформатором

Fig. 2. Dependence of the level of speech intelligibility on the distance between the sound source and the transformer

На основе анализа данных установлено, что разборчивость речи на расстоянии до 10 см включительно от источника звука до трансформатора составляет более 90 %. С увеличением расстояния более 12 см разборчивость речи составляет менее 10 %.

В соответствии с ГОСТ 16600-72 разборчивость речи свыше 90 % соответствует классу качества I, характеристикой которого является понимание передаваемой речи без малейшего напряжения внимания, а разборчивость речи менее 10 % соответствует классу качества V, характеристикой которого является полная неразборчивость связного текста.

Оформление результатов измерения узнаваемости голоса диктора производилось в сводной таблице. Если аудитор в бланке при ответе на вопрос: «Узнали ли Вы диктора?» выбрал пункт А («Да, узнал») и верно указал фамилию аудитора, то в сводной таблице ставим «+», если пункты Б («Вроде, голос знаком, но не знаю чей точно») и В («Нет, не узнал»), то «-». Порядок и условия проведения измерений узнаваемости голоса диктора был аналогичен порядку проведения измерения разборчивости речи. В итоге оформления результатов измерения узнаваемости диктора по голосу сформировано девять сводных таблиц, по одной на каждом выбранном значении. Результаты полученных измерений отражены на рис. 3.

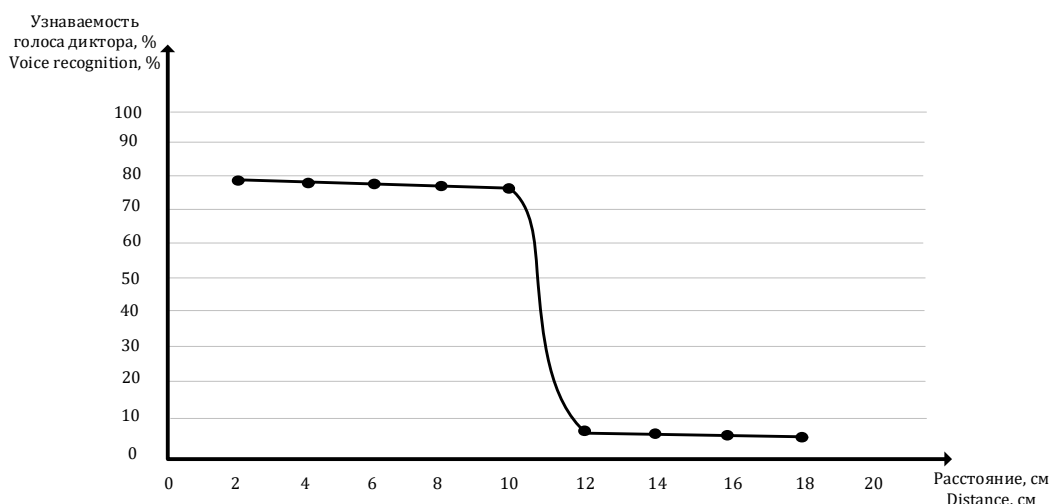


Рис. 3. Зависимость узнаваемости голоса диктора от расстояния между источником звука и трансформатором

Fig. 3. Dependence of the speaker's voice recognition on the distance between the sound source and the transformer

На основе анализа данных установлено, что узнаваемость голоса диктора на расстоянии до 10 см включительно от источника звука до трансформатора составляет более 75 %. С увеличением расстояния более 12 см узнаваемость голоса составляет менее 10 %.

Заключение

Перехват информации в акустических каналах ее утечки является актуальной проблемой. Вместе с тем для оценки возможности реализации подобных мероприятий необходимо численно оценить расстояния, которые подобную проблему позволяют решать.

В результате проведенных исследований установлено, что при увеличении расстояния более 12 см от источника звука до трансформатора разборчивость речи составляет менее 10 %, что соответствует классу качества V (ГОСТ 16600-72), характеристикой которого является полная неразборчивость связного текста. Кроме того, указанное увеличение расстояния приводит к одновременному снижению узнаваемости голоса диктора. Такое положение дел накладывает существенные ограничения на перехват информации по электроакустическому каналу ее утечки, где используются индуктивные преобразователи, в частности трансформаторы.

Кроме того, необходимо отметить, что при определенных условиях перехват речевой информации возможен. Поэтому комплекс мер, направленных на специальные проверки средств обработки информации, а также других технических средств и систем, является весьма актуальным.

Список литературы

1. Битюков В.К., Симачков Д.С. *Вторичные источники электропитания*. Вологда: Инфра-Инженерия; 2017.
2. ГОСТ Р ИСО 9921-2013. Эргономика. Оценка речевой связи. Москва: Стандартинформ; 2014.
3. Рева И.Л. *Усовершенствованная методика оценки защищенности речевой информации от утечки по техническим каналам*. Новосибирск: МГТУ; 2012.
4. Шафранов А.Ю., Борботько Т.В. Исследование влияния сопротивления нагрузки трансформатора, на значение уровня сигнала, возникающего в его обмотке вследствие электроакустического преобразования. *Материалы XXV научно-практической конференции Комплексная защита информации, 15–17 сентября 2020 г.* Москва: Медиа Группа «Авангард»; 2020:154-156.
5. ГОСТ Р 50840-95. Передача речи по трактам связи. Методы оценки качества, разборчивости и узнаваемости. Москва: Госстандарт России; 1995.
6. ГОСТ 16600-72. Передача речи по трактам радиотелефонной связи. Требования к разборчивости речи и методы артикуляционных измерений. Москва: Государственный комитет стандартов Совета Министров СССР; 1973.
7. ГОСТ Р 25902-2016. Залы зрительные. Метод определения разборчивости речи. Москва: Стандартинформ; 2017.

References

1. Bityukov V.K., Simachkov D.S. [*Secondary power supplies*]. Vologda: Infra-Engineering; 2017. (in Russ.)
2. GOST R ISO 9921-2013. Ergonomics. Assessment of speech communication. Moscow: Standartinform; 2014. (in Russ.)
3. Reva I.L. [*Improved methodology for assessing the security of speech information from leakage through technical channels*]. Novosibirsk: MSTU; 2012. (in Russ.)
4. Shafranov A.Y., Borbotko T.V. [Investigation of the influence of the load resistance of a transformer on the value of the signal level arising in its winding due to electro-acoustic conversion]. *Materials of the XXV Scientific and Practical Conference Complex Information Security, September 15–17, 2020*. Moscow: Avangard Media Group; 2020:154-156. (in Russ.)
5. GOST R 50840-95. Transmission of speech over communication paths. Methods for assessing quality, intelligibility and recognition. Moscow: Gosstandart of Russia; 1995. (in Russ.)
6. GOST 16600-72. Voice transmission over radiotelephone communication paths. Speech intelligibility requirements and articulation measurement techniques. Moscow: State Committee for Standards of the Council of Ministers of the USSR; 1973. (in Russ.)
7. GOST R 25902-2016. Auditoriums. A method for determining speech intelligibility. Moscow: Standartinform; 2017. (in Russ.)

Вклад авторов

Все авторы внесли равный вклад в написание статьи.

Authors' contribution

All authors have equally contributed to the writing of the article.

Сведения об авторах

Шафранов А. Ю., студент Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Борботко Т.В., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой защиты информации 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. +375-29-334-18-12;
e-mail: secure@bsuir.by
Борботко Тимофей Валентинович

Information about the authors

Shafranov A.Y., Student at the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Borbotko T.V., Dr. of Sci (Tech.), Professor, Head of the Department of Information Security of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka St., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics;
tel. +375-29-334-18-12;
e-mail: secure@bsuir.by
Borbotko Timofey Valentinovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2022-20-4-29-35>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 623.618

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ В ЗАДАЧЕ ОБНАРУЖЕНИЯ ДВИЖУЩИХСЯ ОБЪЕКТОВ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМОЙ НАБЛЮДЕНИЯ

Е.И. МИХНЁНОК, А.В. ХИЖНЯК

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

Поступила в редакцию 26 апреля 2022

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2022

Аннотация. В статье рассмотрен предлагаемый авторами подход к оценке эффективности обработки изображений в задаче обнаружения движущихся объектов оптической системой наблюдения. Многообразие показателей, применяемых в настоящее время исследователями для оценки качества обработки изображений, говорит о том, что общих подходов пока не выработано. Применение конкретных показателей определяется особенностями реализованных подходов к обработке изображений, а также спецификой задачи, в интересах которой осуществляется обработка. Рассматриваемая авторами задача оценки эффективности разработанного способа обработки изображений применительно к задаче обнаружения движущихся объектов оптической системой наблюдения определяет необходимость ее рассмотрения по двум направлениям. Первое, с точки зрения эффективности применения реализованных подходов к обработке изображений в целях повышения пикового отношения сигнал/шум. Второе, с точки зрения повышения эффективности работы автоматического обнаружителя за счет уменьшения уровня его ложной тревоги. При этом дополнительное определение вероятности правильного обнаружения и построения кривых обнаружения является обязательным, так как в своей совокупности они являются общепринятыми показателями качества обнаружения. Применение предлагаемого подхода позволит в дальнейшем производить сравнение качества работы разработанного способа обработки изображений с другими подобными способами, а также оценивать работу вновь разрабатываемых.

Ключевые слова: обработка изображений, обнаружение движущихся объектов, оптическая система наблюдения, оценка эффективности.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Михнёнок Е.И., Хижняк А.В. Оценка эффективности обработки изображений в задаче обнаружения движущихся объектов оптической системой наблюдения. Доклады БГУИР. 2022; 20(4): 29-35.

EVALUATING THE EFFECTIVENESS OF IMAGE PROCESSING IN THE TASK OF DETECTING MOVING OBJECTS BY AN OPTOELECTRONIC SURVEILLANCE SYSTEM

EVGENY I. MIKHNIIONOK, ALEXANDER V. KHIZNIAK

Military Academy of the Republic of Belarus (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 26 April 2022

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2022

Abstract. The article considers the approach proposed by the authors to evaluate the effectiveness of image processing in detecting moving objects by an optoelectronic surveillance system. The variety of indicators currently used by researchers to assess the quality of image processing suggests that common approaches have not yet been developed. The application of specific indicators is determined by the features of the implemented approaches to the image processing, as well as the specifics of the task in the interests of which the processing is carried out. The problem considered by the authors, assessing the effectiveness of the developed image processing method in relation to the problem of detecting moving objects by an optoelectronic surveillance system, determines the need for its consideration in two directions. The first is from the point of view of the effectiveness of the implemented approaches to image processing in order to increase the peak signal-to-noise ratio. The second is, in terms of increasing the efficiency of the automatic detector, by reducing the level of its false alarm. At the same time, the need for additional determination of the probability of correct detection and the construction of detection curves is mandatory, since in their entirety they are generally accepted indicators of the quality of detection. The application of the proposed approach will allow further comparison of the quality of the developed image processing method with other similar methods, as well as evaluation of the work of newly developed ones.

Keywords: image processing, detection of moving objects, optical-electronic surveillance system, efficiency assessment.

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

For citation. Mikhniionok E.I., Khizniak A.V. Evaluating the Effectiveness of Image Processing in the Task of Detecting Moving Objects by an Optoelectronic Surveillance System. Doklady BGUIR. 2022; 20(4): 29-35.

Введение

В настоящее время для решения различных задач человеческой деятельности все более широкое применение получают оптико-электронные системы наблюдения. На данные системы возлагается выполнение разнообразных по сложности функций, начиная от простого вывода на отображение информации о наблюдаемой сцене, заканчивая подготовкой решений на применение оружия. Решение конкретных задач оптико-электронными системами реализуется посредством применения специализированных алгоритмов обработки изображений. Определение подходов к оценке качества обработки изображений для решения конечной задачи оптико-электронной системой наблюдения (например, обнаружение, сопровождение, распознавание и др.) является актуальным как в настоящее время, так и, безусловно, останется в будущем ввиду отсутствия общей теории решения подобных задач.

Целью данной статьи является описание примененного подхода к оценке эффективности обработки изображений в задаче обнаружения движущихся объектов оптико-электронной системой наблюдения.

Основная часть

В рамках выполнения ряда исследований авторами разработан способ обработки изображений применительно к задаче автоматического обнаружения движущихся объектов оптико-электронной системой тепловизионного типа. Особенностью разработанного способа, подробно изложенного в [1], является совместное применение метода вычитания фона

и пространственно-временной фильтрации. Ключевой задачей является оценка эффективности применения реализованных подходов при обработке изображений, а также их влияние на качество решения задачи обнаружения движущихся объектов оптико-электронной системой наблюдения. При этом целесообразным является применение показателей, характеризующих как качество обработки изображений, так и качество решения задачи обнаружения.

Проведенный анализ применяемых подходов к оценке качества обработки изображений показал, что на современном этапе развития все показатели можно разделить на две большие группы: объективные и субъективные (рис. 1).

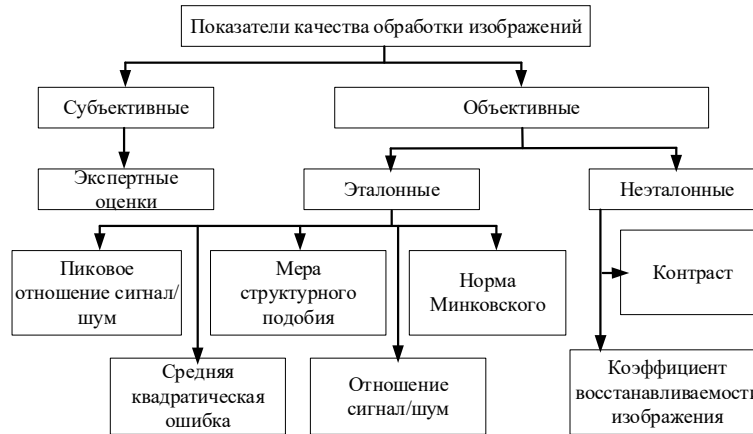


Рис. 1. Классификация показателей качества обработки изображений
Fig. 1. Classification of image processing quality indicators

Субъективные показатели оценки качества обработки изображений используются, когда оценка качества обработки осуществляется человеком. Так как человек является приемником в большинстве приложений цифровой обработки изображений, то в данном контексте субъективный визуальный анализ является достаточно точным методом оценки качества изображений. В ходе субъективного анализа решение о качестве принимается группой экспертов, а окончательная оценка есть среднее арифметическое всех оценок членов группы.

Однако данная группа имеет серьезные недостатки:

- дороговизна и низкая скорость работы;
- зависимость результатов от точности соблюдения экспериментальных условий и эмоционального состояния экспертов;
- отсутствие количественных оценок.

Последний пункт является главным недостатком субъективных показателей. Он не позволяет получать количественные оценки качества результатов обработки изображений в динамике.

Группа объективных показателей определяется с помощью специальных алгоритмов без привлечения экспертов. Алгоритм может использовать оригинал изображения для оценки качества, то есть быть эталонным, или может определять качество без оригинала изображения, то есть быть неэталонным. При этом данные показатели могут использоваться для оценки как с точки зрения итогового оценивания человеком, то есть выставленные автоматически оценки должны соответствовать субъективным метрикам, так и для оценивания, где итоговый результат достаточно сложно определить человеку. Однако должны быть получены конкретные количественные оценки. Более подробно данные показатели рассмотрены в [2].

Так как реализованные подходы к обработке изображений в разработанном способе направлены на улучшение решения задачи обнаружения, то наибольший интерес представляют следующие показатели: контраст, отношение сигнал/шум, пиковое отношение/сигнал шум. В качестве критерия необходимо рассматривать максимизацию их значения.

Контраст: в оптической локации под контрастом понимается приращение яркости цели $L_{ц}$ в плоскости расположения цели относительно яркости фона $L_{ф}$, на котором цель наблюдается [3]:

$$K = L_{ц} - L_{ф}, \quad (1)$$

или их безразмерное отношение (относительный контраст)

$$K = \frac{L_{\text{ц}} - L_{\text{ф}}}{L_{\text{ц}} + L_{\text{ф}}}. \quad (2)$$

Отношение сигнал/шум (SNR – signal-to-noise-ratio) – величина, равная отношению мощности полезного сигнала к мощности шума [4, 5]:

$$SNR = 10 \lg \left(\frac{P_{\text{с}}}{P_{\text{ш}}} \right) = 20 \lg \left(\frac{A_{\text{с}}}{A_{\text{ш}}} \right), \quad (3)$$

где $P_{\text{с}}, P_{\text{ш}}$ – средняя мощность сигнала и шума соответственно; $A_{\text{с}}, A_{\text{ш}}$ – среднее квадратическое значение амплитуды сигнала и шума соответственно.

Пиковое отношение сигнал/шум (PSNR – peak-signal-to-noise-ratio) представляет собой отношение максимального значения сигнала к среднему квадратическому уровню шума, которое определяется разницей между пикселями исходного и обработанного изображения. Следует отметить, что критерий измерения пикового отношения сигнал/шум основывается на сравнении пары изображений «до» и «после» обработки [1]:

$$PSNR = 10 \lg \left(\frac{I_{\text{max}}^2}{MSE} \right), \quad (4)$$

где I_{max} – максимальное значение яркости пикселя изображения; $MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (I_{1,i} - I_{2,i})^2$ – средняя квадратическая ошибка между двумя изображениями; n – количество пикселей изображения; I_1 – яркости пикселей обработанного изображения, I_2 – яркости пикселей исходного изображения.

Применение конкретного показателя для оценки качества обработки изображений определяется операциями обработки. В случае, когда обработка направлена на повышение яркости отдельных участков изображения, а также устранение различных шумов, целесообразным является применение таких показателей, как отношение сигнал/шум и контраст. Когда обработка направлена только на устранение шумов, то необходимо применять пиковое отношение сигнал/шум, так как значения яркости не изменяются.

Пространственно-временная фильтрация, реализованная в разработанном способе, направлена на снижение шумов, что позволяет уменьшить уровень ложной тревоги автоматического обнаружителя. Понятия «сигнал» и «шум» в решаемой задаче следует трактовать следующим образом. Под «сигналом» понимается совокупность пикселей изображения, относящихся к обнаруженным на исследуемой сцене объектам интереса, которые характеризуются своими значениями яркостей. Под «шумом» понимается совокупность пикселей всех других обнаруженных объектов на обрабатываемом изображении.

Для оценки качества решения задачи обнаружения рассчитываются вероятности правильного обнаружения и ложной тревоги, а также строятся кривые (характеристики) обнаружения [6]. Стоит отметить, что в основе разработанного способа обработки изображений лежит обнаружитель, построенный на методе вычитания фона. На выходе обнаружителя данного типа формируется изображение, в котором каждый пиксель представляет собой решение о наличии или отсутствии объекта интереса. Проведение полунатурного эксперимента по исследованию работы разработанного способа на совокупности тестовых изображений позволяет оценить его эффективность. Исходя из того, что координаты всех искомым объектов в тестовом изображении известны, легко вычислить количество правильно и ложно обнаруженных объектов. При этом, рассчитывая вероятность правильного обнаружения, необходимо учитывать только обнаруженные пиксели, относящиеся к объекту интереса, а при расчете вероятности ложной тревоги – все обнаруженные пиксели без учета объекта интереса.

Рассматривая итоговое изображение как набор принятых независимых решений и исходя из формул полной вероятности и частоты события, вероятности правильного обнаружения и ложной тревоги можно вычислить в соответствии с выражениями [1]:

$$D = \frac{N_{по_i}}{N_{о_i}}, \quad (5)$$

где $N_{по_i}$ – количество правильно обнаруженных пикселей i объекта интереса; $N_{о_i}$ – общее количество пикселей i , занимаемых объектом интереса.

$$F = \frac{N_{ло_i}}{N_k}, \quad (6)$$

где $N_{ло_i}$ – количество пикселей i ложно обнаруженных объектов; N_k – количество пикселей изображения k .

При построении кривых обнаружения автоматического обнаружителя за счет изменения контраста обнаруженных объектов можно смоделировать работу способа в различных условиях. При этом для достижения требуемого уровня статистической значимости (доверительная вероятность 0,9; доверительный интервал 5 %) необходимо провести не менее 1080 опытов для каждого значения контраста. Кривые обнаружения представляют собой графики зависимости значений вероятностей правильного обнаружения и ложной тревоги от значения контраста.

Таким образом, для оценки эффективности разработанного способа обработки изображений применительно к задаче обнаружения движущихся объектов оптико-электронной системой наблюдения необходимо рассчитать значения пикового отношения сигнал/шум обрабатываемых изображений, вероятности правильного обнаружения и ложной тревоги автоматического обнаружителя, а также построить кривые обнаружения.

В [1] представлены отдельные результаты оценки разработанного способа обработки изображений, а именно графики значений пикового отношения сигнал/шум и значений вероятности ложной тревоги на каждом кадре исследуемой видеопоследовательности. Ниже представлены графики зависимости вероятностей правильного обнаружения и ложной тревоги от значения контраста для исследуемых методов (разработанный способ обработки изображений; алгоритмы обнаружения, основанные на методе вычитания фона, в котором модели фона представляются смесью гауссовых распределений (MOG2) и извлечением визуального фона (ViBe)).

На рис. 2 представлен график зависимости вероятностей правильного обнаружения от значения контраста для исследуемых методов. Из графика видно, что значения вероятностей правильного обнаружения практически совпадают. Это обусловливается тем, что исследуемые методы основаны на единых подходах. В то же время подход к обработке изображений в разработанном способе направлен на уменьшение уровня ложных тревог автоматического обнаружителя.

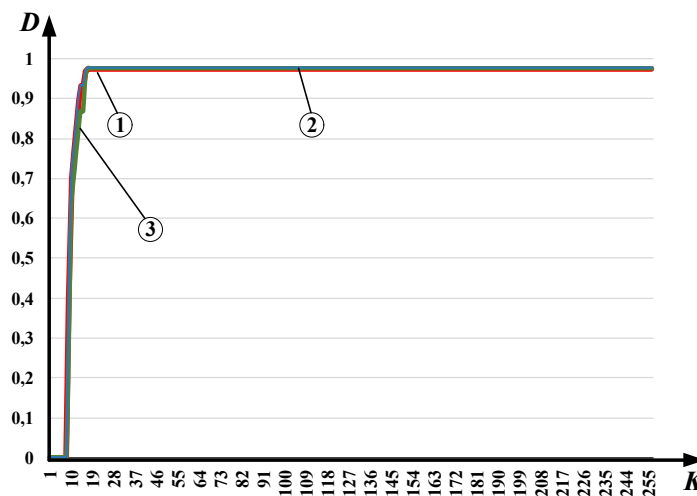


Рис. 2. График зависимости вероятностей правильного обнаружения от значения контраста для исследуемых методов: 1 – разработанный способ; 2 – ViBe; 3 – MOG2

Fig. 2. Graph of the dependence of the probabilities of correct detection on the contrast value for the studied methods: 1 – developed method; 2 – ViBe; 3 – MOG2

На рис. 3 представлен график зависимости вероятностей ложной тревоги от значения контраста для исследуемых методов. Данный график показывает, что реализованная дообработка результатов работы автоматического обнаружителя с применением пространственно-временной фильтрации позволяет значительно уменьшить уровень ложных тревог автоматического обнаружителя.

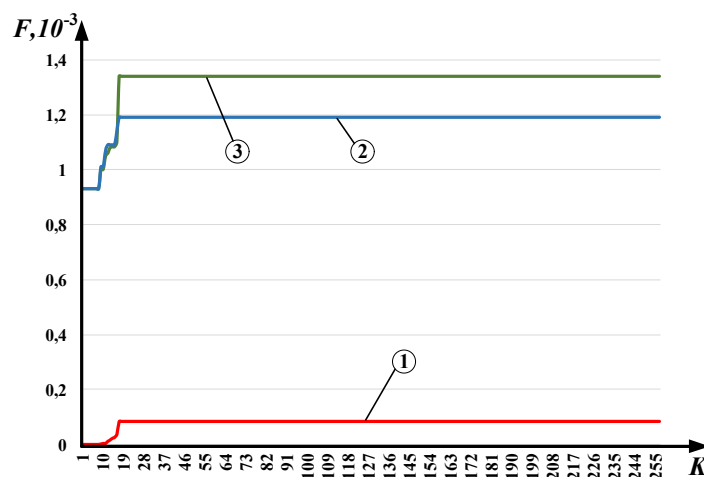


Рис. 3. График зависимости вероятностей ложной тревоги от значения контраста для исследуемых методов: 1 – разработанный способ; 2 – Vibe; 3 – MOG2
Fig. 3. Graph of the dependence of false alarm probabilities on the contrast value for the studied methods: 1 – developed method; 2 – Vibe; 3 – MOG2

Заключение

Таким образом, способ обработки изображений применительно к задаче автоматического обнаружения движущихся объектов, основанный на методе вычитания фона и представления фоноцелевой обстановки смесью гауссовых распределений, отличающийся применением пространственно-временной фильтрации, адаптивного порога к изменениям оптических размеров объектов, позволяет снизить вероятность ложной тревоги автоматического обнаружителя не менее чем в 10 раз.

Применение предлагаемого подхода для оценки эффективности обработки изображений в задаче обнаружения движущихся объектов оптико-электронной системой наблюдения позволит в дальнейшем проводить сравнение качества работы как существующих, так и вновь разрабатываемых алгоритмов по «общепринятым» показателям.

Список литературы

1. Михнёнок Е.И. Способ обработки изображений в задаче обнаружения движущихся объектов в оптико-электронных системах наблюдения тепловизионного типа. *Доклады БГУИР*. 2020;18(2):96-104.
2. Кокошкин А.В., Коротков В.А., Коротков К.В., Новичихин Е.П. Сравнение объективных методов оценки качества цифровых изображений. *Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]*. 2015;6:URL: <http://jre.cplire.ru/jre/jun15/15/text.html>.
3. Якушенков Ю.Г. *Теория и расчет оптико-электронных приборов*. Москва: Логос; 2004.
4. Коныхов А.Л. *Руководство к использованию программного комплекса ImageJ для обработки изображений: учебно-методическое пособие*. Томск: ТУРСУР; 2012.
5. Коныхов А.Л., Костевич А.Г., Курачий М.И. Критерии оценки отношения сигнал/шум в активно-импульсных телевизионно-вычислительных системах. *Доклады ТУРСУРа*. 2012;2:111-115.
6. Ширман Я.Д. *Радиоэлектронные системы: Основы построения и теория. Справочник. Изд. 2-е, перераб. и доп.* Москва: Радиотехника; 2007.

References

1. Mikhniionok E.I. [Method of image processing in the problem of detecting moving objects in optical-electronic surveillance systems of thermal imaging type]. *Doklady BGUIR=Doklady BSUIR*. 2020;18(2):96-104. (In Russ.)
2. Kokoshkin A.V., Korotkov V.A., Korotkov K.V., Novichikhin E.P. [Comparison of objective methods for assessing the quality of digital images]. *Journal of Radio Electronics [electronic journal]*. 2015;6: URL: <http://jre.cplire.ru/jre/jun15/15/text.html>. (In Russ.)
3. Yakushenkov Yu.G. [*Theory and calculation of optoelectronic devices*]. Moscow: Logos; 2004. (In Russ.)
4. Konyukhov A.L. [*Guide to the use of the ImageJ software package for image processing: An educational and methodical manual*]. Tomsk: TURSUR; 2012. (In Russ.)
5. Konyukhov A.L., Kostevich A.G., Kuryachiy M.I. [Criteria for evaluating the signal-to-noise ratio in active-pulse television and computer systems]. *Doklady TURSURA = Proceedings of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics*. 2012;2:111-115. (In Russ.)
6. Shirman Ya.D. [*Radio-electronic systems: Fundamentals of construction and theory. Handbook. 2nd edition, reprint. and add.*]. Moscow: Radiotekhnics; 2007. (In Russ.)

Вклад авторов

Михнёнок Е.И. описал подход к оценке эффективности обработки изображений в задаче обнаружения движущихся объектов оптико-электронной системой наблюдения и оценил разработанный способ обработки изображений.

Хижняк А.В. осуществил постановку задачи для проведения исследования.

Authors' contribution

Mikhniionok E.I. developed an approach to evaluate the effectiveness of image processing in detecting moving objects by an optoelectronic surveillance system and evaluated the developed image processing method.

Khizniak A.V. carried out the formulation of the research task .

Сведения об авторах

Михнёнок Е.И., начальник 2 группы научно-исследовательской лаборатории факультета связи и автоматизированных систем управления учреждения образования «Военная академия Республики Беларусь».

Хижняк А.В., к.т.н., доцент, ведущий научный сотрудник 2 группы научно-исследовательской лаборатории факультета связи и автоматизированных систем управления учреждения образования «Военная академия Республики Беларусь».

Information about the authors

Mikhniionok E.I., Head of the 2nd Group of the Research Laboratory of the Department of Communications and Automated Control Systems of the Military Academy of the Republic of Belarus.

Khizniak A.V., Cand of Sci, Associate Professor, Senior Researcher at the 2nd Group of the Research Laboratory of the Department of Communications and Automated Control Systems of the Military Academy of the Republic of Belarus.

Адрес для корреспонденции

220057, Республика Беларусь,
г. Минск, пр. Независимости 220,
Военная академия Республики Беларусь;
тел. +375-29-291-27-36;
e-mail: actosum@gmail.com
Михнёнок Евгений Игоревич

Address for correspondence

220057, Republic of Belarus,
Minsk, Nezavisimosti Ave., 220,
Military Academy of the Republic of Belarus;
tel. +375-29-291-27-36;
e-mail: actosum@gmail.com
Mikhniionok Evgeny Igorevich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2022-20-4-36-43>

Оригинальная статья / Original paper

УДК 621.382.3–027.45

УСКОРЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ ТРАНЗИСТОРОВ БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ НА ДЛИТЕЛЬНУЮ НАРАБОТКУ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ИХ НАДЕЖНОСТИ МЕТОДОМ ИМИТАЦИОННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

В.О. КАЗЮЧИЦ, Е.В. КАЛИТА, С.М. БОРОВИКОВ, А.И. БЕРЕСНЕВИЧ

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

Поступила в редакцию 25 апреля 2022

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2022

Аннотация. При оценке индивидуальной надежности полупроводниковых приборов по постепенным отказам для заданной наработки прогнозируют значение электрического параметра конкретного экземпляра для этой наработки, используя метод имитационных воздействий. Для получения прогноза электрического параметра надо иметь имитационную модель в виде функции связи заданной наработки с уровнем имитационного воздействия. Имитационную модель получают с помощью предварительных исследований (обучающего эксперимента) обучающей выборки полупроводниковых приборов интересующего типа объемом примерно 50...100 экземпляров. Применение модели сводится к расчету уровня имитационного воздействия, соответствующего заданной наработке. Результат измерения электрического параметра при рассчитанном уровне имитационного воздействия у нового однотипного экземпляра, не принимавшего участия в обучающем эксперименте, следует считать прогнозом этого параметра для заданной наработки. Составной частью предварительных исследований по получению имитационной модели являются испытания полупроводниковых приборов обучающей выборки на длительную наработку, которая может составлять десятки тысяч часов, что обуславливает необходимость планирования и проведения ускоренных испытаний. В статье обоснованы условия проведения ускоренных форсированных испытаний применительно к биполярным транзисторам большой мощности типа КТ872А. В качестве факторов, ускоряющих испытания, выбраны повышенная температура и обратное напряжение, прикладываемое к коллекторному переходу транзисторов. Рассчитан коэффициент ускорения испытаний относительно рабочего режима работы транзисторов. По результатам ускоренных испытаний для электрического параметра (напряжение насыщения коллектор–эмиттер) получена математическая модель в виде зависимости его среднего значения от наработки. Наличие этой модели необходимо для определения функции пересчета заданной наработки транзисторов на значение имитационного воздействия.

Ключевые слова: биполярные транзисторы, надежность по постепенным отказам, длительная наработка, ускоренные испытания, имитационная модель.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарности. Работа подготовлена в рамках выполнения проекта № Т20МВ-026 на тему «Прогнозирование эксплуатационной надежности мощных полупроводниковых приборов с использованием методов и алгоритмов машинного обучения», утвержденного Научным советом Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (протокол № 1 от 22.04.2020).

Для цитирования. Казючиц В.О., Калита Е.В., Боровиков С.М., Бересневич А.И. Ускоренные испытания транзисторов большой мощности на длительную наработку при решении задач прогнозирования их надежности методом имитационных воздействий. Доклады БГУИР. 2022; 20(4): 36-43.

ACCELERATED TESTING OF HIGH POWER TRANSISTORS FOR LONG OPERATION WHEN SOLVING PROBLEMS OF PREDICTION OF THEIR RELIABILITY BY THE METHOD OF IMITATION SIMULATION

VLADISLAV O. KAZIUCHYTS, ELENA V. KALITA, SERGEI M. BOROVNIKOV,
ANDREI I. BERASNEVICH

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

Submitted 25 April 2022

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2022

Abstract. When evaluating the individual reliability of semiconductor devices by gradual failures for a given operating time, the value of the electrical parameter of a particular instance for this operating time is predicted using the simulation method. To obtain a prediction of an electrical parameter, it is necessary to have a simulation model in the form of a function of the relationship between a given operating time and the level of simulation impact. The simulation model is obtained with the help of preliminary studies (training experiment) of a training sample of semiconductor devices of the type of interest with the volume of approximately 50 ... 100 copies. The application of the model is reduced to the calculation of the level of simulation impact corresponding to a given operating time. The result of measuring the electrical parameter at the calculated level of the imitation impact in a new specimen of the same type that did not take part in the training experiment should be considered as a prediction of this parameter for a given operating time. An integral part of the preliminary research to obtain a simulation model is the testing of semiconductor devices of the training set for a long operating time, which can be tens of thousands of hours, which necessitates planning and conducting accelerated tests. The article substantiates the conditions for conducting accelerated forced tests in relation to high-power bipolar transistors of the KT872A type. The increased temperature and the reverse voltage applied to the collector junction of the transistors are chosen as factors accelerating the tests. The test acceleration coefficient is calculated relative to the operating mode of the transistors. Based on the results of the accelerated tests for the electrical parameter (collector-emitter saturation voltage), a mathematical model was obtained in the form of a dependence of its average value on the operating time. The presence of this model is necessary to determine the function of recalculating the given operating time of transistors to the value of the simulation impact.

Keywords: bipolar transistors, gradual failure reliability, long operating time, accelerated testing, simulation model.

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

Gratitude. The article was prepared as part of the implementation of project No. T20MV-026 on the topic "Predicting the operational reliability of high-power semiconductor devices using methods and algorithms of machine learning", approved by the Scientific Council of the Belarusian Republican Foundation for Basic Research (protocol No. 1 of 04.22.2020).

For citation. Kaziuchyts V.O., Kalita E.V., Borovnikov S.M., Berasnevich A.I. Accelerated Testing of High Power Transistors for Long Operation when Solving Problems of Prediction of their Reliability by the Method of Imitation Simulation. Doklady BGUIR. 2022; 20(4): 36-43.

Введение

Метод имитационных воздействий позволяет получить имитационную модель для электрического параметра полупроводниковых приборов (ППП) в виде функции пересчета наработки t ППП на значение имитационного фактора F , например, температуру $T \rightarrow F$, или же ток коллектора $I_K \rightarrow F$ биполярных транзисторов [1, 2]:

$$F_{\text{им}} = f(t), \quad (1)$$

где f – символ функциональной связи.

Полученную по результатам обучающего эксперимента модель (1) используют для нахождения прогнозных значений электрического параметра однотипных экземпляров, которые не участвовали в обучающем эксперименте (рис. 1).

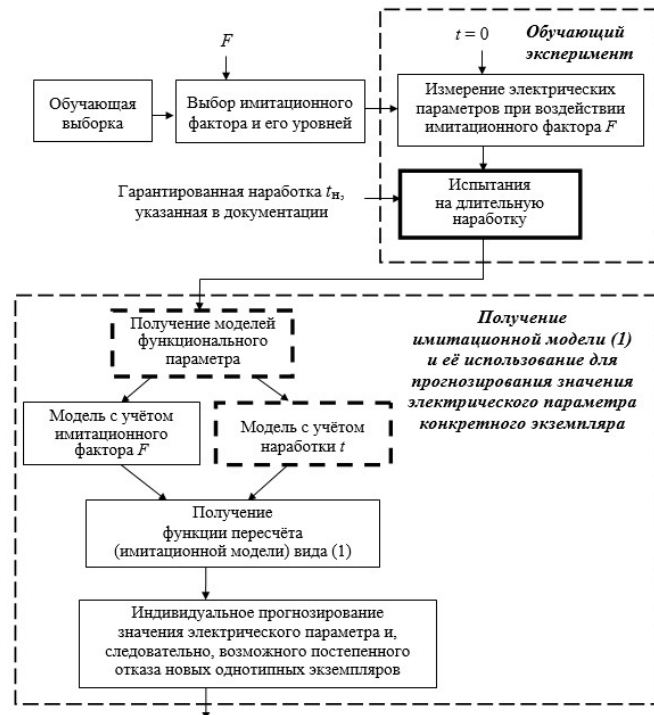


Рис. 1. Прогнозирование значения электрического параметра ППП методом имитационных воздействий
Fig. 1. Predicting the value of the electrical parameter of the semiconductor Devices by the method of simulation effects

На рис. 1 приняты следующие обозначения: $t=0$ – начальный момент времени; t_n – гарантированная наработка, указанная в технической документации на ППП рассматриваемого типа; F – фактор, используемый в качестве имитационного воздействия.

Последовательность прогнозирования с использованием модели (1).

Для заданного значения наработки t_3 расчетом по выражению (1) определяют уровень имитационного фактора $F_{им}$. На ППП (конкретный экземпляр) воздействуют имитационным фактором и при его значении, равном уровню $F_{им}$, измеряют интересующий электрический функциональный параметр (обозначим его через Y). Результат измерения рассматривают в качестве прогноза электрического параметра Y этого экземпляра для заданной наработки t_3 .

Актуальность исследований

Имитационную модель вида (1) получают заблаговременно с помощью предварительных исследований ППП интересующего типа, выполняя обучающий эксперимент [1–3].

При проведении обучающего эксперимента, используя обучающую выборку ППП (примерно 50...100 экземпляров), вначале выясняют, как в среднем изменяется электрический функциональный параметр Y полупроводниковых приборов рассматриваемого типа в зависимости от имитационного воздействия F (например, температуры). В этом случае изменения электрического параметра Y носят обратимый характер. При экспериментальном получении этой зависимости используемые уровни имитационного воздействия F выбираются такими, чтобы не происходили необратимые изменения электрического параметра Y , т.е. после снятия имитационного воздействия параметр должен принять своё первоначальное значение. Далее определяют, как этот же электрический параметр Y в среднем зависит от наработки t_n , т.е. как деградирует в процессе работы ППП. В этом случае изменения электрического параметра Y являются необратимыми из-за деградации материалов, используемых в конструкции ППП.

По результатам обучающего эксперимента получают две следующие модели:

$$Y_{cp} = f_1(F), \quad (2)$$

$$Y_{cp} = f_2(t), \quad (3)$$

где Y_{cp} – среднее значение интересующего электрического параметра Y , полученное для экземпляров обучающей выборки; f_1 и f_2 – символы функциональной зависимости, вид которых выбирается из условия лучшего описания (для экземпляров обучающей выборки) зависимости Y_{cp} соответственно от имитационного воздействия F и от наработки t .

Имея модели (2) и (3), получают имитационную модель (1), которую далее применяют к однотипным экземплярам, которые не участвовали в обучающем эксперименте. В работе [4] было показано как, используя результаты обучающего эксперимента, получать модель вида (2).

Для получения модели (3) экземпляры обучающей выборки необходимо испытать на длительную наработку [1–3]. При этом, в процессе испытаний следует периодически контролировать изменения (деградацию) электрического параметра Y каждого экземпляра.

Задаваемая длительная наработка t_3 может составлять десятки тысяч часов, поэтому проводят ускоренные, обычно форсированные испытания, позволяющие за короткое время t_y получить такую же информацию о деградации параметра Y , как и в течение заданной длительной наработки t_3 в рабочем режиме. Актуальным является выбор вида и уровней форсирующих воздействий, ускоряющих деградацию электрических параметров ППП, а также определение времени проведения ускоренных испытаний.

Условия проведения ускоренных испытаний и испытательная установка

Задача выбора режима и определения времени проведения ускоренных испытаний решалась применительно к биполярным транзисторам большой мощности типа КТ872А. В качестве электрического функционального параметра Y рассматривалось напряжение насыщения коллектор–эмиттер (обозначим через $U_{кэ\text{ нас}}$). В дальнейшем, по значению этого электрического параметра будет приниматься решение о соответствии конкретного экземпляра требованию надежности по постепенным отказам.

Рабочий режим транзисторов, относительно которого определялись условия проведения ускоренных испытаний, указан в табл. 1.

Таблица 1. Параметры рабочего режима транзисторов типа КТ872А
Table 1. Parameters of the operating mode of transistors type КТ872А

Параметр, величина Parameter, magnitude	Значение Value
1. Постоянная мощность, рассеиваемая коллектором P , Вт	30
2. Напряжение коллектор–эмиттер $U_{кэ}$, В	150
3. Средний ток коллектора I_k , А	0,2
4. Максимальная температура окружающей среды (корпуса транзистора) T_{cp} , °С	+55
5. Интересующая длительная наработка t , ч	15 000

При выборе режима и условий проведения ускоренных испытаний использованы известные подходы, рассмотренные в [1, 2, 5–8] применительно к полупроводниковым приборам и интегральным микросхемам. В качестве модели ускоренных испытаний выбрана модель Эйринга [6, 7]. Для увеличения коэффициента ускорения испытаний в соответствии с этой моделью транзисторы должны подвергаться воздействию как повышенной температуры, так и повышенной электрической нагрузки по сравнению с рабочими условиями. Согласно этой модели коэффициент ускорения испытаний $K_y^{(T, U)}$ за счет использования температуры T и обратного напряжения на коллекторном переходе транзистора U определялся по формуле

$$K_y^{(T, U)} = \exp\left[\frac{E_a}{k}\left(\frac{1}{T_p} - \frac{1}{T_y}\right)\right] \times \exp[\beta(U_y - U_p)], \quad (4)$$

где E_a – энергия активации, эВ; k – постоянная Больцмана ($8,617 \cdot 10^{-5}$ эВ/К); β – параметр, зависящий от материала и технологии изготовления ППП.

Нижние индексы «р» и «у» при параметрах T и U в формуле (4) относятся соответственно к рабочему режиму и режиму ускоренных испытаний.

Используемые для выбора условий проведения ускоренных испытаний справочные параметры транзисторов, а также значения параметров E_a и β , которые могут быть приняты постоянными для кремниевых транзисторов биполярной структуры, указаны в табл. 2.

Таблица 2. Справочные параметры и величины
Table 2. Reference parameters and magnitudes

Параметр, величина Parameter, magnitude	Значение Value
1. Максимальная мощность рассеивания коллектором при $T \leq 25$ °C, P_{\max} , Вт	100
2. Тепловое сопротивление кристалл–корпус $R_{\text{кр-корп}}$, °C/Вт	1,25
3. Усредненное значение энергии активации E_a , эВ	0,7
4. Усредненное значение параметра β формулы (4), размерность: 1/V	0,00443

Значение параметра β получено на основе справочных данных о влиянии коэффициента электрической нагрузки по напряжению коллектор–эмиттер биполярных транзисторов на их эксплуатационную надежность. Эти данные были взяты из военного справочника США по расчету надежности электронного оборудования (Reliability prediction of electronic equipment: Military Handbook MIL–HDBK-217F. Washington: Department of defense DC 20301, 1995).

Параметры выбранного режима, время проведения ускоренных испытаний и расчетные значения коэффициентов ускорения испытаний относительно рабочего режима приведены в табл. 3.

Таблица 3. Условия проведения ускоренных испытаний исследуемых транзисторов
Table 3. Conditions for accelerated testing of the studied transistors

Параметр, величина Parameter, magnitude	Значение Value
1. Температура ускоренных испытаний T_y , °C	135
2. Обратное напряжение U_y (напряжение $U_{\text{КЭ}}$) при ускоренных испытаниях, В	600
3. Значение P_{\max} при $T = +55$ °C, Вт (расчетное значение)	76
4. Перегрев ΔT (в °C), имитирующий мощность $P = 30$ Вт при $T_{\text{ср}} = +55$ °C	37,5
5. Коэффициент ускорения испытаний за счет повышенной температуры, $K_y^{(T)}$	10,1
6. Коэффициент ускорения испытаний за счет обратного напряжения, $K_y^{(U)}$	7,34
7. Общий коэффициент ускорения, $K_y^{(T,U)}$	74,1
8. Время ускоренных испытаний t_y , ч	216
9. Нароботка t , соответствующая рабочим (обычным) условиям, ч	16 005

Экспериментальная установка для проведения ускоренных испытаний была создана на базе промышленной нагревательной печи с возможностью обеспечения нагрева до +150 °C. Погрешность поддержания установленной температуры составляла не более ± 2 °C. В состав экспериментальной установки были включены контрольно-измерительные приборы (вольтметр, амперметр), высоковольтный источник питания, предназначенный для подачи напряжения на переходы коллектор–эмиттер испытываемых транзисторов. Испытываемые транзисторы монтировались на специальной плате, подключаемой к экспериментальной установке с помощью термостойких монтажных проводов. Объем выборки составлял 100 экземпляров. Для устранения возможных паразитных высокочастотных колебаний в транзисторах и электрических цепях подключения их к испытательной установке был применен способ, указанный в технических условиях на транзисторы исследуемого типа. Для исключения перегрузки источника питания в случае возникновения во время испытаний внезапного отказа хотя бы одного из транзисторов использовались элементы защиты, входящие в состав экспериментальной установки. С более подробным описанием экспериментальной установки можно ознакомиться в [8].

Результаты ускоренных испытаний

В процессе ускоренных испытаний были получены данные об изменении (деградации) электрического параметра $U_{\text{КЭ нас}}$ транзисторов типа КТ872А в зависимости от времени ускоренных испытаний. С учетом общего коэффициента ускорения испытаний K_y эти данные были пересчитаны на наработку для рабочего (обычного) режима. Фрагмент этих данных представлен в табл. 4.

В нижней строке табл. 4 приводятся средние значения электрического параметра $U_{\text{КЭ нас}}$ для контролируемых точек наработки t_i с учетом всех экземпляров обучающей выборки.

Экспериментальные графики зависимости параметра $U_{\text{КЭ нас}}$ от наработки t показаны на рис. 2. В качестве примера приводится информация о семи экземплярах обучающей выборки.

Таблица 4. Результаты деградации электрического параметра $U_{КЭ\text{нас}}$ (в мВ)
Table 4. The results of the degradation of the electrical parameter $U_{KE\text{sat}}$ (in mV)

Экземпляр обучающей выборки Training sample instance	Значение $U_{КЭ\text{нас}}$ для наработки t_i , ч $U_{KE\text{sat}}$ value corresponding to operating time t_i , h				
	0	3360	7710	11860	16005
1	466	589	637	657	684
2	533	627	676	701	724
3	723	864	937	1036	1075
4	502	565	613	638	651
5	562	804	891	964	1012
6	833	984	1094	1132	1170
7	614	688	762	787	845
...
Среднее значение	605	732	801	845	879

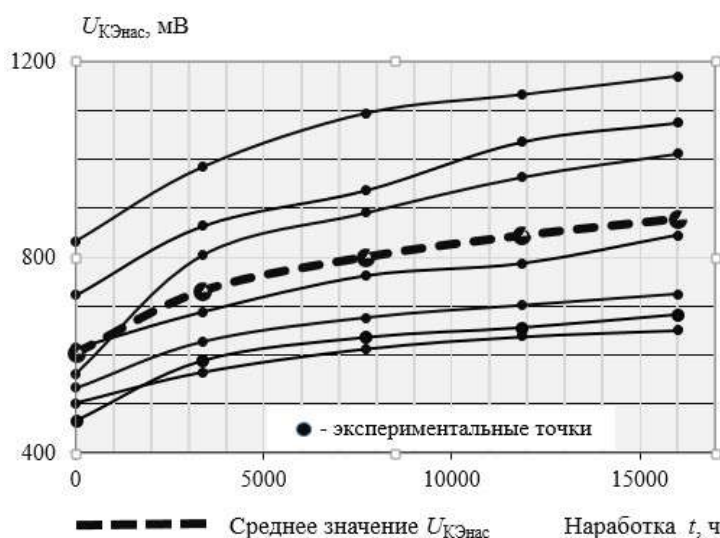


Рис. 2. Зависимость электрического параметра $U_{КЭ\text{нас}}$ от наработки t
Fig. 2. Dependence of the electrical parameter $U_{KE\text{sat}}$ from the operating time t

С использованием инструмента анализа «Регрессия», входящего в «Пакет анализа» приложения Microsoft Excel, и метода получения нелинейных приближающих функций, изложенного в учебнике [9], для математического описания зависимости параметра $U_{КЭ\text{нас}}$ от наработки t получена модель

$$U_{КЭ\text{нас}} = 2,19 \cdot t^{0,5} + 605, \text{ мВ.} \quad (5)$$

Средняя относительная ошибка прогнозирования ($\Delta_{\text{ср}}$, в процентах) значений $U_{КЭ\text{нас}}$ для этой модели определялась с использованием общепринятого подхода:

$$\Delta_{\text{ср}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{(U_{КЭ\text{нас}}^{(\text{мод})})_i - (U_{КЭ\text{нас}}^{(\text{экс})})_i}{(U_{КЭ\text{нас}}^{(\text{экс})})_i} \right| \cdot 100, \% , \quad (6)$$

где n – число рассматриваемых точек наработки (в данном случае $n = 5$); $(U_{КЭ\text{нас}}^{(\text{мод})})_i$ – значение параметра $U_{КЭ\text{нас}}$, подсчитанное по модели (5) для наработки t_i ; $(U_{КЭ\text{нас}}^{(\text{экс})})_i$ – экспериментальное (измеренное) значение параметра $U_{КЭ\text{нас}}$, соответствующее наработке t_i ($i = 1, 2, \dots, 5$).

В табл. 5 приводятся полученные по модели (5) значения электрического параметра $U_{КЭ\text{нас}}$ и найденная с использованием формулы (6) относительная ошибка Δ_i (в процентах), соответствующая каждой точке наработки t_i .

Средняя относительная ошибка оценки параметра $U_{КЭ\text{нас}}$ по модели (5) составила примерно 0,2%. Также была определена среднеквадратическая относительная ошибка $\Delta_{\text{ср.кв}}$ оценки $U_{КЭ\text{нас}}$ по модели (5). Для нахождения этой ошибки использована формула [1]:

$$\Delta_{\text{ср.кв}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[\frac{(U_{\text{КЭ нас}}^{(\text{мод})})_i - (U_{\text{КЭ нас}}^{(\text{экс})})_i}{(U_{\text{КЭ нас}}^{(\text{экс})})_i} \right]^2} \cdot 100, \% \quad (7)$$

Расчитанная по формуле (7) среднеквадратическая относительная ошибка $\Delta_{\text{ср.кв}}$ составила не более 0,3 %, что свидетельствует о достаточно хорошем описании электрического параметра $U_{\text{КЭ нас}}$ с помощью модели (5).

Таблица 5. Относительная ошибка оценки параметра $U_{\text{КЭ нас}}$ по модели (5)
Table 5. Relative error in estimating the $U_{\text{KE sat}}$ parameter according to the model (5)

Параметр, показатель Parameter, indicator	Наработка t_i , ч Operating time t_i , h				
	0	3360	7710	11860	16005
$(U_{\text{КЭ нас}}^{(\text{экс})})_i$, мВ	605	732	801	845	879
$(U_{\text{КЭ нас}}^{(\text{мод})})_i$, мВ	605,0	731,9	797,3	843,5	882,1
$\Delta_i = \left \frac{(U_{\text{КЭ нас}}^{(\text{мод})})_i - (U_{\text{КЭ нас}}^{(\text{экс})})_i}{(U_{\text{КЭ нас}}^{(\text{экс})})_i} \right \cdot 100, \%$	0	0,007	0,46	0,18	0,35
Средняя относительная ошибка прогнозирования $\Delta_{\text{ср}}, \%$	0,2				

Полученную модель (5) планируется в дальнейшем использовать для нахождения функции пересчета вида (1), в которой в качестве имитационного воздействия принят ток коллектора транзистора ($F_{\text{им}} \rightarrow I_{\text{К.им}}$).

Заключение

В работе выбран и обоснован режим проведения ускоренных форсированных испытаний на длительную наработку выборки биполярных транзисторов большой мощности типа КТ872А. Для ускорения испытаний обучающей выборки использована модель Эйринга, учитывающая ускорение испытаний за счет воздействия на испытываемые транзисторы повышенной температуры и повышенной электрической нагрузки. Проведены ускоренные испытания выборки транзисторов объемом 100 экземпляров с выполнением периодического контроля функционального электрического параметра $U_{\text{КЭ нас}}$. Используя результаты ускоренных испытаний транзисторов в виде деградации их электрического параметра $U_{\text{КЭ нас}}$, получена математическая модель, показывающая, как параметр $U_{\text{КЭ нас}}$ в среднем изменяется в зависимости от наработки транзисторов. С помощью количественных показателей подтверждено качество этой математической модели. Модель планируется в дальнейшем использовать для нахождения функции пересчета заданной наработки на значение имитационного фактора и получения прогнозных значений параметра $U_{\text{КЭ нас}}$ для новых однотипных экземпляров, которые не участвовали в обучающем эксперименте.

Список литературы

1. Боровиков С.М. *Статистическое прогнозирование для отбраковки потенциально ненадежных изделий электронной техники*. Москва: Новое знание; 2013.
2. Боровиков С.М., Цырельчук И.Н., Шнейдеров Е.Н., Бересневич А.И. *Прогнозирование надежности изделий электронной техники*. Минск: МГВРК; 2010.
3. Боровиков С.М., Щерба А.И. Прогнозирование работоспособности полупроводниковых приборов методом имитационного моделирования. *Информационные технологии в проектировании и производстве*. 2002;4:37-40.
4. Боровиков С.М., Калита Е.В., Бересневич А.И. Моделирование электрического параметра транзисторов при прогнозировании их надежности методом имитационных воздействий. *Интернаука*. 2022;7-2(230):25-30.
5. Escobar L.A., Meeker W.Q. A Review of Accelerated Test Models. *Statistical Science*. 2006;21(4):552-577. DOI: 10.1214/088342306000000321.
6. *Failure Mechanisms and Models for Semiconductor Devices*. Arlington: JEDEC Solid State Technology Association; 2009.
7. *Полупроводниковая электроника* / пер. с англ. М.В. Рябчицкий, С.В. Турецкий, О.Н. Ермаков, ред. Т.Е. Брод. Москва: ДМК Пресс; 2015.

8. Боровиков С.М., Шнейдеров Е.Н., Плебанович В.И., Бересневич А.И., Бурак И.А. Экспериментальное исследование деградации изделий электронной техники. *Доклады БГУИР*. 2017;2:45-52.
9. Боровиков С.М. *Теоретические основы конструирования, технологии и надежности*. Минск: Дизайн ПРО; 1998:62-65.

References

1. Borovikov S.M. [Statistical forecasting for the rejection of potentially unreliable electronic products]. Moscow: New Knowledge; 2013. (In Russ.)
2. Borovikov S.M., Tsyrelchuk I.N., Shneiderov E.N., Beresnevich A.I. [Predicting the reliability of electronic products]. Minsk: MGVRK; 2010. (In Russ.)
3. Borovikov S.M., Shcherba A.I. [Forecasting the performance of semiconductor devices by simulation]. *Informacionnye tekhnologii v proektirovanii i proizvodstve = Information technologies in design and production*. 2002;4:37-40. (In Russ.)
4. Borovikov S.M., Kalita E.V., Berasnevich A.I. [Modeling of the electrical parameter of transistors in predicting their reliability by the method of simulation effects]. *Internauka = Internauka*. 2022;7-2(230): 25-30. (In Russ.)
5. Escobar L.A., Meeker W.Q. A Review of Accelerated Test Models. *Statistical Science*. 2006;21(4):552-577. DOI: 10.1214/088342306000000321.
6. *Failure Mechanisms and Models for Semiconductor Devices*. Arlington: JEDEC Solid State Technology Association; 2009.
7. [Semiconductor electronics] / trans. from eng. M.V. Ryabchitsky, S.V. Turkish, O.N. Ermakov, edit. T.E. Brod. Moscow: DMK Press; 2015. (In Russ.)
8. Borovikov S.M., Shneiderov E.N., Plebanovich V.I., Berasnevich A.I., Burak I.A. [Experimental study of the degradation of electronic products]. *Doklady BGUIR = Doklady BGUIR*. 2017;2:45-52. (In Russ.)
9. Borovikov S.M. [Theoretical foundations of design, technology and reliability]. Minsk: PRO Design; 1998:62-65. (In Russ.)

Вклад авторов / Authors' contribution

Все авторы в равной степени внесли вклад в написание статьи. / All authors have equally contributed to the writing the article.

Сведения об авторах

Казючиц В.О., м.т.н., аспирант Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Калита Е.В., ассистент Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

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

Бересневич А.И., м.т.н., старший преподаватель кафедры проектирования информационно-компьютерных систем Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Information about the authors

Kaziuchyts V.O., M. Sci, Postgraduate at the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Kalita E.V., Assistant at the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

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

Berasnevich A.I., M. Sci, Senior Lecturer at the Department of Information and Computer Systems Design 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. Brovka St., 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/10.35596/1729-7648-2022-20-4-44-52>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.383:539.1.43

ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТОНКИХ ПОДЗАТВОРНЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ БЫСТРОЙ ТЕРМООБРАБОТКИ

Н.С. КОВАЛЬЧУК, А.А. ОМЕЛЬЧЕНКО, В.А. ПИЛИПЕНКО, В.А. СОЛОДУХА,
С.А. ДЕМИДОВИЧ, В.В. КОЛОС, В.А. ФИЛИПЕНЯ, Д.В. ШЕСТОВСКИЙ

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

Поступила в редакцию 15 декабря 2021

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2022

Аннотация. Проведены исследования электрофизических характеристик диэлектриков затвора, полученных методом быстрой термообработки двухстадийным и трехстадийным процессами. Каждая фотонная обработка (стадия) производилась в течение 12 с при постоянной мощности галогеновых ламп и нагреве пластин до максимальной температуры 1250 °С. Две первых стадии процесса проводились в атмосфере кислорода, третья – в азоте либо формовочном газе. Установлено, что для диэлектриков, полученных процессом с заключительной обработкой в атмосфере азота, абсолютная величина напряжения плоских зон на 0,42 В меньше, чем для диэлектриков, сформированных двухстадийным процессом. Это является следствием ликвидации значительной части дефектов, ответственных за наличие кулоновских центров в слое диэлектрика. Проведение фотонной обработки в атмосфере азота при высоких температурах способствует протеканию процессов перестройки структуры слоя диэлектрика. Для изоляторов, полученных трехстадийным процессом с заключительной обработкой в N₂, по сравнению с диэлектриками, сформированными двухстадийным процессом, наблюдается увеличение электрической прочности и напряжения пробоя на 1 В и 3,3 МВ/см соответственно. Рост электрической прочности указывает на релаксацию упругих напряжений деформированных связей и компенсацию оборванных связей как в диэлектрике, так и на его границе с Si в процессе высокотемпературной фотонной обработки. Положительное влияние на прочность диэлектрика также будет оказывать пассивация атомами азота дефектов на границе раздела диэлектрик/полупроводник.

Ключевые слова: метод быстрой термообработки, диэлектрик затвора, трехстадийный процесс, напряжение плоских зон, электрическая прочность, напряжение пробоя, концентрация азота.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Ковальчук Н.С., Омельченко А.А., Пилипенко В.А., Солодуха В.А., Демидович С.А., Колос В.В., Филипеня В.А., Шестовский Д.В. Исследования электрофизических свойств тонких подзатворных диэлектриков, полученных методом быстрой термообработки. Доклады БГУИР. 2022; 20(4): 44-52.

RESEARCH OF ELECTROPHYSICAL PROPERTIES OF THIN GATE DIELECTRICS OBTAINED BY RAPID THERMAL PROCESSING METHOD

NATALLIA S. KOVALCHUK, ANNA A. OMELCHENKO, VLADIMIR A. PILIPENKO,
VITALY A. SOLODUKHA, SERGEY V. DEMIDOVICH, VLADIMIR V. KOLOS,
VIKTOR A. FILIPENIA, DMITRY V. SHESTOVSKI

JSC "INTEGRAL" – "Integral" Holding Managing Company (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 15 December 2021

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2022

Abstract. Researches of the electrophysical characteristics of gate dielectrics obtained by the rapid thermal processing (RTP) method by two-stage and three-stage processes have been carried out. Each photonic processing (stage) was carried out for 12 s at a constant power of halogen lamps and heating the wafers to a maximum temperature of 1250 °C. The first two stages of the process were carried out in an oxygen atmosphere, the third - in nitrogen or a forming gas. It was found that for dielectrics obtained by the process with final processing in a nitrogen atmosphere, the absolute value of the voltage of flat zones is 0.42 V less, than for insulators, formed by a two-stage process. This is the consequence of the elimination of a significant part of the defects, responsible for the presence of Coulomb centers in the dielectric layer. Carrying out photonic processing in anitrogen atmosphere at high temperatures of procedures for proceeding of the restructuring of the structure of the dielectric layer. For insulators obtained by a three-stage process with final processing in N₂, an increase in dielectric strength and breakdown voltage by 1 V and 3.3 MV/cm, respectively, is observed in comparison with dielectrics, obtained by a two-stage process. An increase in dielectric strength indicates relaxation of elastic stresses of deformed bonds and compensation for dangling bonds both in the dielectric and at its interface with Si during high-temperature photonic treatment. Passivation by nitrogen atoms of deformations at the dielectric/semiconductor interface will also have a positive effect on the strength of the insulator.

Keywords: rapid thermal processing method, gate dielectric, three-stage process, flat zone voltage, dielectric strength, breakdown voltage, nitrogen concentration.

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

For citation. Kovalchuk N.S., Omelchenko A.A., Pilipenko V.A., Solodukha V.A., Demidovich S.V., Kolos V.V., Filipenia V.A., Shestovski D.V. Research of Electrophysical Properties of Thin Gate Dielectrics Obtained by Rapid Thermal Processing Method. Doklady BGUIR. 2022; 20(4): 44-52.

Введение

В результате активного совершенствования элементной базы цифровой электроники все более высокие требования предъявляются к эксплуатационным параметрам и надежности кремниевых интегральных схем (ИС), основой логических элементов которых являются МОП-транзисторы. Наличие дефектов структуры как в оксиде кремния, так и на его границе раздела с Si приводит к образованию зарядовых центров и снижению электрической прочности слоя изолятора затвора МОП-транзисторов, что негативно сказывается на их функциональных параметрах [1].

Согласно [2], электрофизические свойства (надежность, наличие зарядовых центров в слое изолятора и на его границе раздела с полупроводником) оксидов, сформированных процессом быстрой термообработки (БТО), превалируют над термическими SiO₂, полученными в термодиффузионных печах. Однако стандартная длительность процесса формирования оксида кремния методом БТО составляет 60–170 с, при этом производится получение оксида только одной пластины, что затрудняет применение такого процесса крупносерийным производством [3].

Азотирование SiO₂ затвора методами нитрования (в среде NH₃, NO, NO₂), ионной имплантации либо плазмостимулированными процессами позволяет получать МОП-транзисторы

и ИС на их основе с улучшенными эксплуатационными свойствами [4]. Представляет интерес азотирование оксида кремния в атмосфере N_2 ввиду более низкой стоимости и широкого практического применения азота в производстве ИС.

На основании вышеизложенного актуальным является проведение исследований электрофизических параметров диэлектриков затвора, полученных методом БТО, фотонной обработкой секундной длительности для МДП-структур интегральных схем.

Методика проведения эксперимента

Получение диэлектриков затвора производилось на пластинах кремния ориентацией $\langle 100 \rangle$ с удельным сопротивлением $\rho = 4,5$ Ом·см, легированных примесью фосфора. На поверхности пластин предварительно формировался термический SiO_2 толщиной 100 нм, затем оксид кремния полностью стравливался, после производилась химическая очистка пластин по технологии Radio Corporation of America (RCA) согласно методике, приведенной в [5].

Получение тонких диэлектриков затвора производилось системой As-Master в стационарной атмосфере кислорода, азота либо формовочного газа ($N_2 - 97\%$, $H_2 - 3\%$) при атмосферном давлении. Пластины облучались с непланарной стороны потоками фотонов 20 галогенных ламп импульсами постоянной мощности длительностью 12 с в режиме теплового баланса. Мощность излучения ламп подбиралась предварительно, по достижению температуры фотонной обработки 1250 °С в течение 12 с при проведении тестовых процессов на аналогичных пластинах.

Температура в процессе БТО контролировалась пирометром, расположенным над центром планарной стороны пластины. Образцы охлаждались до комнатной температуры после каждой стадии фотонной обработки, последующая стадия проводилась без извлечения пластины из реактора системы As-Master. Для всех процессов две первые стадии производились в атмосфере кислорода, а заключительная фотонная обработка (при ее наличии) – в атмосфере азота либо формовочного газа.

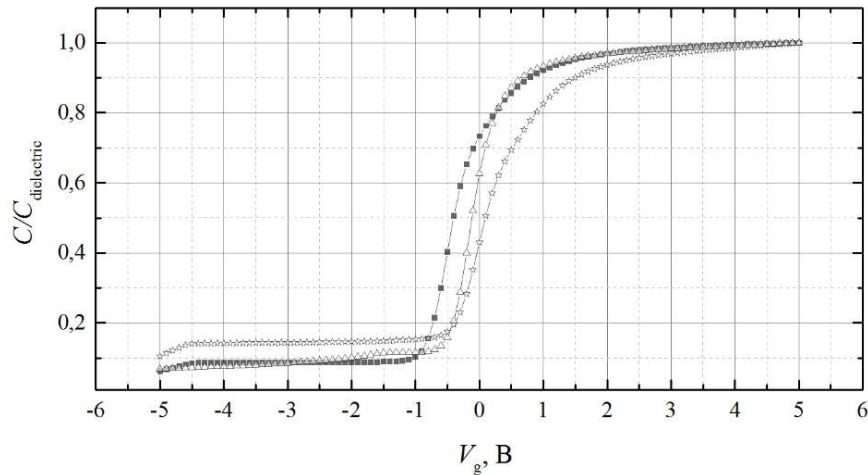
Вольт-амперные характеристики (ВАХ) и вольт-фарадные характеристики (ВФХ) получены автоматизированным измерительным комплексом HP4061A на МДП-структуре, образованной омическим контактом металлического зонда к диэлектрику на пластине кремния. ВАХ изолятора затвора измерялись с применением золотого зонда в режиме ограничения по току $I_{max} = 10$ нА, с темпом возрастания напряжения 3,4 мс/В. ВФХ регистрировались с применением индиевого зонда на частоте 1 МГц в диапазоне напряжений от -5 до 5 В с шагом 0,1 В. Значения емкости МДП-конденсатора и напряжения плоских зон извлекались из ВФХ программно, с применением средства аппаратного проектирования IC CAP 2016.01 Keysight.

Результаты и их обсуждение

Ранее было показано [6], что для диэлектриков, полученных методом БТО двумя стадиями в атмосфере кислорода и третьей в азоте, показатель преломления, измеренный на длине волны $\lambda = 632,8$ нм, составил 1,51. Для слоев изоляторов, изготовленных аналогичными режимами с последней обработкой в формовочном газе, величина показателя преломления, полученная при такой же длине волны, составила 1,48. Согласно правилу Мотта, с учетом валентностей кремния, кислорода и азота соотношение атомов в слое диэлектрика, полученном процессом БТО с заключительной обработкой в атмосфере N_2 , составило $SiO_{1,47}N_{0,35}$, что соответствует 8 % массовой доли азота в полученном слое. Для пленок $Si_xO_yN_z$ с заключительной стадией фотонной обработки в формовочном газе значения индексов составили $SiO_{1,72}N_{0,18}$, здесь массовая доля азота соответствует 4 %. Рост величины показателя преломления полученных изоляторов указывает на протекание процессов прямого азотирования оксида кремния в ходе высокотемпературной фотонной обработки в течение 12 с при максимальной температуре 1250 °С.

На рис. 1 приведены высокочастотные ВФХ МДП-структур с диэлектриками, полученными методом БТО. При сравнении характеристик в области обеднения и частично в области слабой инверсии для оксидов кремния со средним значением толщины слоев $\langle d \rangle = 10,5$ нм, сформированных двухстадийным процессом, относительно диэлектриков $\langle d \rangle = 9,0$ нм, полученных трехстадийным процессом с последней стадией обработки

в атмосфере N_2 , наблюдается сдвиг кривой вдоль оси напряжений в направлении более низких V_g .



Режимы получения диэлектриков: \blacksquare – двухстадийным процессом в атмосфере O_2 ; $-\Delta$ – трехстадийным процессом (две стадии в атмосфере O_2 и третья в формовочном газе); $-\star$ – трехстадийн процессом (две стадии в атмосфере O_2 и третья в N_2)

Dielectric production modes: \blacksquare – a two-stage process in an O_2 atmosphere; $-\Delta$ – a three-stage process (two stages in an O_2 atmosphere and a third in a forming gas), $-\star$ – a three-stage process (two stages in an O_2 atmosphere and a third in N_2)

Рис. 1. Вольт-фарадные характеристики МДП-структур с различными диэлектриками затвора, полученными методом БТО при максимальной температуре $1250^\circ C$ световыми потоком длительностью 12 с
Fig. 1. Capacitance-voltage characteristics of MIS structures with various gate dielectrics obtained by the RTP method at a maximum temperature of $1250^\circ C$ with a light flux of 12 s duration

Для изоляторов $\langle d \rangle = 9,7$ нм, полученных процессом с заключительной стадией БТО в формовочном газе, относительно образцов с обработкой в азоте также наблюдается смещение характеристик влево. Действительно, для МДП-структур на кремнии n -типа наблюдаются соответствующие изменения величины напряжения плоских зон (V_{fb}), значения которых составили: $-0,59$ В для двухстадийного процесса, $-0,28$ В и $-0,17$ В для трехстадийного процесса с заключительной обработкой в формовочном газе и азоте соответственно.

Согласно [7], для случая реальной МДП-структуры величина V_{fb} в основном будет определяться разницей работ выхода и наличием заряда в диэлектрике:

$$V_{fb} = \Delta\phi_{Me/n-Si} - Q_{dielectric} / C_{dielectric}, \quad (1)$$

где $\Delta\phi_{Me/n-Si}$ – разность химических потенциалов работы выхода электрона из металла и полупроводника n -типа, $Q_{dielectric}$ – полный заряд в диэлектрике, $C_{dielectric}$ – емкость слоя изолятора конденсатора. Возможным процессом снижения величины полного заряда в диэлектрике является ликвидация дефектов, ответственных за наличие зарядовых центров.

Согласно [8], наибольшая часть дефектов в оксиде кремния находится в положительно заряженном либо электронейтральном состоянии. Так, при проведении третьей стадии БТО возможно будут происходить процессы перестройки структуры и уплотнения диэлектрика, из-за чего активизируются процессы релаксации напряженных и перекомпенсации оборванных связей в изоляторе. В результате происходит ликвидация положительно заряженных кулоновских центров, что и будет оказывать влияние на рост величины V_{fb} .

На рис. 1 в области обеднения ВФХ наблюдаются различия наклонов характеристик для образцов, полученных с применением двух- и трехстадийных процессов БТО. Анализируя высокочастотные зависимости измеренных значений емкости, можно отметить рост наклона кривой для структур с диэлектриком, полученным процессом с обработкой в формовочном газе, что свидетельствует об уменьшении плотности поверхностных состояний. Известно, что граница раздела Si/SiO_2 представляет собой тонкий переходный слой нестехиометрического

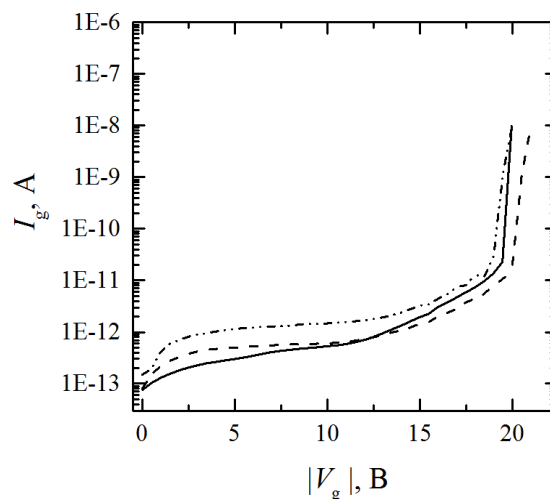
состава, при этом из-за несоответствия кристаллических решеток кремния и SiO_2 на их границе раздела образуются напряженные либо некомпенсированные связи.

При проведении третьей стадии фотонной обработки в формовочном газе непосредственное участие в процессах образования химических связей с атомами некомпенсированных связей дефектов кристаллической решетки на границе раздела диэлектрик/полупроводник будет принимать водород из атмосферы реактора системы. В связи с этим происходит пассивация электрически активных центров поверхностных состояний.

Установлено [9], что после термического отжига пластин кремния ориентацией $\langle 100 \rangle$ со слоем SiO_2 в атмосфере с добавлением H_2 при 900°C происходит пассивация дефектов класса P_b и других неклассифицированных дефектов в оксиде кремния и на его границе с Si. Также в [9] показано, что при температурах, больших 250°C , эффективна пассивация электрически активных P_b -центров молекулярным водородом. Согласно [10, 11], возможно образование гидроксильного E' -центра и мостикового водорода Si-H-Si как в оксиде кремния, так и на его границе с Si.

Дополнительным механизмом, оказывающим влияние, является встраивание атомов азота в систему Si/SiO₂. При наличии атомов азота на границе раздела будет происходить их встраивание в дефекты кристаллической решетки: атомы азота находят себе ниши в соответствии со своим ковалентным радиусом, что приводит к пассивации части электрически активных поверхностных состояний (P_{b0} -центров) [12]. Наличие атомов азота на границе раздела Si/SiO₂ вполне вероятно ввиду малой толщины оксида, подвергнутого высокотемпературной фотонной обработке.

На рис. 2 представлены ВАХ МДП-структур с диэлектриками, полученными методом БТО различными режимами. В процессе получения ВАХ при приложении сильного смещения через диэлектрик будет протекать преимущественно туннельный ток Фаулера – Нордгейма, также происходит инжекция носителей заряда в слой изолятора (рис. 1, $V_g = 14\text{--}17\text{ В}$, участки с квадратичной зависимостью). Непосредственно в диэлектрике и на его границе раздела с Si будет происходить разрыв ковалентных связей с образованием дефектов и, как следствие, появление ловушек носителей зарядов. По достижению ими достаточной концентрации сформируется проводящий канал между металлическим контактом и полупроводником, что приведет к последующему пробою барьерного слоя. В связи с этим наличие ловушек либо непрочных связей в исходном слое изолятора будет негативно сказываться на его электрической прочности.



Режимы получения диэлектриков: — — две стадии в атмосфере O_2 ; - - - - две стадии в атмосфере O_2 и третья стадия в N_2 ; - · - · - две стадии в атмосфере O_2 и третья стадия в формовочном газе
Dielectric production modes: — — two stages in an O_2 atmosphere; - - - - a three-stage process (two stages in an O_2 atmosphere and a third in N_2); - · - · - a three-stage process (two stages in an O_2 atmosphere and a third in a forming gas)

Рис. 2. Вольт-амперные характеристики МДП-структур с диэлектриками, полученными методом БТО фотонными обработками длительностью 12 с при их максимальной температуре 1250°C

Fig. 2. Current-voltage characteristics of MIS structures with dielectrics obtained by the RTP method by photonic treatments for 12 s at their maximum temperature of 1250°C

Для оксидов затвора, сформированных двухстадийным процессом, абсолютная величина напряжения пробоя составила 20 В, что на 1 В меньше по сравнению с изоляторами, подвергнутыми фотонной обработке в N₂. Электрическая прочность (E_{break}) составила 19 МВ/см и 23,3 МВ/см для двухстадийного и трехстадийного процессов с обработкой в атмосфере N₂ соответственно. Рост напряжения пробоя и электрической прочности является следствием протекания предполагаемых процессов, происходящих при проведении третьей стадии БТО в азоте: релаксация упругих напряжений деформированных связей, а также компенсации оборванных связей как в диэлектрике, так и на его границе раздела с кремнием. Азотирование SiO₂ будет положительно сказываться на величине E_{break} изолятора, так как Si_xO_yN_z является более электрически прочным, чем SiO₂. Присутствие атомов азота на границе раздела Si/SiO₂ приводит к замене напряженных либо некомпенсированных связей на более прочные с атомами азота, что является следствием роста электрической прочности для образцов, полученных трехстадийным процессом с обработкой в азоте по сравнению с двухстадийным процессом [12].

При сравнении диэлектриков, сформированных трехстадийным методом БТО, видно, что для изоляторов с азотированием в N₂ напряжение пробоя и электрическая прочность больше на 1 В и 2,7 МВ/см соответственно. Наряду с процессами, протекающими при проведении третьей стадии процесса БТО, при высокотемпературной фотонной обработке оксида кремния в формовочном газе дополнительно протекают процессы частичного разупорядочивания структуры диэлектрика и его границы раздела с Si, что и является следствием снижения напряжения пробоя и электрической прочности. Включение атомов водорода в структуру сопровождается разрывом связей Si-O с участием мостикового кислорода, в результате чего происходит образование одновалентных -ОН групп с низкой энергией диссоциации. Похожие результаты наблюдались в работе [13]: под воздействием молекулярного водорода происходило образование Si-OH и Si-H групп в SiO₂ для мостиковых и немостиковых атомов кислорода, а также и для некомпенсированных Si- связей. Приведенные рассуждения о разупорядочивании косвенно подтверждаются более низким значением показателя преломления для диэлектриков, полученных методом БТО трехстадийным процессом с заключительной обработкой в формовочном газе по сравнению с диэлектриками, полученными с обработкой в азоте [6].

Для большинства структур при изготовлении микросхем на основе кремния в качестве затвора МДП-транзисторов применяется поликремний. Под воздействием горячих электронов при смещении Фаулера – Нордгейма будет происходить высвобождение водорода с последующим образованием некомпенсированной связи атома Si (дефект класса P_b). Такой процесс может происходить на границах раздела: Si (активная область)/SiO₂ и поликремний-SiO₂, что будет сопровождаться образованием дефектов на этих поверхностях. Стоит отметить, что высвобождение водорода на границе раздела поликремний-SiO₂ и его диффузия через тонкий слой оксида могут оказывать влияние на концентрацию некомпенсированных дефектов класса P_b на границе раздела Si/SiO₂ [14]:



В работе [15] установлено, что под действием горячих электронов будет происходить диссоциация Si-H и SiO-H комплексов с образованием некомпенсированных связей Si- и SiO-. Также авторами [15] показано, что изначально будут распадаться именно водородосодержащие комплексы, затем под воздействием более высокоэнергетических носителей будет происходить разрыв связей ≡Si-O-Si≡ и ≡Si-Si≡. Горячие электроны, инжектированные в диэлектрик, могут высвобождать атомы водорода, в результате чего будет происходить образование как некомпенсированных связей в оксиде кремния (в том числе и E'-центров), так и поверхностных состояний, в большинстве своем это пассивированные ранее атомами водорода P_b-центры, которые расположены в переходных слоях оксида кремния и на границе раздела Si/SiO₂.

Заключение

В ходе проведения исследований вольт-амперных и вольт-фарадных характеристик диэлектриков затвора, полученных методом БТО фотонными обработками пластин длительностью 12 с при максимальной температуре 1250 °С двухстадийным процессом

в атмосфере кислорода и трехстадийным процессом (две первых стадии в O_2 , третья в N_2 либо формовочном газе) для МДП-транзисторов интегральных схем сделаны следующие выводы:

Установлено, что абсолютная величина напряжения плоских зон на 0,42 В больше для диэлектриков, полученных двухстадийным процессом, по сравнению с диэлектриками, полученными трехстадийным процессом с заключительной обработкой в атмосфере азота, что является следствием снижения концентрации заряженных центров в диэлектрике. Проведение третьей стадии фотонной обработки при высоких температурах способствует процессам перестройки структуры, при этом происходит компенсация оборванных связей в слое диэлектрика.

Показано, что величины напряжения пробоя и диэлектрической прочности для диэлектриков, полученных трехстадийным процессом с заключительной обработкой в азоте, больше на 1 В и 3,3 МВ/см соответственно, чем для оксидов, изготовленных двухстадийным процессом. Результаты указывают на релаксацию упругих напряжений деформированных связей и компенсацию оборванных связей как в диэлектрике, так и на его границе с Si в процессе третьей стадии высокотемпературной фотонной обработки. Положительное влияние на прочность изолятора также будет оказывать пассивация атомами азота дефектов на границе раздела диэлектрик/полупроводник.

Для диэлектриков с заключительной обработкой в формовочном газе напряжение пробоя и электрическая прочность меньше на 1 В и 2,7 МВ/см соответственно, чем для диэлектриков, полученных трехстадийным процессом с обработкой в атмосфере азота. При фотонной обработке в формовочном газе дополнительно будут происходить процессы разупорядочивания структуры вследствие образования гидроксильных групп в системе диэлектрик – полупроводник, сопровождаемых разрывом связей Si-O с участием мостикового кислорода и образованием одновалентных -ОН групп.

Список литературы

1. Deleonibus S. *Electronic Devices Architectures for the NANO-CMOS Era*. Boca Rotation: CRC Press; 2019.
2. Fair R.B. *Rapid thermal processing: science and technology*. Boston: Academic Press; 1993.
3. Borisenko V.E. Hesketh P.J. *Rapid Thermal Processing of Semiconductors*. New York: Springer Science+Business Media; 1997.
4. Красников Г.Я. *Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП-транзисторов*. Москва: Техносфера; 2011.
5. Nishi Y., Doering R. *Handbook of semiconductor manufacturing technology*. Boca Raton: CRC press; 2008.
6. Ковальчук Н.С., Омельченко А.А., Пилипенко В.А. Формирование подзатворного диэлектрика нанометровой толщины методом быстрой термообработки. *Доклады БГУИР*. 2021;19(4):103-112. DOI: 10.35596/1729-7648-2021-19-4-103-112.
7. Sze S.M., Lee M.K. *Semiconductor Devices: Physics and Technology*. New York: John Wiley & Sons Singapore Pte. Limited; 2012.
8. Белоус А.И., Солодуха В.А., Шведов С.В. *Космическая электроника*. Книга 1. Москва: Техносфера; 2015.
9. Nalwa H.S. *Handbook of surfaces and interfaces of materials, five-volume set*. San Diego: Elsevier; 2001.
10. Fleetwood D.M. Border traps and bias-temperature instabilities in MOS devices. *Microelectronics Reliability*. 2018;80:266-277. DOI: 10.1016/j.microrel.2017.11.007.
11. Grasser T. *Noise in Nanoscale Semiconductor Devices*. Cham: Springer Nature; 2020.
12. Оджаев В.Б., Панфиленко А.К., Петлицкий А.Н. Влияние ионной имплантации азота на электрофизические свойства подзатворного диэлектрика силовых МОП-транзисторов. *Журнал Белорусского государственного университета. Физика*. 2020;3:55-64. DOI: 10.33581/2520-2243-2020-3-55-64.
13. Vitiello M., Lopez N., Illas F., Pacchioni G. H_2 Cracking at SiO_2 Defect Centers. *The Journal of Physical Chemistry A*. 2000;104(20):4674-4684. DOI: 10.1021/jp993214f.
14. Cartier E., Buchanan D.A., Dunn G.J. Atomic hydrogen-induced interface degradation of reoxidized-nitrided silicon dioxide on silicon. *Applied physics letters*. 1994;64(7):901-903. DOI: 10.1063/1.110990.
15. Cezhou Z., Desheng Z., Baohua S. Hot carrier effect — model, mechanism and effects on CV and IV characteristics in MOS structures. *Microelectronics Reliability*. 1996;36(4):493-496. DOI: 10.1016/0026-2714(96)00172-2.

References

1. Deleonibus S. *Electronic Devices Architectures for the NANO-CMOS Era*. Boca Raton: CRC Press; 2019.
2. Fair R.B. *Rapid thermal processing: science and technology*. Boston: Academic Press; 1993.
3. Borisenko V.E., Hesketh P.J. *Rapid Thermal Processing of Semiconductors*. New York: Springer Science+Business Media; 1997.
4. Krasnikov G.Ya. [*Design and technological features of submicron MOS transistors*]. Moscow: Technosphere; 2011. (in Russ.)
5. Nishi Y., Doering R. *Handbook of semiconductor manufacturing technology*. Boca Raton: CRC press; 2008.
6. Kovalchuk N.S., Omelchenko A.A., Pilipenko V.A. [Formation of a gate dielectric of nanometer thickness by rapid thermal process]. *Doklady BGUIR = Doklady BGUIR*. 2021;4:103-112. DOI: 10.35596/1729-7648-2021-19-4-103-112. (in Russ.)
7. Sze S.M., Lee M.K. *Semiconductor Devices: Physics and Technology*. New York: John Wiley & Sons Singapore Pte. Limited; 2012.
8. Belous A.I., Solodukha V.A., Shvedov S.V. [*Space electronics*]. Book 1. Moscow: Technosphere; 2015. (in Russ.)
9. Nalwa H.S. *Handbook of surfaces and interfaces of materials, five-volume set*. San Diego: Elsevier; 2001.
10. Fleetwood D.M. Border traps and bias-temperature instabilities in MOS devices. *Microelectronics Reliability*. 2018;80:266-277. DOI: 10.1016/j.microrel.2017.11.007.
11. Grasser T. *Noise in Nanoscale Semiconductor Devices*. Cham: Springer Nature; 2020.
12. Odzaev V.B., Panfilenko A.K., Pyatlitski A.N. [Influence of ion implantation of nitrogen on the electrophysical properties of the gate dielectric of power MOS transistors]. *Zhurnal Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta. Fizika = Journal of the Belarusian State University. Physics*. 2020;3:55-64. DOI: 10.33581/2520-2243-2020-3-55-64. (in Russ.)
13. Vitiello M., Lopez N., Illas F., Pacchioni G. H₂ Cracking at SiO₂ Defect Centers. *The Journal of Physical Chemistry A*. 2000;104(20):4674-4684. DOI: 10.1021/jp993214f.
14. Cartier E., Buchanan D.A., Dunn G.J. Atomic hydrogen-induced interface degradation of reoxidized-nitrided silicon dioxide on silicon. *Applied physics letters*. 1994;64(7):901-903. DOI: 10.1063/1.110990.
15. Cezhou Z., Desheng Z., Baohua S. Hot carrier effect – model, mechanism and effects on CV and IV characteristics in MOS structures. *Microelectronics Reliability*. 1996;36(4):493-496. DOI: 10.1016/0026-2714(96)00172-2.

Вклад авторов

Ковальчук Н.С., Пилипенко В.А., Солодуха В.А., Колос В.В. осуществили постановку задачи для проведения исследования, участвовали в обсуждении результатов.

Демидович С.А. провел изготовление образцов, участвовал в обсуждении результатов.

Омельченко А.А., Филипеня В.А. провели измерения, участвовали в обсуждении результатов.

Шестовский Д.В. провел изготовление образцов, подготовил аналитический обзор по тематике, провел анализ и систематизацию полученных результатов, подготовил рукопись статьи.

Authors' contribution

Kovalchuk N.S., Pilipenko V.A., Solodukha V.A., Kolos V.V. carried out the formulation of the research problem, participated in the discussion of the results.

Demidovich S.V. carried out the obtaining of samples, participated in the discussion of the results.

Omelchenko A.A., Filipenia V.A. measured the samples, participated in the discussion of the results.

Shestovski D.V. completed the obtaining of samples, produced an analytical review on the subject, analyzed and systematized the results, prepared the manuscript of the article.

Сведения об авторах

Ковальчук Н.С., к.т.н., доцент, первый заместитель главного инженера ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ».

Омельченко А.А., инженер ГЦ «Белмикрoанализ» ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ».

Пилипенко В.А., д.т.н., профессор, член-корр. НАН Беларуси, зам. директора по научному развитию Государственного центра «Белмикрoанализ» ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ».

Солодуха В.А., д.т.н., ген. директор ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ».

Демидович С.А., ведущий инженер отраслевой лаборатории новых технологий и материалов ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ».

Колос В.В., к.ф.-м.н., начальник отраслевой лаборатории новых технологий и материалов ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ».

Филипеня В.А., ведущий инженер ГЦ «Белмикрoанализ» ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ».

Шестовский Д.В., инженер-технолог отдела перспективных технологических процессов ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ».

Адрес для корреспонденции

220108, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. Казинца, 121 а,
ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга ОАО «ИНТЕГРАЛ»;
тел. +375-17-318-37-41;
e-mail: office@bms.by
Пилипенко Владимир Александрович

Information about the authors

Kovalchuk N.S., Cand. of Sci., Assistant Professor, First Deputy Chief Engineer of the JSC “INTEGRAL” – “INTEGRAL” Holding Managing Company.

Omelchenko A.A., Engineer of the «Belmicroanalysis» State Center of the JSC “INTEGRAL” – “INTEGRAL” Holding Managing Company.

Pilipenko V.A., Dr. of Sci. (Tech.), Professor, Corr. Member of the NAS of Belarus, Deputy Director for Scientific Development of the «Belmicroanalysis» State Center of the JSC “INTEGRAL” – “INTEGRAL” Holding Managing Company.

Solodukha V.A., Dr. of Sci. (Tech.), General Director of the JSC “INTEGRAL” – “INTEGRAL” Holding Managing Company.

Demidovich S.A., Leading Engineer at the New Technologies and Materials Industrial Laboratory of the JSC “INTEGRAL” – “INTEGRAL” Holding Managing Company.

Kolos V.V., Cand. of Sci., Acting Chief of the New Technologies And Materials Industrial Laboratory of the JSC “INTEGRAL” – “INTEGRAL” Holding Managing Company.

Filipenia V.A., Leading Engineer at the «Belmicroanalysis» State Center of the JSC “INTEGRAL” – “INTEGRAL” Holding Managing Company.

Shestovski D.V., Engineer-Technologist at the Advanced Technological Processes Department of the JSC “INTEGRAL” – “INTEGRAL” Holding Managing Company.

Address for correspondence

220108, Republic of Belarus,
Minsk, Kazintsa St., 121 a,
JSC “INTEGRAL” – “INTEGRAL” Holding Managing Company;
tel. +375-17-318-37-41;
e-mail: office@bms.by
Pilipenko Vladimir Aleksandrovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2022-20-4-53-61>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.315.592; 54.057

ФОРМИРОВАНИЕ И СВОЙСТВА КОМПОЗИТНЫХ ГЕТЕРОСИСТЕМ НА ОСНОВЕ МАКРОПОРИСТОГО КРЕМНИЯ, ГРАФИТОПОДОБНОГО НИТРИДА УГЛЕРОДА И ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ

В.П. ГРЕБНЕВ, Е.Б. ЧУБЕНКО, В.П. БОНДАРЕНКО

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

Поступила в редакцию 18 января 2022

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2022

Аннотация. Показана возможность пиролитического синтеза композитных гетеросистем на основе макропористого кремния, графитоподобного нитрида углерода и широкозонных полупроводников оксида и сульфида цинка ($g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{ZnO}/\text{ZnS}$) из механической смеси тиомочевины и ацетата цинка при температуре 500 – 600 °С. Исследование полученных материалов методами сканирующей электронной микроскопии и энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии показало равномерное заполнение макропористого кремния композитом $g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{ZnO}/\text{ZnS}$ с образованием сплошной композитной пленки на поверхности. Фотолюминесценция образцов контролируется температурой синтеза. Ее увеличение приводит к сдвигу максимума свечения в диапазон больших энергий с 544 на 516 нм. Установлено, что фотокаталитическая активность композитных гетеросистем, полученных при меньшей температуре, выше, что обусловлено более развитой морфологией поверхности и меньшей шириной запрещенной зоны. Полученные материалы могут быть использованы для создания фотокаталитических покрытий и функциональных слоев оптоэлектронных приборов.

Ключевые слова: графитоподобный нитрид углерода, оксид цинка, сульфид цинка, макропористый кремний, фотолюминесценция, фотокатализ, сканирующая электронная микроскопия, очистка воды.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарности. Работа выполнена в рамках задания 1.4 ГПНИ Республики Беларусь «Материаловедение, новые материалы и технологии» и гранта Министерства образования для магистрантов. Авторы выражают благодарность Д.В. Жигулину за проведение исследований образцов методом сканирующей электронной микроскопии и энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии.

Для цитирования. Гребнев В.П., Чубенко Е.Б., Бондаренко В.П. Формирование и свойства композитных гетеросистем на основе макропористого кремния, графитоподобного нитрида углерода и полупроводниковых соединений. Доклады БГУИР. 2022; 20(4): 53-61.

FORMATION AND PROPERTIES OF HETEROSYSTEMS BASED ON POROUS SILICON, GRAPHITIC CARBON NITRIDE, AND SEMICONDUCTOR COMPOUNDS

VADIM P. GREBNEV, EUGENE B. CHUBENKO, VITALY P. BONDARENKO

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

Submitted 18 January 2022

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2022

Abstract. The possibility of pyrolytic synthesis of composite heterosystems based on macroporous silicon, graphitic carbon nitride and wide band semiconductors zinc oxide and zinc sulfide ($g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{ZnO}/\text{ZnS}$) from a mechanical mixture of thiourea and zinc acetate at 500 – 600 °C was shown. The obtained material study by scanning electron microscopy and energy dispersive X-ray spectroscopy showed a uniform filling of macroporous silicon with the composite $g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{ZnO}/\text{ZnS}$ with the formation of a continuous composite film on the surface. The photoluminescence of the samples was controlled by the synthesis temperature. Increase of photoluminescence leads to shift of luminescence maximum in high energy range from 544 to 516 nm. It was found that photocatalytic activity of composite heterosystems obtained at a lower temperature is higher due to more developed surface morphology and smaller bandgap width. The materials obtained can be used to create photocatalytic coatings and functional layers of optoelectronic devices.

Keywords: graphitic carbon nitride, zinc oxide, zinc sulfide, macroporous silicon, photoluminescence, photocatalysis, scanning electron microscopy, water purification.

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

Gratitude. The work was carried out as part of task 1.4 of the State Scientific Research Institute of the Republic of Belarus “Material Science, New Materials and Technologies” and grant of the Ministry of Education for master students. The authors also express their gratitude to D. Zhigulin for conducting study of the samples by scanning electron microscopy and energy dispersive X-ray spectroscopy.

For citation. Grebnev V.P., Chubenko E.B., Bondarenko V.P. Formation and Properties of Heterosystems Based on Porous Silicon, Graphitic Carbon Nitride and Semiconductor Compounds. *Doklady BGUIR*. 2022; 20(4): 53-61.

Введение

В настоящее время фотокатализ считается одной из наиболее привлекательных и перспективных технологий для прямого сбора, преобразования и хранения возобновляемой солнечной энергии и широкого спектра других экологических применений. С момента появления первых публикаций в области фотоэлектрохимического производства водорода и разложения воды [1–3] гетерогенный фотокатализ стал также важной технологией для расщепления CO_2 , дезинфекции и проведения селективных химических превращений органических веществ [4, 5]. Следует отметить растущий интерес к использованию полупроводников в качестве фотокатализаторов для различных применений.

Одним из наиболее перспективных фотокаталитических материалов является графитоподобный нитрид углерода ($g\text{-C}_3\text{N}_4$) – не содержащий металлов органический полупроводник, состоящий из атомов азота и углерода, имеющий множество потенциальных применений для решения энергетических и экологических задач [6, 7]. Фотокаталитические свойства $g\text{-C}_3\text{N}_4$ могут быть улучшены путем комбинации с другими полупроводниковыми материалами для реализации так называемой Z-схемы, в которой происходит более эффективное разделение фотоиндуцированных носителей заряда [8–10]. Оксид цинка (ZnO) и сульфид цинка (ZnS) – полупроводники с большой шириной запрещенной зоны, обладающие энергетической структурой, подходящей для проведения гетерогенного фотокатализа, создания эффективных светоизлучающих устройств ультрафиолетового диапазона, а также многих

других применений [11, 12]. Создание гетероструктур на основе $g\text{-C}_3\text{N}_4$ с использованием этих широкозонных полупроводников позволит расширить спектральный диапазон поглощения и фотолюминесценции, повысить фотокаталитическую активность и получить гетероструктуры с новыми гибридными свойствами.

С другой стороны, для создания электронных устройств на основе $g\text{-C}_3\text{N}_4$ требуется разработка подходов к изготовлению покрытий из $g\text{-C}_3\text{N}_4$ на твердых подложках. Одним из подходящих материалов, обеспечивающих высокую адгезию, является пористый кремний [13]. Однако до настоящего времени было опубликовано лишь несколько работ, посвященных синтезу композитов на основе $g\text{-C}_3\text{N}_4$ и пористого кремния [14, 15]. Поэтому целью данной работы являлось изучение процесса пиролитического синтеза, структурных, оптических и фотокаталитических свойств композитных материалов на основе макропористого кремния и гетеросистем, включающих $g\text{-C}_3\text{N}_4$ и цинксодержащие полупроводники ZnO и ZnS.

Методика проведения эксперимента

В качестве подложки для формирования композитов $g\text{-C}_3\text{N}_4$ использовали пластины монокристаллического кремния p -типа проводимости с удельным сопротивлением 12–24 $\Omega\cdot\text{см}$ и кристаллографической ориентацией (100). Слой макропористого кремния формировали путем электрохимического анодирования. Перед анодированием поверхность образцов размером 3×3 см, вырезанных из кремниевой пластины, химически очищали в насыщенном растворе дихромата калия в концентрированной серной кислоте ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 + \text{H}_2\text{SO}_4$), а затем погружали в 4,5 % водный раствор плавиковой кислоты (HF) для удаления оксида кремния. После этого образцы помещали во фторопластовую электрохимическую ячейку. В ячейку заливали электролит, состоящий из HF (45 %) и диметилсульфоксида (ДМСО), находящихся в объемном соотношении 10:46. Анодирование проводили в течение 20 мин в гальваностатическом режиме при плотности анодного тока 8 mA/cm^2 .

Композиты на основе $g\text{-C}_3\text{N}_4$ получали по описанной ранее методике [9, 10, 16] путем пиролитического разложения тиомочевины и ацетата цинка, смешанных в равной пропорции по весу. 0,1 г смеси исходных веществ запечатывали вместе с кремниевой подложкой внутри алюминиевого конверта, помещали в закрытый керамический тигель и отжигали в муфельной печи Naberterm L9/12/P300 при различных температурах от 500 до 600 $^\circ\text{C}$. Скорость нагрева составляла 5 $^\circ\text{C}/\text{мин}$. Образцы выдерживали при заданной температуре в течение 30 мин.

Исследование морфологии образцов проводили методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на микроскопе Hitachi S-4800. Атомный состав образцов анализировали методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (EDX) на спектрометре Bruker QUANTAX 200. Спектры фотолюминесценции исследовали при комнатной температуре на спектрофотометре SOLAR TII MS7504i, оснащенный CCD-камерой Proscan HS101 в качестве детектора. Для возбуждения фотолюминесценции использовали ксеноновую лампу мощностью 1 кВт. Узкие монохроматические линии выделяли из широкого спектра излучения лампы при помощи двойного монохроматора SOLAR TII DM160. Для возбуждения фотолюминесценции использовали свет с длиной волны 345 нм.

Для исследования фотокаталитической активности композиты помещали в чашку Петри с водным раствором метиленового синего ($\text{H}_2\text{O} + \text{C}_{16}\text{H}_{18}\text{ClN}_3\text{S}$) в концентрации 10^{-5} М объемом 50 мл. До облучения раствор с образцом выдерживали в течение 120 мин в темноте для определения уровня абсорбции красителя. Далее чашку Петри с раствором и образцом облучали светом ксеноновой лампы мощностью 1 кВт. Пробы объемом 1,5 мл изымались из раствора каждые 20 мин. Общая продолжительность выдержки под освещением составляла 200 мин. Фотокаталитическую активность рассчитывали по изменению интенсивности поглощения раствора метиленового синего на длине волны 665 нм, измеренной на спектрофотометре Proscan MC121.

Результаты и их обсуждение

Микрофотографии поперечного скола и поверхности образцов композитного материала, полученного при различной температуре, представлены на рис. 1, 2. Фотографии показывают, что толщина сформированного слоя макропористого кремния составляет 5–8 мкм. На всех образцах в порах и на поверхности пористого слоя образовался плотный материал, который является продуктом разложения смеси тиомочевины и ацетата цинка. На образце, прошедшем обработку при температуре 500 °С, толщина слоя на поверхности не превышает 100–200 нм. Поверхность пленки состоит из частиц со средним диаметром 1,51 мкм. В порах были сформированы столбики из композитного материала, диаметр которых совпадает с внутренним диаметром пор и составляет около 1,8 мкм. Расчетный коэффициент заполнения пор составляет около единицы.

При температуре синтеза 550 °С на поверхности слоя пористого кремния была сформирована пленка толщиной 3,13 мкм. Она состоит из кристаллических частиц с острыми краями и средним размером 1 мкм, выступающих из объемной пленки плотно упакованных более мелких частиц. Внутри каждой поры были сформированы обладающие более плотной структурой столбики из композитного материала. Расчетный коэффициент заполнения пор уменьшился до 0,86.

На поверхности слоя пористого кремния при обработке при 600 °С образовалась пленка бóльшей толщины – 4,17 мкм. Средний размер частиц, образующих пленку на поверхности, составляет не более 100 нм. В случае образца, полученного при температуре 600 °С, коэффициент заполнения пор снизился до 0,8, столбики композитного материала внутри пор обладают более рыхлой структурой, чем у полученных при меньшей температуре синтеза образцов.

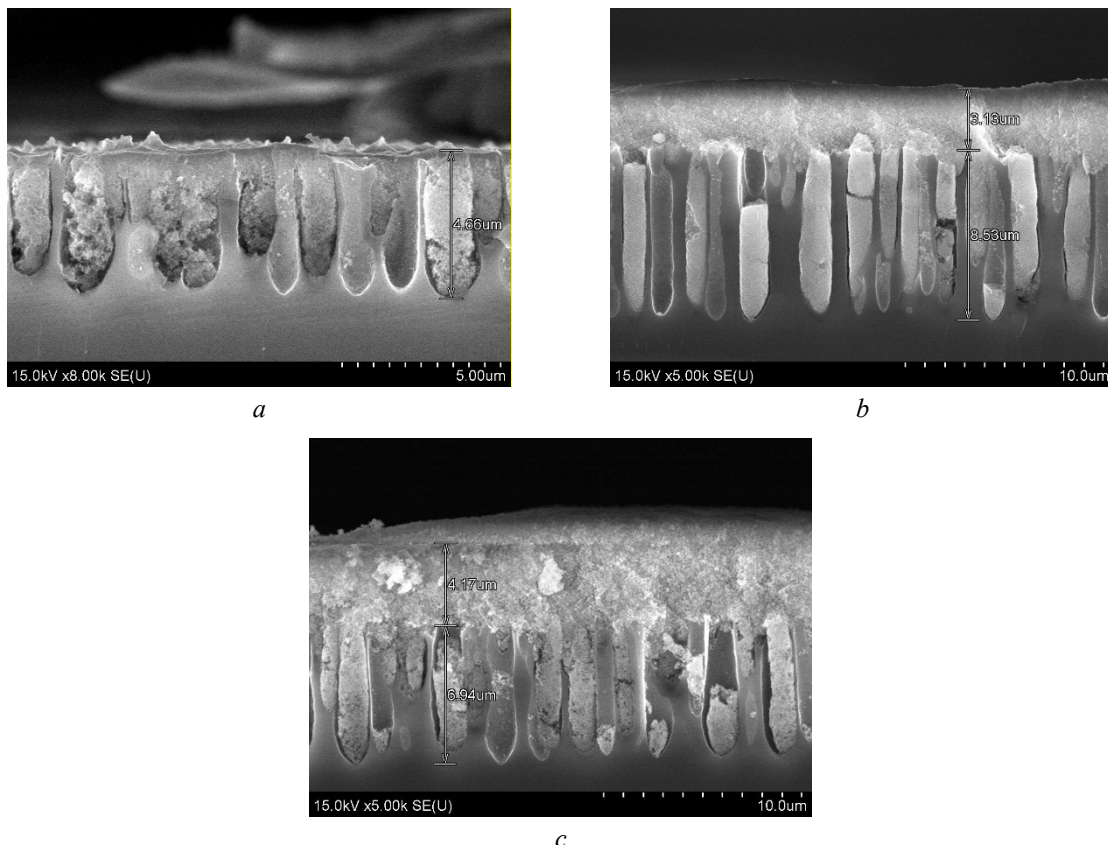


Рис. 1. Микрофотографии поперечного скола образцов, полученных пиролитическим разложением тиомочевины и ацетата цинка при различных температурах: *a* – 500 °С; *b* – 550 °С; *c* – 600 °С
Fig. 1. Cross-sectional micrographs of samples obtained by pyrolytic decomposition of thiourea and zinc acetate at different temperatures: *a* – 500 °С; *b* – 550 °С; *c* – 600 °С

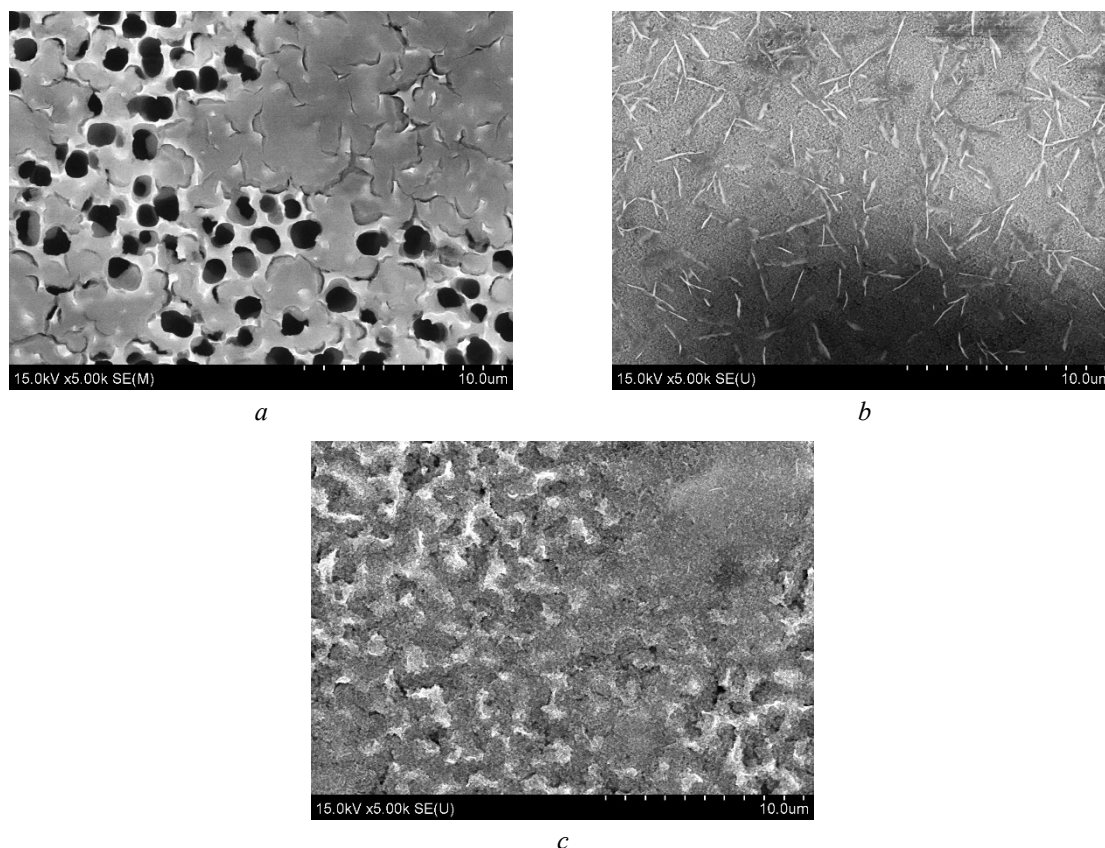


Рис. 2. Микрофотографии поверхностей образцов, полученных пиролизом тиомочевины и ацетата цинка при различных температурах: *a* – 500 °С; *b* – 550 °С; *c* – 600 °С
Fig. 2. Micrographs of surfaces of samples obtained by pyrolytic decomposition of thiourea and zinc acetate at different temperatures: *a* – 500 °С; *b* – 550 °С; *c* – 600 °С

Согласно результатам EDX анализа (табл. 1), композитный материал на поверхности слоя макропористого кремния состоит из углерода (С), азота (N), а также кислорода (O), серы (S) и цинка (Zn).

Таблица 1. Результаты EDX-анализа образцов, полученных пиролизом тиомочевины и ацетата цинка при различных температурах
Table 1. Results of EDX analysis of samples obtained by pyrolytic decomposition of thiourea and zinc acetate at different temperatures

Температура синтеза, °С	Концентрация элементного состава образцов, ат. % Concentration of the elemental composition of the samples, at %				
	C_C	C_N	C_{Zn}	C_O	C_S
500	30,28	25,42	9,96	8,19	8,21
550	17,01	2,89	30,80	8,53	27,35
600	11,09	1,43	20,57	17,84	11,01

Соотношение концентраций C_C/C_N в образце, полученном при 500 °С, составляет 1,19, соотношение $C_{Zn}/(C_O+C_S) = 0,6$. При температуре синтеза 550 °С соотношение концентраций C_C/C_N резко увеличивается до 5,89. Соотношение $C_{Zn}/(C_O+C_S)$ возрастает до 0,85. При более высокой температуре синтеза – 600 °С – соотношение концентраций C_C/C_N достигло величины 7,75. $C_{Zn}/(C_O+C_S)$ изменилось до 0,7.

Во всем рассмотренном температурном диапазоне синтеза соотношение C_C/C_N оказывается выше ожидаемого стехиометрического значения 0,75 для $g-C_3N_4$ [6], то есть наблюдается избыточная концентрация С. Обычно в образцах $g-C_3N_4$ наоборот наблюдается дефицит этого элемента. Избыточная концентрация С в образцах может быть связана с горением органических веществ внутри структуры пористого кремния, остающихся после анодирования, в частности, ДМСО.

В то же время численное значение соотношения $C_{Zn}/(C_O+C_S)$ указывает на избыток кислорода и серы по отношению к цинку. Это позволяет предположить как существование частиц ZnO и ZnS в композите, сформированном на пористой кремниевой подложке, так и на возможное легирование $g-C_3N_4$ атомами O и S.

Таким образом, исследование элементного состава полученных образцов показало, что они включают $g-C_3N_4$ со встроенными частицами ZnO и ZnS, сформированный на поверхности макропористого кремния.

Спектры фотолюминесценции композитов, полученных при различных температурах, представлены на рис. 3. Интенсивность фотолюминесценции увеличивалась в диапазоне температур синтеза от 500 до 600 °С. При этом максимумы интенсивности смещаются в более коротковолновый диапазон, соответствующий большей энергии, с 544 нм при температуре синтеза 500 °С на 516 нм при 600 °С. Поведение фотолюминесценции определяется изменением степени полимеризации и структуры запрещенной зоны $g-C_3N_4$ [10, 17]. При более высоких температурах синтеза степень полимеризации $g-C_3N_4$ увеличивается, что приводит к уменьшению ширины запрещенной зоны [6, 10, 17], однако одновременно с этим происходит и расслаивание $g-C_3N_4$ с выделением отдельных доменов моноатомной толщины, в которых проявляются квантоворазмерные эффекты, приводящее к росту энергии запрещенной зоны [18]. Доминирование второго процесса определяет смещение максимума фотолюминесценции в сторону более высоких энергий.

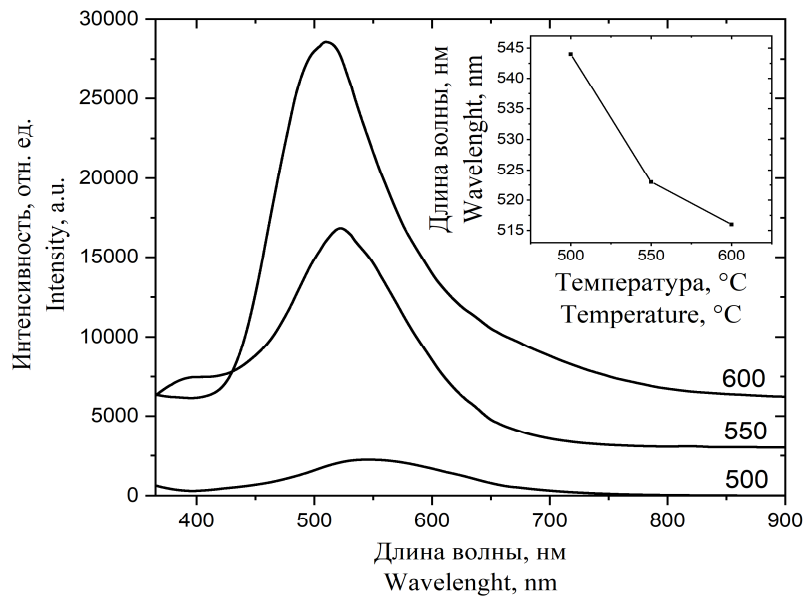


Рис. 3. Спектры фотолюминесценции образцов, полученных при различных температурах.

Температурный сдвиг максимума фотолюминесценции представлен на вставке

Fig. 3. Photoluminescence spectra of the samples obtained at different temperatures. Temperature shift of the photoluminescence maximum is presented on the inset

Спектры фотокаталитической активности образцов, исследованные при разложении метиленового синего, представлены на рис. 4. Нулевое значение на оси времени на рисунке соответствует включению источника света и началу процесса фотокатализа. Композиты, сформированные при температуре синтеза 500 и 550 °С, в отличие от образца, полученного при 600 °С, абсорбируют краситель при выдержке в растворе в темноте (интервал времени – 120 – 0 мин). Это может быть обусловлено тем, что поверхность образца, сформированного при 600 °С, покрыта более толстой и плотной пленкой гетерокомпозиата $g-C_3N_4/ZnO/ZnS$, что не дает красителю проникать в поры макропористого кремния. Открытые «пустые» поры являются наиболее вероятной причиной абсорбции красителя образцами.

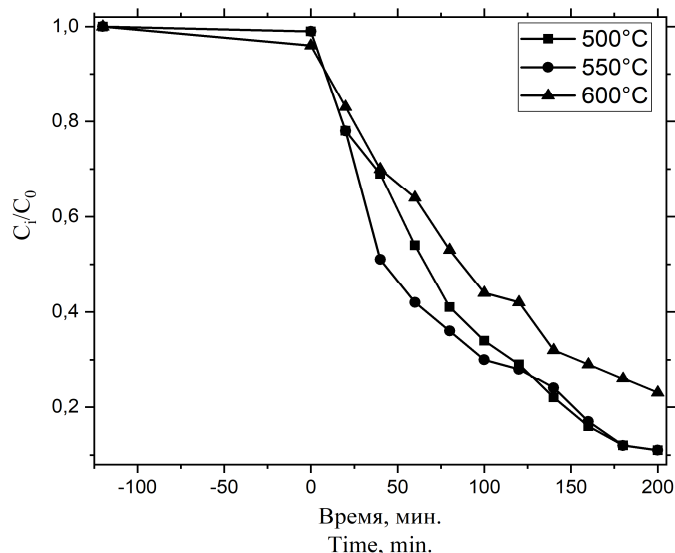


Рис. 4. Изменение относительной концентрации метиленового синего в процессе фотокаталитического разложения в присутствии гетерокомпозитов $g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{ZnO}/\text{ZnS}$, полученных при различной температуре

Fig. 4. Change in the relative concentration of methylene blue during photocatalytic decomposition in the presence of $g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{ZnO}/\text{ZnS}$ heterocomposites obtained at different temperatures

Эффективность разложения метиленового синего образцом, полученным при 600 °С, при увеличении времени выдержки в растворе при воздействии излучения меньше, чем у образцов, соответствующих температуре синтеза 500 и 550 °С. Повышение эффективности разложения красителя обусловлена большей удельной площадью поверхности образцов, полученных при меньших температурах. Пленка гетерокомпозита $g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{ZnO}/\text{ZnS}$ на их поверхности не сплошная, что открывает возможность контакта раствора с внутренним объемом пор пористого кремния и столбиками композита в них. Следует обратить внимание на то, что эффективность фотокаталитического разложения красителя в присутствии образцов, полученных при 500 и 550 °С, практически одинакова. Уменьшение фотокаталитической активности гетерокомпозитов, полученных при большей температуре синтеза, может быть также обусловлено ростом ширины запрещенной зоны $g\text{-C}_3\text{N}_4$, отмеченным по изменению спектров фотолюминесценции. Облучение белым светом широкого диапазона приводит к сокращению интегрального количества поглощенных фотонов, а значит, меньшему числу фотогенерированных носителей и, соответственно, снижению эффективности фотокатализа.

Заключение

Показана возможность синтеза композитных гетеросистем на основе $g\text{-C}_3\text{N}_4$ с полупроводниковыми частицами ZnO и ZnS на подложках макропористого кремния методом пиролитического разложения в диапазоне температур от 500 до 600 °С механической смеси тиомочевины и ацетата цинка, нанесенной на поверхность кремниевой подложки, помещенной внутрь герметичной алюминиевой оболочки в квазигерметичном пространстве керамического тигля. Установлено, что формирование композитов $g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{ZnO}/\text{ZnS}$ происходит внутри пористой структуры с образованием столбиков материала в порах, а также и на поверхности подложки. При повышении температуры синтеза максимум интенсивности фотолюминесценции композитов смещается в более коротковолновую область спектра с 544 на 516 нм, что указывает на увеличение ширины запрещенной зоны, связанное с расслоением $g\text{-C}_3\text{N}_4$. Композиты, полученные при температуре синтеза 500–550 °С, демонстрируют более высокую эффективность фотокаталитического разложения модельного красителя метиленового синего, что обусловлено увеличением удельной открытой площади по сравнению с полученными при больших температурах образцами, а также меньшей шириной запрещенной зоны. Таким образом, показано, что оптические и фотокаталитические свойства композитных гетеросистем

$g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{ZnO}/\text{ZnS}$, полученных методом пиролитического разложения, контролируются температурой их синтеза.

Полученные композитные материалы могут быть использованы для создания фотокаталитических покрытий и функциональных слоев оптоэлектронных приборов, в том числе интегрированных на одной подложке с кремниевой схмотехникой.

Работа выполнена в рамках задания 1.4 ГПНИ Республики Беларусь «Материаловедение, новые материалы и технологии» и гранта Министерства образования для магистрантов. Авторы также выражают благодарность Д.В. Жигулину за СЭМ и EDX.

Список литературы / References

1. Redemann C.E, Lucas H.J. Some derivatives of cyameluric acid and probable structures of melam, melem and melon. *Journal of the American Chemical Society*. 1940;62:842-846. DOI:10.1021/JA01861A038.
2. Teter D.M, Hemley R.J. Low-compressibility carbon nitrides. *Science*. 1996;271:53-55. DOI:10.1126/science.271.5245.53.
3. Gong Y., Li M., Wang Y. Carbon Nitride in Energy Conversion and Storage: Recent Advances and Future Prospects. *ChemSusChem*. 2015;8:931-946. DOI:10.1002/cssc.201403287.
4. Zhang X., Xie X., Wang H., Zhang J., Pan B., Xie Y. Enhanced Photoresponsive Ultrathin Graphitic-Phase C_3N_4 Nanosheets for Bioimaging. *Journal of the American Chemical Society*. 2013;135:18-21. DOI:10.1021/ja308249k.
5. Cao S., Low J., Yu J. Jaroniec M. Polymeric photocatalysts based on graphitic carbon nitride. *Advanced Materials*. 2015;27:2150-2176. DOI:10.1002/adma.201500033.
6. Thomas A., Fischer A., Goettmann F., Antonietti M., Muller J.-O., Schlogl R., Carlsson J.M. Graphitic carbon nitride materials: variation of structure and morphology and their use as metal-free catalysts. *Journal of Materials Chemistry*. 2008;18:4893-4908. DOI:10.1039/B800274F.
7. Zheng Y., Liu J., Liang J., Jaroniec M., Qiao S.Z. Graphitic carbon nitride materials: controllable synthesis and applications in fuel cells and photocatalysis. *Energy Environ. Sci.* 2012;5:6717-6731. DOI:10.1039/C2EE03479D.
8. Huang D., Chen S., Zeng G., Gong X., Zhou C., Cheng M., Xue W., Yan X., Li J. Artificial Z-scheme photocatalytic system: What have been done and where to go? *Coordination Chemistry Reviews*. 2019;385:44-80. DOI: 10.1016/j.ccr.2018.12.013.
9. Chubenko E.B., Baglov A.V., Leania M.S., Urmanov B.D., Borisenko V.E. Broad band photoluminescence of $g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{ZnO}/\text{ZnS}$ composite towards white light source. *Materials science and Engineering B*. 2021;267:115109. DOI: 10.1016/j.mseb.2021.115109.
10. Chubenko E.B., Baglov A.V., Borisenko V.E. One-Step synthesis of visible range luminescent multicomponent semiconductor composites based on graphitic carbon nitride. *Advanced Photonics Research*. 2020;1:2000004. DOI: 10.1002/adpr.202000004.
11. Janotti A., Van de Walle C.-G. Fundamentals of zinc oxide as a semiconductor. *Reports on Progress in Physics*. 2009;72:1-30. DOI:10.1088/0034-4885/72/12/126501.
12. Zhang H., Huang F., Gilbert A., Banfield J.F. Molecular Dynamics Simulations, Thermodynamic Analysis, and Experimental Study of Phase Stability of Zinc Sulfide Nanoparticles. *Journal of Physical Chemistry B*. 2003;107:13051-13060. DOI:10.1021/JP036108T.
13. Föl H., Christophersen M., Carstensen J., Hasse G. Formation and application of porous silicon. *Materials Science and Engineering R*. 2002;39:93-141. DOI:10.1016/S0927-796X(02)00090-6.
14. Zouadi N., Messaci S., Sam S., Bradai D., Gabouze N. CO_2 detection with CN_x thin films deposited on porous silicon. *Materials Science in Semiconductor Processing*. 2015;29:367-371. DOI:10.1016/J.MSSP.2014.07.023.
15. Li T. *Synthesis, characterisation and photocatalytic activity of porous silicon-based materials*. Norwich: University of East Anglia; 2017.
16. Grebnev V.P, Chubenko E.B. Synthesis of composite materials based on macroporous silicon and graphitic carbon nitride. *Actual Problems of Solid State Physics*. 2021;2:59-62.
17. Chubenko E.B., Baglov A.V., Leania M.S., Yablonskii G.P., Borisenko V.E. Structure of Photoluminescence Spectra of Oxygen-Doped Graphitic Carbon Nitride. *Journal of Applied Spectroscopy*. 2020;87:9-14. DOI: 10.1007/s10812-020-00954-y.
18. Chubenko E.B., Denisov N.M., Baglov A.V., Bondarenko V.P., Uglov V.V., Borisenko V.E. Recovery behavior of the luminescence peak from graphitic carbon nitride as a function of the synthesis temperature. *Crystal Research and Technology*. 2020;55:1900163. DOI: 10.1002/crat.201900163.

Вклад авторов

Гребнев В.П. подготовил экспериментальные образцы, участвовал в проведении анализа и систематизации полученных результатов, подготовил рукопись статьи.

Чубенко Е.Б. осуществил общее руководство работой, подготовил рукопись статьи.

Бондаренко В.П. интерпретировал и анализировал результаты.

Authors' contribution

Grebnev V.P. prepared the required samples, finalized the analysis and systematization of the results, as well as prepared a manuscript of the article.

Chubenko E.B. provided general guidance and prepared the manuscript.

Bondarenko V.P. provided assistance in interpreting the results.

Сведения об авторах

Гребнев В.П., магистрант кафедры микро- и нанoeлектроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Чубенко Е.Б., к.т.н., доцент, ведущий научный сотрудник НИЛ 4.3 НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Бондаренко В.П., к.т.н., доцент, заведующий НИЛ 4.3 НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Information about the authors

Grebnev V.P., Master's Student at the Micro- and Nanoelectronics Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Chubenko E.B., Cand. of Sci., Associate Professor, Leading Researcher of R&D Laboratory 4.3 of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Bondarenko V.P., Cand. of Sci, Associate Professor, Head of Laboratory 4.3 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. +375-29-821-80-89;
e-mail: vadim.grebnev.vg@gmail.com
Гребнев Вадим Петрович

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka St., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics;
tel. +375-29-821-80-89;
e-mail: vadim.grebnev.vg@gmail.com
Grebnev Vadim Petrovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2022-20-4-62-70>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 539.18

НИЗКОРАЗМЕРНЫЙ МАГНЕТИЗМ В СОЕДИНЕНИЯХ С РАЗЛИЧНОЙ РАЗМЕРНОСТЬЮ МАГНИТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

М.С. БАРАНОВА

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

Поступила в редакцию 16 мая 2022

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2022

Аннотация. В статье представлены результаты исследования условия формирования низкоразмерного магнитного порядка. Обоснован выбор кристалла ZnO в качестве полупроводниковой немагнитной матрицы для формирования квазиодномерных и квазиульмерных магнитных систем путем внедрения примесных атомов Cr, Mn, Fe, Co и Ni. Структурные параметры, электронные и магнитные свойства рассчитывались на атомном уровне в рамках квантово-механического моделирования, интегралы обменного взаимодействия – на микроскопическом уровне с использованием модели Гейзенберга. Определение механизмов обменного взаимодействия осуществлялось на основе выявленных зависимостей значений интеграла обменного взаимодействия от структурных и электронных свойств. Обобщены результаты исследования механизмов обменного взаимодействия в двумерных магнитных системах, формирующихся в материалах группы MAX_3 ($M = Cr, Fe, A = Ge, Si, X = S, Se, Te$). Установленные механизмы обеспечили возможность сравнения условий формирования ферромагнитного порядка в системах с различной размерностью магнитного взаимодействия, в частности показано, что ферромагнитный порядок во всех изучаемых структурах формируется за счет косвенного суперобменного взаимодействия между орбиталями разной симметрии. Установлено, что для формирования устойчивого высокотемпературного ферромагнетизма необходимо применять стратегии, направленные на усиление суперобменного взаимодействия между орбиталями разной симметрии либо уменьшение вкладов обменного взаимодействия между орбиталями одной симметрии.

Ключевые слова: *ab initio* моделирование, теория функционала плотности, наномангнетики, ферромагнетизм, антиферромагнетизм, переходные металлы, разбавленные магнитные полупроводники, структуры Ван-дер-Ваальса

Благодарности. Автор выражает благодарность канд. ф.-м. наук Данилюку А.Л. за оказанную научную консультативную помощь, канд. техн. наук Стемпицкому В.Р., под руководством которого получены основные результаты. Работа выполнялась в рамках задания 2.07 (2021–2025) ГПНИ «Материаловедение, новые материалы и технологии», заданий 2.87 (2019–2020) и 2.53 (2016–2018) ГПНИ «Физическое материаловедение, новые материалы и технологии», договоров с БРФФИ Ф20В-008 (2020–2021) и Ф13А3-024 (2013–2015), а также гранта Министерства образования.

Для цитирования. Баранова М.С. Низкоразмерный магнетизм в соединениях с различной размерностью магнитного взаимодействия. Доклады БГУИР. 2022; 20(4): 62-70.

LOW-DIMENSIONAL MAGNETISM IN COMPOUNDS WITH DIFFERENT DIMENSIONS OF MAGNETIC INTERACTION

MARYIA S. BARANAVA

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

Submitted 16 May 2022

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2020

Abstract. The results of a comparison of the exchange interaction mechanisms in low dimensional magnetic systems are presented. It has been shown that ZnO crystal may be used as a semiconductor non-magnetic matrix for the formation of quasi-one-dimensional and quasi-zero-dimensional magnetic systems by introducing impurity atoms of Cr, Mn, Fe, Co and Ni. Structural parameters, electronic and magnetic properties were calculated at the atomic level in the framework of quantum mechanical simulation. The exchange interaction integrals were calculated at the microscopic level using the Heisenberg model. The exchange interaction mechanisms were determined on the obtained dependences of the exchange interaction integral on the structural and electronic properties, as well as on the features of the low-dimensional magnetic systems partial density of electronic states. The results of studying the exchange interaction mechanisms in two-dimensional magnetic systems formed in materials of the MAX₃ (M= Cr, Fe, A = Ge, Si, X= S, Se, Te) group are summarized. The established mechanisms made it possible to compare the conditions for the formation of a ferromagnetic order in systems with different dimensions of magnetic interaction. The ferromagnetic order in all the structures under study is formed due to the indirect superexchange interaction between orbitals of different symmetry. Strategies aimed at enhancing the superexchange interactions between orbitals of different symmetry or attenuating the contributions of the exchange interaction between orbitals of the same symmetry contribute to the formation of stable high-temperature ferromagnetism.

Keywords: *ab initio* simulation, density functional theory, nanomagnets, ferromagnetism, antiferromagnetism, transition metals, dilute magnetic semiconductors, van der Waals structures

Gratitude. The author are grateful to Dr. A. Danilyuk for scientific consultations, and Dr. V. Stempitsky under whose supervision the main results were obtained. The study was carried out within the framework of the State Programs of Scientific Investigations such as task 2.07 (2021–2025) of the “Materials Science, New Materials and Technologies”, tasks 2.87 (2019-2020) and 2.53 (2016-2018) of the “Physical Materials Science, New Materials and Technologies”, contracts with the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research № F20V-008 (2020-2021) and F13AZ-024 (2013-2015), as well as a grant from the Ministry of Education.

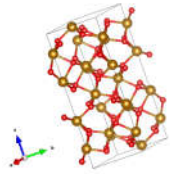
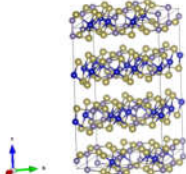
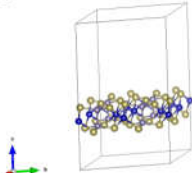
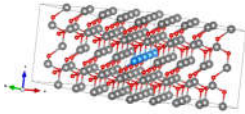
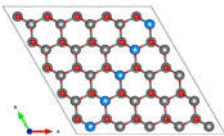
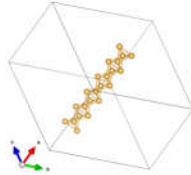
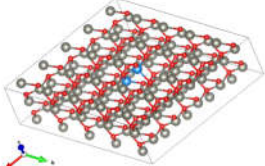
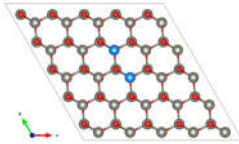
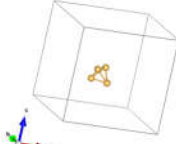
For citation. Baranava M.S. Low-dimensional Magnetism in Compounds with Different Dimensions of Magnetic Interaction. Doklady BGUIR. 2022; 20(4): 62-70.

Введение

Магнитные эффекты лежат в основе принципа функционирования современных спинтронных устройств и имеют большой потенциал применения в области разработки новых электронных приборов микро- и наноэлектроники [1]. Реализация таких устройств требует применения низкоразмерных магнитных систем, которые обладают механической гибкостью, чувствительностью к внешним воздействиям, возможностью интеграции в различные гетероструктуры на различных типах подложек, большой восприимчивостью физических свойств к структуре, внешним полям и т. д. [2]. Твердое тело можно считать низкоразмерной магнитной системой, если магнитное взаимодействие ограничено по одному или более пространственных направлений. Низкоразмерные магнитные системы, такие как димеры, цепочки и т. п., можно наблюдать в объемных немагнитных матрицах (табл. 1).

Серьезной проблемой низкоразмерного магнетизма является сохранение дальнего магнитного порядка при конечной температуре. Упорядоченное пространственное расположение магнитных моментов атомов в твердом теле возможно, когда значение магнитной энергии атомной системы превышает значение характерной энергии тепловых флуктуаций $k_B T$ [3].

Таблица 1. Разновидности магнитных систем в соответствии с размерностью
(D – размерность магнитного взаимодействия)
Table 1. Types of magnetic systems in accordance with the dimension
(D is the dimension of the magnetic interaction)

D	Геометрическая размерность твердого тела		
	Объемные кристаллы	Двумерные кристаллы	Одномерные наноструктуры
3D	<p>Объемная магнитная система</p>  <p>Fe_2O_3</p> <p>Магнитное взаимодействие по всем направлениям</p>	—	—
2D	<p>Квазидвумерная магнитная система</p>  <p>CrGeTe_3</p> <p>Магнитное взаимодействие в плоскости слоев, отсутствие магнитного взаимодействия между плоскостями</p>	<p>Двумерная магнитная система</p>  <p>CrGeTe_3</p> <p>Магнитное взаимодействие в плоскости монослоя</p>	—
1D	<p>Квазиодномерная магнитная система</p>  <p>$\text{Zn}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}$</p> <p>Магнитные цепочки и спиновые лестницы в немагнитной матрице</p>	<p>Квазиодномерная магнитная система</p>  <p>$\text{Zn}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}$</p> <p>Магнитные цепочки и спиновые лестницы в немагнитном монослое</p>	<p>Одномерная магнитная система</p>  <p>Au</p> <p>Магнитные шнуры</p>
0D	<p>Квазинульмерная магнитная система</p>  <p>$\text{Zn}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}$</p> <p>Магнитные димеры и магнитные атомы в немагнитной матрице</p>	<p>Квазинульмерная магнитная система</p>  <p>$\text{Zn}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}$</p> <p>Магнитные димеры и магнитные атомы в немагнитном монослое</p>	<p>Нульмерная магнитная система</p>  <p>Au</p> <p>Магнитные наночастицы</p>

Магнитная энергия твердого тела включает в себя энергетические вклады, связанные с эффектами, протекающими на различных физических уровнях. На микроскопическом уровне,

где исследуются взаимодействия между атомами, рассматривают энергетические вклады от магнитокристаллической анизотропии и обменного взаимодействия. Энергия магнитокристаллической анизотропии может быть на несколько порядков ниже энергии обменного взаимодействия, но данный энергетический вклад ответственен за формирование коллинеарного магнетизма. Энергия обменного взаимодействия способствует формированию высокоспинового состояния. Важной задачей является поиск способов повышения магнитной энергии в атомных системах, а ее решение возможно в рамках двух основных направлений исследований: управление физическими механизмами, которые вносят вклад в магнитную энергию атомной системы, например, управление энергией магнитной анизотропии с помощью варьирования составом твердого тела, изменения параметров решетки или ограничения размерности [4, 5]; второй подход – поиск новых материалов, которые изначально обладали бы высоким значением магнитной энергии.

Сильная магнитная анизотропия, наряду с обменным взаимодействием ферромагнитного типа, наблюдается в низкоразмерных магнитных системах [6]. Идеальный оксид цинка (ZnO) является немагнитным кристаллом с высокой степенью растворимости примесей переходных металлов. Примеси типа Fe, Co, Ni, Cr, Mn встраиваются в узлы кристаллической решетки, заменяя атомы Zn, что обеспечивает формирование квазиодномерных и квазинульмерных магнитных систем (димеров, цепочек) [7, 8]. Атомные системы типа MAX_3 ($M = Cr, Fe$, $A = Ge, Si$, $X = S, Se, Te$) проявляют сильную перпендикулярную магнитную анизотропию в объемной фазе и являются кристаллами Ван-дер-Ваальса, что позволяет получать двумерные низкоразмерные магнитные системы [9]. Однако магнитной энергии, которой обладают данные системы, недостаточно для наблюдения высокотемпературного ферромагнетизма, который позволит использовать эти материалы в устройствах спинтроники.

В статье представлены результаты исследования условий формирования магнитного порядка в низкоразмерных магнитных системах, сформированных в ZnO, а также обобщены результаты исследования доминирующих механизмов обменного взаимодействия в MAX_3 . Выполнено сравнение особенностей механизмов, которые протекают в различных низкоразмерных магнитных системах и выдвинуты рекомендации, способствующие формированию устойчивого высокотемпературного ферромагнитного (ФМ) порядка.

Методика проведения моделирования

Интеграл обменного взаимодействия (J) и энергия магнитной анизотропии являются микроскопическими магнитными параметрами, которые характеризуют магнитные свойства атомной системы на соответствующем физическом уровне. Данные параметры могут быть рассчитаны с применением специально разработанного подхода, учитывающего размерность магнитного взаимодействия, состав и структуру атомной системы и основанного на квантово-механическом моделировании и модельном гамильтониане Гейзенберга.

Моделирование зависимостей магнитных свойств от структурных и электронных свойств на разных физических уровнях состоит из трех основных этапов.

На атомном уровне выполняется квантово-механическое моделирование в рамках теории функционала плотности (DFT) [10] с использованием программного комплекса VASP [11]. На микроскопическом уровне на основе данных квантово-механического моделирования проводятся расчеты трех параметров: интеграла обменного взаимодействия, энергии магнитокристаллической анизотропии и коэффициента спиновой поляризации. Интегралы обменного взаимодействия рассчитываются с использованием модельного гамильтониана Гейзенберга [12]. Энергия магнитокристаллической анизотропии (E_{MAE}) для ФМ материалов рассчитывается как разница между значением полной энергии твердого тела, где все спины направлены вдоль оси легкого намагничивания, и значением полной энергии твердого тела, где все спины направлены вдоль оси трудного намагничивания. Коэффициенты спиновой поляризации оценивались исходя из плотностей электронных состояний для электронов с различными направлениями спинов вблизи уровня Ферми. На макроскопическом уровне могут быть рассчитаны такие параметры, как температура Кюри, намагниченность насыщения,

константа обменного взаимодействия и константа Блоха и пр. Для их расчета необходимо значение интеграла обменного взаимодействия. Для оценки потенциала использования представленных соединений с переходными элементами в работе рассчитана температура Кюри (T_c) с помощью подхода, описанного в [13].

Результаты исследования низкоразмерных магнитных систем

Для исследования низкоразмерных магнитных систем в объемной матрице диамагнитного ZnO сформированы квазиодномерные магнитные цепочки с пространственным направлением магнитного взаимодействия: в плоскости (001) – *Цепочка*||, в плоскости (110) – *Цепочка*⊥, а также квазинульмерные магнитные димеры с пространственным направлением магнитного взаимодействия: в плоскости (001) – *Димер*||; в плоскости (110) – *Димер*⊥.

Для определения механизмов обменного взаимодействия в низкоразмерных магнитных системах на основе ZnO выполнено квантово-механическое моделирование структурных параметров, в частности определены расстояния между атомами переходного элемента в пределах первой координационной сферы (d_{M-M}), угол между переходными элементами через вершину немагнитного иона O (α_{M-X-M}) (рис. 1).

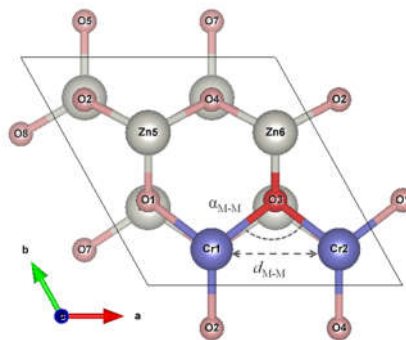


Рис. 1. Структура ZnO с примесью Cr
Fig. 1. ZnO structure with Cr impurity

Определены значения эффективного магнитного момента (μ_{eff}), проведен расчет интеграла обменного взаимодействия (J), а также для магнитных систем с ФМ порядком рассчитаны энергия магнитной анизотропии (E_{MAE}) и температура Кюри (T_c) с применением методики, описанной в [14] (табл. 2).

Таблица 2. Результаты квантово-механического моделирования магнитных свойств ZnO
Table 2. Results of quantum mechanical simulation of ZnO properties

Примесь	μ_{eff} , μ_B	J , мэВ	d_{M-M} , Å	α_{M-X-M} , °	Примесь	μ_{eff} , μ_B	J , мэВ	d_{M-M} , Å	α_{M-X-M} , °
<i>Димер</i> ⊥					<i>Димер</i>				
Cr	3,80	-0,89	2,99	91,97	Cr	3,82	-6,75	2,85	91,26
Mn	4,52	-0,84	3,17	101,50	Mn	4,60	-4,50	3,19	100,60
Fe	3,74	-0,36	2,99	95,44	Fe	3,73	-4,73	3,06	102,65
Co	2,73	-0,27	3,14	104,71	Co	2,72	-8,98	3,08	105,00
Ni	1,75	-1,47	3,05	103,84	Ni	1,74	-19,97	2,97	101,56
<i>Цепочка</i> ⊥					<i>Цепочка</i>				
Cr	3,77	6,84	3,28	98,73	Cr	3,80	-5,54	3,06	96,05
Mn	4,61	-1,13	3,06	100,67	Mn	4,58	-2,52	3,04	100,04
Fe	3,75	1,44	3,16	98,66	Fe	3,75	-11,53	3,03	95,96
Co	2,73	3,47	3,14	103,41	Co	2,73	-2,01	3,03	103,94
Ni	1,76	-2,51	3,15	104,63	Ni	1,74	-23,86	3,01	103,95

Установлено, что ФМ порядком обладают *Цепочки*⊥ из магнитных ионов Cr, Fe и Co. Остальные низкоразмерные системы обладают АФМ порядком.

Согласно полученным результатам увеличение расстояния между магнитными ионами d_{M-M} приводит к росту абсолютного значения J , то есть к ослаблению антиферромагнитного (АФМ) обменного взаимодействия. Сильная зависимость от расстояния между магнитными ионами, указывает на прямое АФМ обменное взаимодействие посредством d -орбиталей ионов примеси.

Другим видом обменного взаимодействия является косвенное, которое может осуществляться через электроны проводимости или посредством гибридизации d -орбиталей переходных элементов с p -орбиталями кислорода (суперобменное взаимодействие).

Свободные атомы, которые выступают в качестве примеси, имеют следующие конфигурации внешних электронных оболочек: Cr $[Ar] 3d^5 4s^1$, Mn $([Ar] 3d^5 4s^2)$, Fe $([Ar] 3d^6 4s^2)$, Co $([Ar] 3d^7 4s^2)$ и Ni $([Ar] 3d^8 4s^2)$. Согласно рассчитанному эффективному магнитному моменту μ_{eff} (табл. 2) ионы переходных элементов являются двухвалентными, как и ион Zn. То есть два электрона валентной s -орбитали примеси участвуют в образовании молекулярной орбитали, а электроны на d -орбиталях формируют μ_{eff} . Эффективный магнитный момент ионов имеет небольшое отклонение от целочисленного значения, что объясняется ковалентностью химических связей в исследуемых атомных системах. Таким образом, электроны d -орбиталей преимущественно локализованы на магнитных ионах. Следовательно, косвенный обмен через электроны проводимости не вносит существенного вклада в формирование результирующего обменного взаимодействия.

На существование суперобменного взаимодействия указывает зависимость значения интеграла обменного взаимодействия от угла α_{M-X-M} между магнитными ионами: увеличение угла приводит к ослаблению АФМ. В этом случае необходимо доказать гибридизацию атомных орбиталей переходных элементов и O. Для этих целей получены парциальные плотности электронных состояний (ППЭС). На рис. 2 представлены ППЭС d -орбиталей Zn, p -орбиталей O и d -орбиталей примеси Co для Цепочки \perp . Уровень Ферми соответствует нулю по оси абсцисс.

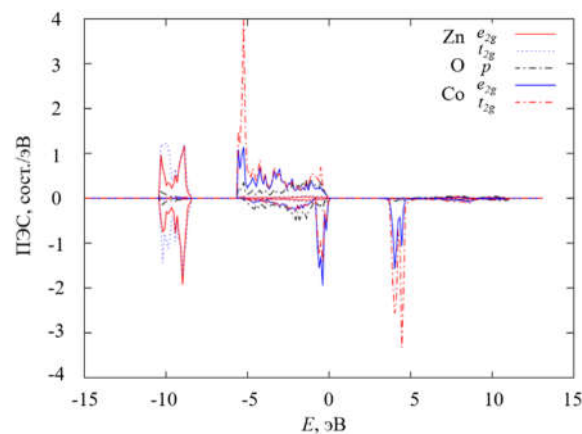


Рис. 2. Парциальные ПЭС для Цепочки \perp , состоящей из атомов Co

Fig. 2. Partial DOS for Chain \perp of Co atoms

Полученные ППЭС свидетельствуют о гибридизации d -орбитали примеси с p -орбиталями кислорода для энергий от -5 до 0 эВ. Поскольку ионы примеси проявляют степень окисления, равную $+2e$, следовательно, d -электроны ионов не участвуют в образовании связывающей орбитали. Молекулярная связывающая орбиталь образуется за счет sp^3 гибридных атомных орбиталей переходных элементов и p -орбиталей кислорода. Этот вывод справедлив для всех атомных систем, кроме тех, в состав которых входит Cr. Особенности его электронной оболочки, а именно один электрон на внешней s -орбитали, приводят к задействованию одного электрона с d -орбитали для формирования молекулярной связывающей орбитали. Этот факт подтверждается рассчитанными значениями магнитного момента (табл. 2): для атомных систем с Cr значение μ_{eff} составляет от $3,77 \mu_B$ до $3,80 \mu_B$ при электронной конфигурации невозбужденного атома $[Ar] 3d^5 4s^1$.

Кристаллическая структура кристалла ZnO с низкоразмерными магнитными системами характеризуется тетраэдрическими комплексами, состоящими из центрального элемента – иона

переходного металла (Cr^{2+} , Fe^{2+} , Co^{2+} , Ni^{2+}) и лигандов O. Если низкоразмерная магнитная система расположена в плоскости (001), как на рис. 3, *a*, то тетраэдрические комплексы будут иметь одинаковую ориентацию в декартовой системе координат, следовательно, орбитали одной симметрии соседних магнитных ионов будут расположены вдоль одного направления. Если низкоразмерная магнитная система расположена в плоскости (110), как на рис. 3, *b*, то пространственное расположение тетраэдрических комплексов приводит к взаимодействию между собой орбиталей различной симметрии. В конечном итоге структурные различия определяют доминирующий механизм обменного взаимодействия, т. е. объясняют тот факт, что ФМ порядок, наблюдается только в *Цепочках* \perp из ионов Co, Cr и Fe, остальные объекты изучения являются антиферромагнетиками.

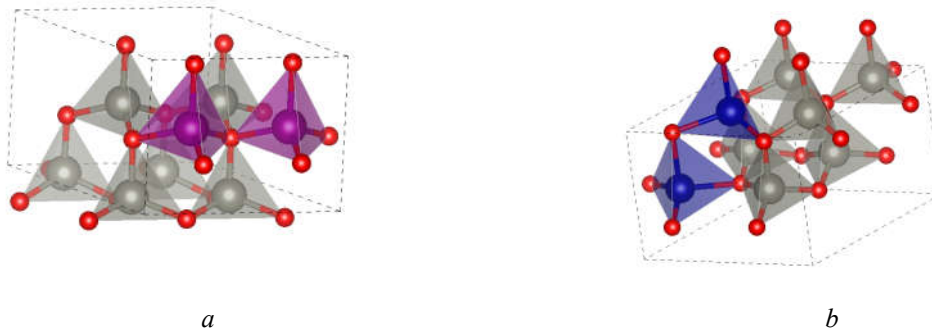


Рис. 3. Пространственное расположение тетраэдрических комплексов в низкоразмерных магнитных системах: *a* – *Цепочка* \parallel и *Димер* \parallel ; *b* – *Цепочка* \perp и *Димер* \perp

Fig. 3. Spatial arrangement of tetrahedral complexes in low-dimensional magnetic systems: *a* – *Chain* \parallel and *Dimer* \parallel ; *b* – *Chain* \perp and *Dimer* \perp

Таким образом, благодаря установленной гибридизации *d*-орбиталей переходных элементов и *p*-орбиталей кислорода O косвенное суперобменное взаимодействие осуществляется между:

1) частично заполненными орбиталями одной симметрии, что приводит к усилению АФМ порядка. Данный механизм является доминирующим в *Цепочках* \parallel и *Димерах* \parallel , так как их пространственное расположение способствует взаимодействию орбиталей одной симметрии. Также данный механизм объясняет сильный АФМ порядок в низкоразмерных магнитных системах с Ni;

2) частично заполненными (пустыми для низкоразмерных магнитных систем с Cr) и полностью заполненными (частично заполненными для низкоразмерных магнитных систем с Cr) *d*-орбиталями разной симметрии (J_{pe}). Данный механизм является доминирующим в низкоразмерных магнитных системах *Цепочках* \perp и *Димерах* \perp с Cr, Fe и Co, что обусловлено пространственным расположением, которое способствует лучшему взаимодействию между орбиталями разной симметрии, а также строением внешней электронной оболочки переходных ионов, которое приводит к параллельному расположению результирующих спинов.

Рассчитанный интеграл обменного взаимодействия (табл. 2) будет состоять из вкладов, характеризующих каждый установленный механизм:

$$J = -J_{ee} - J_{pd} + J_{pe} + J_{RKKI}, \quad (1)$$

где J_{ee} – вклад прямого АФМ обменного взаимодействия, J_{pd} – вклад АФМ суперобменного взаимодействия между электронами, расположенными на орбиталях одной симметрии, J_{pe} – вклад АФМ суперобменного взаимодействия между электронами, расположенными на орбиталях разной симметрии, J_{RKKI} – вклад косвенного ФМ обменного взаимодействия через электроны проводимости.

В *Цепочке* \perp из ионов Co $E_{MAE} = 3,47$ мэВ, что является наибольшим значением для всех изучаемых объектов. Ось легкого намагничивания направлена вдоль низкоразмерной магнитной структуры (вдоль кристаллографического направления [001]). В *Цепочках* \perp из ионов Cr и Fe E_{MAE} составляет 0,29 и 0,02 мэВ соответственно, то есть коллинеарный магнетизм неустойчив. *Цепочка* \perp из ионов Cr имеет $T_c = 287,56$ К, что является самым высоким значением, поскольку для *Цепочек* \perp из Fe и Co полученные значения составляют 59,84 и 86,57 К соответственно. Все остальные структуры

обладают АФМ порядком. Таким образом, для формирования устойчивого высокотемпературного ФМ и повышения температуры Кюри необходимо увеличить вклад J_{pe} с использованием стратегий, направленных на увеличение вероятности косвенного суперобменного взаимодействия между орбиталями разной симметрии. Одной из них является одноосная деформация вдоль оси c . С другой стороны, возможно уменьшить вклады J_{ee} и J_{pd} с использованием воздействий, направленных на ослабление гибридизации с p -орбиталями кислорода O, или уменьшение расстояния между магнитными ионами, например, с помощью деформации сжатия вдоль осей a или b .

Ранее получено, что обменное взаимодействие в двумерных магнитных системах MAX_3 ($M=Cr$, $A=Ge, Si$, $X=S, Se, Te$) осуществляется по механизмам прямого и косвенного обменов [15]. Результаты моделирования подтверждают перспективность использования материалов типа MAX_3 в спинтронных приложениях: ось легкого намагничивания лежит перпендикулярно плоскости квазидвумерных слоев, коэффициенты спиновой поляризации для некоторых соединений ($CrSiSe_3$ и $CrSiTe_3$) обладают высоким значением. Однако температура Кюри T_c для соединений с ФМ порядком ($CrGeSe_3$, $CrGeTe_3$, $CrSiSe_3$ и $CrSiTe_3$) находится в диапазоне от 59,22 до 180,50 К. Установлено, что суперобменное взаимодействие (J_{te}), которое осуществляется за счет перескоков электронов между молекулярной орбиталью σ , p -орбиталями промежуточного халькогена и t_{2g} атомными орбиталями второго Cr, является ФМ. АФМ прямое обменное взаимодействие (J_{kin}) осуществляется между d -орбиталями одной симметрии (t_{2g}) соседних ионов Cr. АФМ суперобменное взаимодействие (J_{tt}) осуществляется между d -орбиталями, имеющими одинаковую симметрию.

Суммарный интеграл обменного взаимодействия выражается следующим образом:

$$J = -J_{tt} - J_{kin} + J_{pe}. \quad (2)$$

Сравнение выражений (1) и (2) для результирующих интегралов обменного взаимодействия позволяет сделать следующие выводы:

– АФМ обменное взаимодействие во всех исследуемых магнитных системах осуществляется по прямому и суперобменному механизмам между d -орбиталями одной симметрии;

– ФМ взаимодействие осуществляется между орбиталями разной симметрии посредством p -орбитали халькогена (Te, S, Se) в MAX_3 и p -орбитали O в низкоразмерных магнитных системах, сформированных в ZnO.

Заключение

Результаты исследований структурных, электронных и магнитных свойств квазиодномерных и квазинульмерных магнитных систем – цепочек и димеров соответственно, сформированных в ZnO посредством включения примеси переходных металлов, позволяют определить тип и механизмы обменного взаимодействия в рассматриваемых системах. Сравнение полученных ранее результатов для двумерных магнитных систем на основе халькогенидов переходных металлов MAX_3 и результатов, полученных для ZnO, позволяет сделать вывод об условиях, необходимых для формирования устойчивого ФМ порядка и повышения температуры Кюри, которые обеспечиваются за счет применения стратегий, направленных на увеличение вероятности суперобменного взаимодействия между орбиталями разной симметрии и/или уменьшение вкладов прямого обменного взаимодействия.

Список литературы / References

1. Cortie D.L., Causer G.L., Rule K.C., Fritzsche H., Kreuzpaintner W., Klose F. Two-dimensional magnets: forgotten history and recent progress towards spintronic applications. *Advanced Functional Materials*, 2020;30(18):1901414.
2. Sierra J.F., Fabian J., Kawakami R.K., Roche S., Valenzuela S.O. Van der Waals heterostructures for spintronics and opto-spintronics. *Nature Nanotechnology*. 2021;16(8):856-868.
3. Coey John MD. *Magnetism and magnetic materials*. Cambridge university press; 2010.
4. Xiao R., Kuz'min M.D., Koepernik K., Richter M. CoIr-carbon complexes with magnetic anisotropies larger than 0.2 eV: A density-functional-theory prediction. *Applied Physics Letters*. 2010;97(23):232501.

5. Sun Y., Xiao R.C., Lin G.T., Zhang R.R., Ling L.S., Ma Z.W., Luo X., Lu W.J., Sun Y.P., Sheng Z.G. Effects of hydrostatic pressure on spin-lattice coupling in two-dimensional ferromagnetic $\text{Cr}_2\text{Ge}_2\text{Te}_6$. *Applied Physics Letters*. 2018;112(7):072409.
6. Lee J.U., Lee S., Ryoo J.H., Kang S., Kim T.Y., Kim P., Park C.H., Park J.G., Cheong H. Ising-type magnetic ordering in atomically thin FePS_3 . *Nano letters*. 2016;16(12):7433-7438.
7. Armah, E. N. A. A., Egblewogbe, M., Koffi, H. A., Yankson, A. A., Ampong, F. K., Boakye, F., Ametefee Amuzu J. K., Nkum, R. K. Solubility of Mn in ZnO crystallites synthesized using solid state techniques. *Advanced Nano Researc*. 2020;3(1):28-39.
8. Borysiewicz M.A. ZnO as a functional material, a review. *Crystals*. 2019;9(10):505.
9. Huang B., Clark G., Navarro-Moratalla E., Klein D.R., Cheng R., Seyler K.L., Zhong D., Schmidgall E., McGuire M., Cobden D., Yao W., Xiao D., Pablo Jarillo-Herrero P., Xu X. Layer-dependent ferromagnetism in a van der Waals crystal down to the monolayer limit. *Nature*. 2017;546(7657):270-273.
10. Engel E., Dreizler R.M. Density functional theory. *Theoretical and mathematical physics*. 2011:351-399.
11. Kresse G., Furthmüller J. Efficient iterative schemes for ab initio total-energy calculations using a plane-wave basis set. *Physical review B*. 1996;54(16):11169.
12. Mermin N.D., Wagner H. Absence of ferromagnetism or antiferromagnetism in one-or two-dimensional isotropic Heisenberg models. *Physical Review Letters*. 1966;17(22):1133.
13. Rassekh M., He J., Shayesteh S.F., Palacios J.J. Remarkably enhanced Curie temperature in monolayer CrI_3 by hydrogen and oxygen adsorption: A first-principles calculations. *Computational Materials Science*. 2020;183:109820.
14. Baranova M.S., Danilyuk A.L., Stempitsky V.R. Direct exchange interaction of cobalt chains in zinc oxide: model approach. *Materials Physics & Mechanics*. 2018;39(1):15-20.
15. Baranova M.S. Influence of exchange-correlation functional on the structural and electronic properties of periodic structures with transition metal atoms. *Doklady BGUIR = Doklady BGUIR*. 2021;19(8):87-91.

Сведения об авторах.

Баранова М.С., научный сотрудник НИЛ 4.4 НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Information about the authors

Baranova M.S., Researcher at R&D Lab 4.4 of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, д. 6,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники;
тел. +375 17 293 84 09;
e-mail: baranova@bsuir.by
Баранова Мария Сергеевна

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka St., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics;
tel. +375 17 293 84 09;
e-mail: baranova@bsuir.by
Baranova Maryia Sergeevna



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2022-20-4-71-79>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 681.324

ФИЗИЧЕСКИ НЕКЛОНИРУЕМЫЕ ФУНКЦИИ ТИПА АРБИТР С ЗАВЕДОМО АСИММЕТРИЧНЫМИ ПАРАМИ ПУТЕЙ

В.Н. ЯРМОЛИК, А.А. ИВАНЮК

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

Поступила в редакцию 23 декабря 2021

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2022

Аннотация. Анализируются методы построения физически неклонируемых функций (ФНФ), являющихся основной физической криптографии. Отмечается широкая применимость ФНФ типа арбитр, основанных на анализе задержек сигнала, передаваемого по двум путям. Показывается, что случайность величин задержек объясняется технологическими вариациями при изготовлении ФНФ, а их зависимость – применением однородных повторяющихся элементов, обеспечивающих симметрию путей. Как альтернатива существующим решениям в статье предлагается новый подход для построения ФНФ типа арбитр на базе заведомо асимметричных путей. В качестве источников случайности рассматриваются задержки логических элементов, показывается их многообразие и отличительные характеристики в зависимости от количества входов, на которые подается активный сигнал, и от значений на остальных входах. Предлагается методика балансировки множества пар путей ФНФ типа арбитр, заключающаяся в регулировании длительности импульсного тестового сигнала в зависимости от четырех видов асимметрии путей. Предлагаются новые структуры ФНФ типа арбитр с асимметричными парами путей. Экспериментальные исследования подтверждают возможность использования различных источников случайности в виде задержек сигнала логическими элементами.

Ключевые слова: физическая криптография, физически неклонируемые функции типа арбитр, логический элемент, временная задержка логического сигнала.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Ярмолик В.Н., Иванюк А.А. Физически неклонируемые функции типа арбитр с заведомо асимметричными парами путей. Доклады БГУИР. 2022; 20(4): 71-79.

ARBITER PHYSICAL UNCLONABLE FUNCTIONS WITH ASYMMETRIC PAIRS OF PATHS

VYACHESLAV N. YARMOLIK, ALEXANDER A. IVANIUK

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

Submitted 23 December 2021

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2022

Abstract. The methods of constructing physical unclonable functions (PUF), which are the basis of physical cryptography, are analyzed. The broad applicability of the Arbiter PUF, based on the analysis of the delays of the signal transmitted along two paths, is noted. It is shown that the randomness of the delays is explained by technological variations in the manufacturing process of PUF and their dependence on the use of homogeneous repeating elements that ensure the symmetry of the paths. As an alternative to the existing solutions, the article proposes a new approach for constructing an Arbiter PUF based on asymmetric paths. The sources of randomness as logical element delays are investigated. Their diversity and distinctive characteristics are shown depending on the number of inputs to which an active signal is supplied and the values at other inputs. A technique for balancing a set of pairs of paths of Arbiter PUF is proposed, which lays in regulating the duration of the impulse test signal depending on four types of path asymmetry. New structures of Arbiter PUF with asymmetric pairs of paths are proposed. Experimental studies confirm the possibility of using various sources of randomness in the form of signal delays.

Keywords: physical cryptography, arbiter physical unclonable functions, logic element, time delay of a logic signal.

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

For citation. Yarmolik V.N., Ivaniuk A.A. Arbiter Physical Unclonable Functions with Asymmetric Pairs of Paths. Doklady BGUIR. 2022; 20(4): 71-79.

Введение

Первое упоминание о физически неклонируемых функциях было сформулировано R. Pappu в 2001 году в работе [1] при определении физически однонаправленных функций (Physical One-Way Functions). Близкие решения, практически в то же время, предложил B. Gassend и др. при реализации кремниевых физически случайных функций (Physical Random Functions) [2]. Указанные результаты были получены исторически первыми, однако в настоящее время в основном употребляется понятие физически неклонируемых функций (ФНФ), происходящее от англоязычного словосочетания Physical Unclonable Functions (PUF).

Основным свойством ФНФ является их неклонируемость, которая достигается тем, что в процессе изготовления ФНФ невозможно создать два идентичных цифровых устройства, обладающих одинаковыми характеристиками. Вариации значений характеристик цифровых устройств обусловлены случайными колебаниями различного рода примесей в используемых материалах, геометрией и размерами линий соединений и компонент (транзисторов, сопротивлений) элементов и другими факторами, влияние на которые со стороны изготовителя затруднено либо вообще невозможно. Эти фундаментальные источники вариаций вызывают изменения в значениях характеристик элементов цифровых устройств, и в особенности их временных задержек [3, 4].

В общем случае ФНФ описываются значениями входных и соответствующих им выходных параметров (сигналов). Подобная пара, состоящая из входного физического параметра запроса (Challenge (C)) и выходного параметра ответа (Response (R)), называется парой запрос-ответ (Challenge-Response Pair (CRP)), рассматриваемой как функция $R = F(C)$ [3, 4]. Исторически первыми ФНФ являются физически неклонируемые функции типа арбитр АФНФ (Arbiter PUF), предложенные в 2002 году [5]. АФНФ оказались весьма удачным решением, основанным на различии задержек прохождения сигнала через симметричные пути цифровых устройств. На сегодняшний день существует большое множество схем АФНФ, которые отличаются как своей структурой [3–5] и областью применения [4–7], так и практической реализацией [3, 7]. При этом различие задержек сигналов является основным фактором, влияющим на свойства АФНФ. Классическая методология построения АФНФ основана на использовании пар симметричных путей. Причем симметрия пар путей во многих разновидностях ФНФ подобного вида является обязательным условием.

Основным недостатком симметрии при создании пар путей является формирование по двум путям случайных времен задержки, которые формируются при максимально идентичных условиях, чем и предопределяется их взаимная зависимость. Одинаковые условия и ограничения при получении двух случайных величин задержек негативно сказываются на свойствах АФНФ. В данной статье предлагается новый подход к построению АФНФ, который, по сравнению с известными решениями, основан на использовании заведомо несимметричных пар путей, что позволяет улучшить свойства АФНФ и их стабильность.

Анализ задержек логических элементов

При разработке различных схемотехнических решений по созданию ФНФ ключевым фактором является задержка прохождения сигнала через логический элемент. Считается, что задержка сигнала, как правило, импульсного, принимает случайное, непредсказуемое значение в рамках определенного временного интервала. Данный интервал, либо среднее значение задержки, для каждого логического элемента зависит от типа использованных в нем электронных компонент (ТТЛ, КМОП, ЭСЛ и др.), принципиальной схемы элемента, и особенностей технологического процесса его изготовления.

Главная парадигма большинства работ по ФНФ состоит в том, что изначально принимается гипотеза о фиксированном значении задержки через элемент без учета многих факторов. Эта задержка в процессе изготовления принимает случайное значение, которое остается неизменным в процессе использования ФНФ. Единственными факторами, влияющими на задержку сигнала и обсуждаемыми авторами работ по ФНФ, являются внешние факторы, такие как температура, давление, электромагнитные излучения и др., а также временной фактор, влияющий на деградацию физических и химических свойств материалов, используемых для изготовления элемента.

Придерживаясь данной парадигмы, следует отметить, что результатом изготовления даже простейшего логического элемента, такого как повторитель или инвертор, будет являться как минимум два значения задержек, принимающих произвольные значения из диапазона возможных их величин. Значения задержек фронтов (переходов) логического сигнала из 0 в 1 (Low to High (LH)) – передний фронт, либо из 1 в 0 (High to Low (HL)) – задний фронт, как правило, отличаются и в сильной степени зависят от типа электронных элементов, используемых для их изготовления. Величины этих задержек определяются на уровне 50 % размаха входного и выходного сигналов и обозначаются как $\Delta(LH)$ и $\Delta(HL)$ [8]. Обобщая значения двух задержек $\Delta(LH)$ и $\Delta(HL)$, для произвольного логического элемента определяется средняя их величина $\Delta_G = (\Delta(LH) + \Delta(HL))/2$, которая и используется при анализе и синтезе ФНФ. Большинство рассуждений авторов о случайности величины задержки через элемент либо путь оперирует задержкой Δ_G .

Исследования задержек на логических элементах чаще всего рассматриваются в режиме переключения сигнала по одному входу элемента (Single Input Switching (SIS)), изменения которого приводят к изменению выходного значения [2, 3]. Результаты исследований, приведенные в работе [8], показывают однозначную зависимость задержки прохождения сигнала через логические элементы в зависимости от активного входа, т. е. входа, на который подается активный сигнал, приводящий к изменению значения сигнала на выходе элемента. Более сложные процессы и, соответственно, зависимости задержек через логический элемент возникают в случае переключения сигналов одновременно по нескольким входам (Multi Input Switching (MIS)) [8]. Например, при одновременном переключении сигналов из 1 в 0 и, наоборот, из 0 в 1 по обоим входам двухвходового логического элемента. В общем случае показано, что, если выход m -входового КМОП логического элемента И-НЕ работает на нагрузочную емкость C_{Load} , задержка $\Delta(LH)$ распространения сигнала зависит от количества активных входов [8]. При переключении логического значения только по одному входу величина задержки $\Delta(LH)$ в m раз больше по сравнению со случаем переключения по всем m его входам. Таким образом, задержка сигнала через логический элемент зависит от пути прохождения сигнала, который определяется активным входом/входами и логическими значениями на неактивных входах/входе, а также самим входным сигналом.

На примере простейших двухвходовых элементов 2И и 2XOR с входами In1, In2 и выходом Out, рассмотрим многообразие задержек сигнала, которые в процессе изготовления принимают случайные значения и могут быть использованы при построении АФНФ.

Табл. 1 содержит описания задержек сигнала на элементах 2И и 2XOR в режиме SIS. Например, $\Delta_1(LH)$ для элемента 2XOR представляет собой задержку изменения сигнала из 0 в 1 (LH) на выходе Out при изменении входного In1 сигнала из 0 в 1 (LH) и удержании на втором входе In2 логической 1. Как видно из приведенной табл. 1, элемент 2И генерирует четыре задержки, а 2XOR восемь различных задержек, принимающих случайные значения. Элемент 2И является источником еще двух задержек, которые формируются в режиме MIS. При одновременном изменении LH или HL по входам In1 и In2 элемента 2И на его выходе Out будет происходить аналогичное изменение сигнала LH или HL.

Таблица 1. Задержки сигнала на элементах 2И и 2XOR
Table 1. Signal delays on the 2AND and 2XOR elements

2И (2AND)				2XOR							
Задержка Delay	In1	In2	Out	Задержка Delay	In1	In2	Out	Задержка Delay	In1	In2	Out
$\Delta_1(\text{LH})$	LH	1	LH	$\Delta_1(\text{LH})$	LH	0	LH	$\Delta_5(\text{HL})$	HL	0	HL
$\Delta_2(\text{HL})$	HL	1	HL	$\Delta_2(\text{HL})$	LH	1	HL	$\Delta_6(\text{LH})$	HL	1	LH
$\Delta_3(\text{LH})$	1	LH	LH	$\Delta_3(\text{LH})$	0	LH	LH	$\Delta_7(\text{HL})$	0	HL	HL
$\Delta_4(\text{HL})$	1	HL	HL	$\Delta_4(\text{HL})$	1	LH	HL	$\Delta_8(\text{LH})$	1	HL	LH

Использование случайного значения задержки сигнала при проектировании пути АФНФ, без учета его специфики и особенностей, может приводить к наличию закономерностей и, соответственно, ухудшению вероятностных свойств АФНФ. С другой стороны, учет и использование детерминированных зависимостей задержек сигнала через элемент может существенно увеличить разброс этих задержек и, соответственно, увеличить стабильность функционирования АФНФ. Теория и практика по созданию ФНФ, в том числе и АФНФ, состоит в одновременном обеспечении приемлемого уровня вероятностных свойств при одновременном сохранении достаточной стабильности функционирования [3–7].

Построение ФНФ типа арбитр

В общем случае при реализации АФНФ изготавливаются два функционально и топологически идентичных электрических пути, представляющих собой последовательно подключенные элементы и их межсоединения. Очевидно, что оба пути будут иметь близкие значения величин задержек распространения по ним сигналов, однако они будут принципиально разными в силу технологических вариаций в процессе производства. Процедура измерения задержек заключается в одновременной подаче на входы обоих путей сигнала и определении, на выходе которого из них сигнал появится быстрее. Классической схемой ФНФ типа арбитр является схема, состоящая из n последовательно подключенных пар двухвходовых мультиплексоров (MUX) [3, 4, 7]. Адресные входы обоих мультиплексоров MUX_1 и MUX_2 каждой пары объединяются и используются в качестве одного из входов для задания значения бита $c_j \in \{0, 1\}$, $j \in \{0, 1, 2, \dots, n-1\}$, запроса C , принимающего одно из 2^n возможных значений. Запрос C в схеме АФНФ формирует два пути таким образом, что если $c_j = 0$ для j -й ступени АФНФ, то для построения первого пути используется мультиплексор MUX_1 , а для второго – MUX_2 , а при $c_j = 1$ – наоборот. Каждая пара путей имеет общий вход, а выходы первого и второго пути подключены соответственно к D входу D -триггера и к его синхронизирующему входу Clk . В случае АФНФ D -триггер является арбитром и перед проведением эксперимента устанавливается в исходное состояние, например, нулевое. Для конкретного запроса C генерируется ответ $R \in \{0, 1\}$ как результат эксперимента по определению, по какому из путей выбранной запросом C пары путей (первому или второму) задержка входного сигнала меньше [3, 4, 7].

При формировании пары путей с различными значениями задержек все из n пар мультиплексоров MUX_1 и MUX_2 вносят свои задержки в каждый из путей. Двухвходовой мультиплексор MUX_1 , также как и MUX_2 , является источником двух случайных величин задержки сигнала в зависимости от используемого его информационного входа, определяемого битом запроса c_j . В силу топологических и физических особенностей изготовления цифровых устройств можно считать, что значения двух случайных задержек, полученных на одном мультиплексоре, имеют существенно большую взаимную зависимость, чем две случайные величины, полученные из различных физических источников (MUX_1 и MUX_2). Важно отметить, что если MUX_1 используется для построения первого пути, то MUX_2 – для второго, и наоборот, в зависимости от значения бита запроса, что и является методологической основой выравнивания задержек сигнала по двум путям [3–7].

Как альтернатива известным решениям при создании АФНФ, предлагается подход для построения АФНФ с изменяемыми задержками без переключения путей. В отличие от классических схем АФНФ, бит запроса определяет (выбирает) только значение задержки

по каждому пути, через базовый элемент пути. Два пути заранее определены последовательным подключением базовых элементов, примеры которых приведены на рис. 1. В данном случае выбирается не пара путей, как это реализуется в классических АФНФ, а величины задержек по двум независимым путям. Например, для двухвходовых мультиплексоров (рис. 1, *a*) значение бита запроса определяет вход мультиплексора, по которому тестовый сигнал передается на его выход, выбирая таким образом одно из возможных значений задержек сигнала. Применение элементов 2XOR также позволяет выбирать одно из двух значений задержки по заранее построенным двум путям, но уже по другому принципу (рис. 1, *b*). Формирование 0 или 1 по второму входу XOR в виде запроса c_j управляет (выбирает одно из двух значений) задержкой по первому входу.

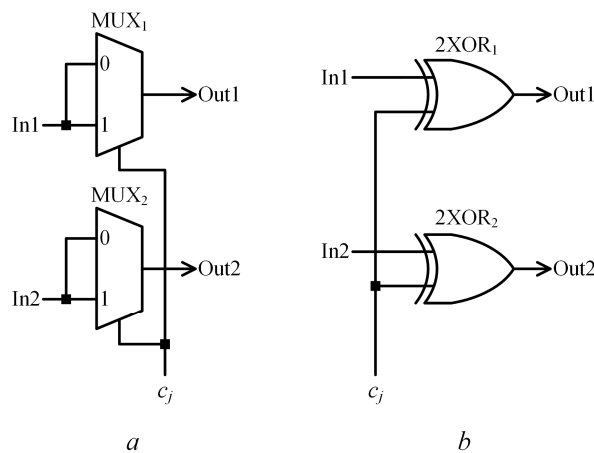


Рис. 1. Базовые элементы для построения АФНФ
Fig. 1. Basic elements for building an APUF

И в первом (рис. 1, *a*), и во втором случаях (рис. 1, *b*) значение запроса $C = c_0, c_1, c_2 \dots, c_{n-1}$ определяет временную задержку прохождения сигнала по каждому из двух путей АФНФ, построенной из n последовательно соединенных базовых элементов. В качестве базовых элементов для построения АФНФ могут использоваться и другие элементы с разным количеством входов, например, мультиплексоры или элементы XOR, но с большим количеством входов.

Построение АФНФ с двумя физически независимыми путями и управляемыми задержками прохождения сигнала по ним улучшает их вероятностные свойства за счет уменьшения зависимости величин задержек по двум путям. Однако физическая независимость двух путей как источника двух случайных величин может приводить к их асимметрии, когда один из путей может оказаться быстрее второго для большинства значений запроса C , следовательно, одно из значений ответов R будет преобладать над другим. Асимметрия путей требует их балансировки, заключающейся в выравнивании задержек по обоим путям.

Балансировка путей АФНФ

С учетом девиации задержки для конкретного пути, в зависимости от запроса C , можно определить диапазон Δ ее изменения как разницу между максимальной и минимальной величинами задержки. Идеальным является случай, когда среднее значение задержки по первому пути равняется такому же значению по второму пути, диапазон Δ разброса значений задержек по обоим путям велик, а сами задержки представляют собой случайные независимые значения. Упрощенно это показано на рис. 2, *a* в виде девиации фронтов тестового импульса, одновременно поданного на входы обоих путей и прошедшего эти пути с конкретными задержками. Условно первый путь обозначается символом D , а второй – обозначается как Clk , что соответствует обозначениям входов D -триггера, выступающего в роли арбитра. Выход $Out1$ (см. рис. 1) первого пути подключается к D входу арбитра, а $Out2$ второго – ко входу Clk . Процедура арбитража выполняется во временном интервале, определяемом диапазоном Δ , в котором соотношение передних фронтов тестового импульса и определяет

значение ответа R . В идеальном случае переходы из нуля в единицу на выходах путей должны происходить в одном и том же временном диапазоне (см. рис. 2, *a*).

Приведенное требование является идеализированным и на практике, как правило, недостижимо. Чаще встречаются ситуации, когда диапазоны фронтов, в рассмотренном случае передних фронтов импульса, по обоим путям для всех значений запросов не пересекаются либо лишь частично пересекаются. Это означает, что ответ R на любой запрос всегда будет один и тот же, либо какой-то из них, 0 или 1, будет заметно преобладать. На рис. 2 приведены четыре вида асимметрии. Для 1, 2 и 4 видов асимметрии, представленных соответственно на рис. 2, *b*, *c* и *e*, ответ R для любого запроса C всегда принимает значение 0. При наличии асимметрии третьего типа, показанной на рис. 2, *d*, ответ равняется 1.

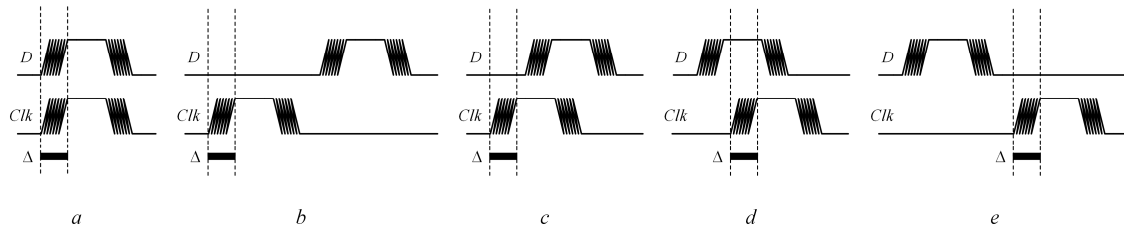


Рис. 2. Девиация задержек по двум путям: *a* – симметричный случай; *b*, *c*, *d*, *e* – случаи асимметрии
Fig. 2. Delay deviation along two paths: *a* – symmetric case; *b*, *c*, *d*, *e* – cases of asymmetry

Примеры асимметрии путей ФНФ типа арбитр показывают необходимость выравнивания задержек по множеству пар путей (балансировки путей), генерируемых запросами C , которое выполняется настройкой параметров тестовых сигналов. В качестве основных инструментов для балансировки необходим генератор перехода сигнала из нуля в единицу (LH) и генератор импульсных тестовых сигналов с изменяемой длительностью импульса. Кроме того, в качестве арбитра применяется D -триггер с управляемым входом синхронизации, который выполняет запись информации по положительному фронту (LH) в одном режиме, а по отрицательному (HL) – во втором. Не нарушая симметрии путей, по обоим входам классического D -триггера, используемого в качестве арбитра, подключаются элементы 2XOR. Элемент 2XOR по D входу триггера выполняет функцию повторителя, а по Clk входу – повторителя для обеспечения синхронизации в режиме LH и инвертора в режиме HL.

Сама процедура балансировки будет состоять из двух этапов. Первый этап заключается в определении типа асимметрии пар путей, а второй – непосредственно в балансировке задержек путей. Тип асимметрии первоначально определяется по результатам генерирования тестового сигнала, формирующего переход LH для различных запросов. В случае наличия одного из четырех типов асимметрии для всех запросов будет сформирован повторяющийся ответ 0 или 1. Нулевое значение ответа свидетельствует о том, что путь, подключенный к входу Clk арбитра, имеет меньшую задержку из двух путей, определенных запросом. Для импульсного тестового сигнала рассматриваются два режима: один – для записи ответа по переднему фронту импульса (LH), а второй – по заднему (HL). Результаты, полученные при подаче тестовых сигналов для определения типа асимметрии пар путей, формируемых запросами, приведены в табл. 2.

Таблица 2. Результаты тестирования пар путей при определении типа их асимметрии
Table 2. Results of path pairs testing when determining the type of their asymmetry

Тестовый сигнал Test signal		Тип асимметрии / Asymmetry type			
		1	2	3	4
Переход LH		0	0	1	1
Импульс	LH	0	0	1	0
	HL	0	1	0	0

Как видно из приведенной таблицы, все четыре типа асимметрии различимы и однозначно идентифицируются по результату процедуры определения типа асимметрии. Процедура балансировки путей заключается в изменении длительности (увеличении или уменьшении) тестового импульса. Это необходимо для совмещения временных интервалов изменения сигналов на обоих входах D -триггера. По сути, достигается такая же ситуация,

как и для идеального случая, проиллюстрированного на рис. 2, *a*, когда переключения на *D* входе триггера и его управляющем входе *Clk* происходят в одном временном диапазоне.

Устранение асимметрии достигается путем совмещения различных фронтов одного и того же импульса, проходящего по двум путям. Например, для асимметрии второго типа с уменьшением длительности импульса временной интервал LH по первому пути (*D*) совмещается с временным интервалом HL по второму пути (*Clk*), как это показано на рис. 3, *a*.

Второй пример на этом же рисунке иллюстрирует балансировку путей для четвертого типа асимметрии путем увеличения длительности тестового импульса. В этом случае совмещается временной диапазон изменения HL сигнала по первому пути с временным интервалом изменений LH по второму пути.

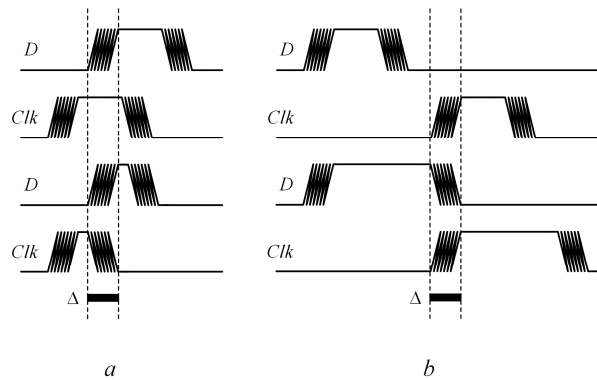


Рис. 3. Балансировка путей: *a* – для второго типа асимметрии; *b* – для четвертого типа асимметрии
Fig. 3. Balancing paths: *a* – for the second type of asymmetry; *b* – for the fourth type of asymmetry

Экспериментальная часть

Для подтверждения гипотезы, выдвинутой авторами, о различных задержках на элементах в режиме SIS была спроектирована схема, состоящая из 8 последовательно подключенных элементов 2XOR, охваченных обратной связью, что представляет собой кольцевой осциллятор [3, 4]. Кроме того, в цепи обратной связи был реализован дополнительный элемент 2И, обеспечивающий «старт/стопный» режим генератора. Для обеспечения генерирования импульсов на свободные входы элементов 2XOR необходимо подать запрос *C* с нечетным числом единиц. При этом период генерируемой импульсной последовательности будет зависеть от конкретного значения запроса. Для оценки численных значений периодов была спроектирована аппаратно-программная система на основе платы быстрого прототипирования Digilent Zybo Z7 с программируемой логической интегральной схемой (ПЛИС) Xilinx Zynq XC7Z010-1CLG400C.

В ходе первого эксперимента были оценены значения периодов $P(C_i)$ генерируемых сигналов при всех запросах C_i , удовлетворяющих условию $w(C_i) = 2k - 1, \forall k = 1, \dots, n/2$, где w – вес Хемминга вектора запроса C_i . Анализ полученных данных свидетельствует о различии всех полученных значений $P(C_i)$, что подтверждает значимость и неравенство задержек $\Delta(LH)$ и $\Delta(HL)$ для элементов 2XOR.

В ходе второго эксперимента была подтверждена гипотеза об асимметрии двух путей для ФНФ типа арбитр и необходимости балансировки подобных путей. Для этого на одном кристалле ПЛИС были размещены два идентичных генератора из первого эксперимента с общим управлением и общей входной шиной запросов *C*. Как и в предыдущем эксперименте, были оценены зависимости значений периодов $P1(C_i)$ и $P2(C_i)$ сигналов, вырабатываемых двумя генераторами, от подаваемых на их входы значений запросов C_i . На рис. 4 приведены значения периодов $P1(C_i)$ и $P2(C_i)$ и значения их математических ожиданий μ_1 и μ_2 для всех *C*.

Если предположить, что первый генератор представляет собой путь АФНФ, который подключен к *D* входу арбитра, а второй – к *Clk* входу, то это будет соответствовать асимметрии третьего типа (см. рис. 3). При этом ширина диапазона изменения периода $P1(C_i)$ составляет 0,133 нс, а периода $P2(C_i)$ – 0,115 нс, и эти диапазоны не пересекаются.

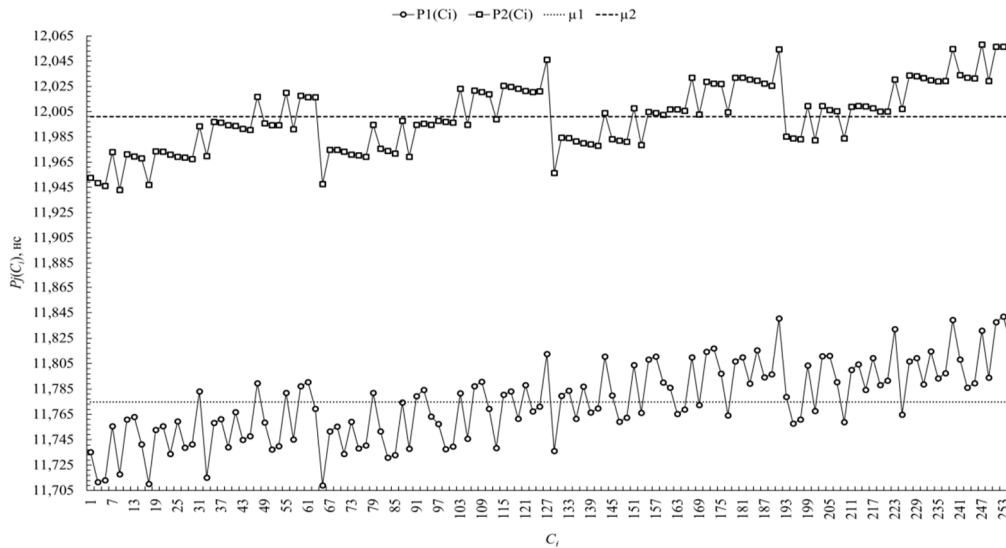


Рис. 4. Графики зависимостей $P1(C_i)$ и $P2(C_i)$
Fig. 4. $P1(C_i)$ and $P2(C_i)$ dependency plots

Отклонения от значений μ_1 и μ_2 и определяют значения суммарных задержек на всех структурных элементах генераторов в зависимости от значения запроса. Вычтем из полученных данных $P1(C_i)$ и $P2(C_i)$ для двух генераторов значения μ_1 и μ_2 соответственно и оценим разницу полученных величин, которая будет характеризовать различия уникальных элементов 2XOR двух путей. По сути, описанная математическая операция соответствует предложенному подходу к балансировке асимметричных путей. Введем значение разницы задержек сигналов для двух путей: $\Delta(P1,P2) = (P1(C_i) - \mu_1) - (P2(C_i) - \mu_2)$. Тогда все значения $\Delta(P1,P2)$ можно разделить на три подмножества: практически одинаковые значения $-0,000834765 \leq \Delta(P1,P2) \leq 0,00058$ нс; устойчиво положительные значения $\Delta(P1,P2) \geq 0,0013$ нс; устойчиво отрицательные значения $\Delta(P1,P2) \leq -0,0021$ нс.

Таким образом, результат сравнения двух путей можно представить в виде трех символов (ответов в контексте классических ФНФ типа арбитр): 'X' – метастабильное значение, означающее максимально близкие значения $P1(C_i)$ и $P2(C_i)$; '1' – стабильное единичное значение, которое интерпретируется как различимая разница между двумя периодами, при этом $P1(C_i) > P2(C_i)$; '0' – стабильное нулевое значение, которое интерпретируется как различимая разница между двумя периодами, при этом $P1(C_i) < P2(C_i)$.

Во всем множестве полученных 128 значений $\Delta(P1,P2)$ наблюдаются 8 символов «X», 62 символа «1» и 58 символов «0», что говорит о приемлемой стабильности и уникальности предложенной схемы ФНФ типа арбитр с асимметричными путями после балансировки.

Выводы

Предложен новый подход к построению физически неклонируемых функций типа арбитр, основанный на использовании заведомо несимметричных пар путей. В отличие от традиционных подходов с использованием схем мультиплексоров для переключения путей, показано, что пара независимых путей может быть спроектирована при помощи логических элементов, значениями случайных задержек которых можно управлять. Помимо этого, был предложен подход к балансировке пары независимых путей, основанный на определении типа имеющейся асимметрии. Успешно проведенные эксперименты показали состоятельность предложенного подхода, который открывает перспективы для построения новых архитектур ФНФ типа арбитр с применением различных многовходовых логических элементов, схем автобалансировки и арбитража. Дальнейшие исследования целесообразно расширить в части элементной базы: как с технологической точки зрения, так и с функциональной.

Список литературы / References

1. Pappu R. Physical *One-Way Functions*: PhD Thesis in Media Arts and Sciences. Massachusetts Institute of Technology (MIT). Cambridge, USA; 2001: 154.
2. Gassend B., Clarke D., Van Dijk M., Devadas S. Silicon Physical Random Functions. *Proc. of the 9th ACM conference on Computer and communications security, CCS '02*. 2002:148-160.
3. Böhm C., Hofer M. *Physical Unclonable Functions in Theory and Practice*. New York: Springer Science+Business Media; 2013: 270.
4. Ярмолик В.Н., Вашино Ю.Г. Физически неклонированные функции. *Информатика*. 2011;30(2):92-103 / Yarmolik V.N., Vashinko Y.G. [Physical unclonable functions]. *Informatika = Informatics*. 2011;30(2):92-103. (In Russ.)
5. McGrath T., Bagci I.T., Wang Z.M., Roedig U., Yang R.J. A PUF taxonomy. *Applied Physics Reviews*. 2019; 6(1). DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5079407>.
6. Иванюк А.А., Заливако С.С. Физическая криптография и защита цифровых устройств. *Доклады БГУИР*. 2019;(2):50-58 / Ivaniuk A.A., Zalivaka S.S. [Physical cryptography and security of digital devices]. *Doklady BGUIR = Doklady BGUIR*. 2019;(2):50-58. (In Russ.)
7. Herder C., Yu M., Koushanfar F., Devadas S. Physical Unclonable Functions and Applications: A Tutorial. *Proceedings of the IEEE*. 2014;102(8):1126-1141. DOI: 10.1109/JPROC.2014.2320516.
8. Gummalla S. *An Analytical Approach to Efficient Circuit Variability Analysis in Scaled CMOS Design: Master Degree Thesis*. Arizona: Arizona State University; 2011.

Вклад авторов

Ярмолик В.Н. предложил подход к построению физически неклонированных функций с заведомо несимметричными путями.

Иванюк А. А. принял участие в обобщении результатов и проведении экспериментов.

Authors' contribution

Yarmolik V.N. formulated the idea of constructing physical unclonable functions with obviously asymmetric paths.

Ivaniuk A.A. took part in the generalization of the results and conduct of experiment.

Сведения об авторах

Ярмолик В.Н., д.т.н., профессор Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Иванюк А.А., д.т.н., доцент, профессор кафедры информатики, заведующий совместной учебной лабораторией «СК хайникс мемори солюшнс Восточная Европа» Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Information about the authors

Yarmolik V.N., Dr. of Sci. (Tech.), Professor at the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Ivaniuk A.A., Dr. of Sci. (Tech.), Associate Professor, Professor at the Computer Science Department, Head of the Joint Educational Laboratory “SK hynix memory solutions Eastern Europe”, 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. +375-29-769-96-77;
e-mail: yarmolik10ru@yahoo.com
Ярмолик Вячеслав Николаевич

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka St., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics;
tel. +375-29-769-96-77;
e-mail: yarmolik10ru@yahoo.com
Yarmolik Vyacheslav Nikolaevich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2022-20-4-80-87>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 334.029.3

РАЗРАБОТКА И ОПТИМИЗАЦИЯ СЕТИ ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ ДЛЯ МОНИТОРИНГА КАЧЕСТВА ПРОДУКЦИИ

В.А. ВИШНЯКОВ, ХУ ЧЖИФЭН

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

Поступила в редакцию 29 ноября 2021

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2022

Аннотация. Целью статьи является анализ методов, подходов, средств технологии Интернета вещей (Internet of Things (IoT)) для контроля качества продукции. Задачами статьи являются: анализ проблем управления молочной фермой, разработка структуры сети IoT для анализа качества молока, разработка алгоритма работы сети IoT контроля качества молока, оптимизация выбора протоколов сети IoT. Для функционирования молочной фермы рассмотрены два типа управления: производством и процессами. Для реализации управления молочной фермой по технологии 4.0 предложено использование сети IoT, в которой рассмотрены различные протоколы организации связи. Предложена структура сети IoT четырехуровневого управления молочной фермой, которая включает анализаторы, шлюз, облачную платформу и различные приложения для фермеров и операторов. Приведен обобщенный алгоритм контроля качества молока на ферме на основе разработанной структуры сети IoT, который включает прием информации от анализаторов, передачу ее через шлюз в облачную платформу для хранения и интеллектуальной обработки, отображение результатов через приложения операторов. Рассмотрено также применение интеллектуальных алгоритмов для управления фермой: обработки данных и обучения – ML, обработки знаний – DT, обеспечения безопасности – FL. Выполнен процесс выбора подходящего протокола сети для контроля молочной фермы с использованием метода анализа иерархий, в котором используются оценки экспертов, соответствующие четырем показателям сети: скорость передачи, расстояние, частота и безопасность. Сформулированные подходы могут быть применимы в различных производственных процессах для мониторинга качества продукции.

Ключевые слова: технология IoT, протоколы, структура сети, алгоритмы обработки, оптимизация.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Вишняков В.А., Чжифэн Ху. Разработка и оптимизация сети Интернета вещей для мониторинга качества продукции. Доклады БГУИР. 2022; 20(4): 80-87.

DEVELOPMENT AND OPTIMIZATION OF THE INTERNET OF THINGS NETWORK FOR PRODUCT QUALITY MONITORING

ULADZIMIR A. VISHNIAKOU, HU ZIFENG

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

Submitted 29 November 2021

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2022

Abstract. The purpose of the article is to analyze methods, approaches and means of Internet of Things (IoT) technology for product quality control. The objectives of the article are: analysis of dairy farm management problems, development of the structure of the IoT network for milk quality analysis, development of an algorithm for the operation of the IoT milk quality control network, optimization of IoT network protocols choice. Two types of management are considered for the functioning of a dairy farm: production and processes. To implement dairy farm management using 4.0 technology, the use of an IoT network is proposed, in which various communication protocols are considered. The structure of the IoT network of four-level dairy farm management is proposed, which includes analyzers, a gateway, a cloud platform and various applications for farmers and operators. A generalized algorithm for milk quality control on a farm based on the developed IoT network structure is presented, which includes receiving information from analyzers, transmitting it through a gateway to a cloud platform for storage and intelligent processing, displaying results through operator applications. The application of intelligent algorithms for farm management is also considered: data processing and training – ML, knowledge processing – DT, security – FL. The process of selecting a suitable network protocol for monitoring a dairy farm is carried out using the hierarchy analysis method, which uses expert estimates corresponding to four network indicators: transmission speed, distance, frequency and security. The formulated approaches can be applied in various production processes to monitor product quality.

Keywords: IoT technology, protocols, network structure, processing algorithms, optimization.

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

For citation. Vishniakou U.A., Zhifeng Hu. Development and Optimization of the Internet of Things Network for Product Quality Monitoring. Doklady BGUIR. 2022; 20(4): 80-87.

Введение

Для демонстрации функционирования сети Интернета вещей (IoT) как эффективного инструмента, который относится к автоматизации 4.0, рассмотрим пример автоматизации молочной фермы, где используется два типа управления. Первый тип – это управление производством, второй – управление процессами. В управление производством включается контроль за технологическим оборудованием, например, доением коров в автоматическом режиме, а для обеспечения качества молока – управление интеллектуальной стерилизацией с последующим охлаждением молока [1]. В процессе управления молочной фермой используется интеллектуальный мониторинг, дневниковое наблюдение за коровами, кормление и репродуктивное управление. Интеллектуальный мониторинг предназначен для анализа местоположения и состояния дойных коров. Наблюдение за коровой включает в себя слежение за ее содержанием, поведением и физическим здоровьем. Управление питанием и поддержанием жизнедеятельности коров включает в себя обеспечение кормами и контроль за состоянием животного. Для этих двух типов управления молочной фермой некоторые исследователи использовали сети IoT в этой области [1–3].

В статье рассматриваются: структура сети Интернета вещей для мониторинга качества продукции (молока); используемые протоколы в такой сети; оптимизация выбора одного из используемых протоколов; структура алгоритма контроля качества молока; применение известных интеллектуальных алгоритмов для управления фермой.

Протоколы сети IoT для управления молочной фермой

В зависимости от характеристики молочных ферм (размера, количества коров, регионов расположения) сеть IoT может решать разнообразные проблемы. Поэтому вопрос о том, как эффективно использовать технологии Интернета вещей на молочных фермах, является одним из актуальных вопросов исследований в этой области.

Первое, что необходимо учитывать, – это стандарты связи в сетях IoT. На небольшом расстоянии в сети используют такие стандарты связи, как Bluetooth, ZigBee и менее популярные протоколы: Thread, WirelessHART, MiWi, SNAP [4]. Все эти стандарты связи используют нелицензионные полосы радиочастотного спектра из так называемого ISM-диапазона (Industrial, Science, Medicine), выделенного для нужд промышленности, медицинского и научного оборудования. На практике этот диапазон частот, с учетом принятых для него ограничений, также используется для организации каналов связи внутри сот и кластеров сотовых сетей IoT. Для дальних расстояний используются протоколы Wi-Max и LTE [5]. Некоторые протоколы связи, используемые в сетях Интернета вещей, представлены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры протоколов связи в сетях
Table 1. Parameters of communication protocols in networks

Имя протокола / Name of protocols	Скорость передачи / Transmission rate	Частота / Frequency	Расстояние / Distance
RFID	424 Кб/с	135 КГц	>50 см
	–	13,56 МГц	>1 м
		866–960 МГц	>3 м
		2,4 ГГц	>1,5 м
NFC	424 Кб/с	2,45 ГГц	<2 м
ZigBee	20/10 Кб/с – 256 Кб/с	900 МГц / 2,4 ГГц	10 м
Bluetooth	1 Мб/с	2,4 ГГц	10 м
BLE	10 Мб/с	2,4 ГГц	>10 м
UWB	50 Мб/с	broadband	30 м
Wi-Fi (IEEE 802/11ac)	до 6,77 Гб/с	2,4/5 GHz	100 м
Mobile networks 3G/4G (LTE)	до 150 Мб/с	800/900/1800/2400 МГц	более 10 км

Большинство стандартов для систем беспроводной связи малого радиуса действия называют персональной сетью (PAN). Такие сети имеют радиус покрытия от 10 до 30 м. Этот вид сети может использоваться для подключения персональных электронных устройств одного пользователя (телефонов, компьютеров, мониторов, ноутбуков). Иногда персональная сеть малого радиуса действия может быть оптимизирована для определенных приложений, называемых «профили приложений».

Маломощная глобальная сеть – энергоэффективная сеть дальнего действия (LPWAN) – может использоваться для обеспечения больших расстояний от объектов мониторинга до служб обработки [5]. Поэтому такая сеть Интернета вещей может быть применена на крупномасштабной молочной ферме для передачи данных о состоянии коров и качества продукции. Эта сеть использует радиочастоты в нелицензионном диапазоне 30 – 300 МГц, 300 МГц – 3 ГГц и 800 – 930 МГц.

Структура сети IoT для управления молочной фермой

Для описания сети Интернета вещей используем мультиагентный подход [6]. Ее архитектура включает уровень восприятия, сетевой уровень, уровень промежуточного программного обеспечения, уровень приложений и бизнес-уровень. Но концептуально IoT может принадлежать к сетям следующего поколения (NGN), поэтому ее структура аналогична четырехуровневой сети NGN, которая включает интеллектуальные датчики, транспортную среду, сервисы и приложения [7].

Самый низкий уровень структуры сети IoT состоит из интеллектуальных объектов, интегрированных с датчиками. Датчики могут использоваться для оцифровки различных показателей молочной фермы, таких как местоположение, физическое состояние и показатели питания молочной коровы, а также погода, температура, влажность на молочной ферме.

Большой объем данных (температура, местоположение, данные коров, показатели качества молока), собираемых датчиками, требует использование надежной и высокопроизводительной беспроводной сетевой инфраструктуры для передачи. Это осуществляется на сетевом уровне.

Уровень обслуживания содержит набор информационных услуг: в IoT могут использоваться автоматизированные технологические и бизнес-операции, поддержка операционной и бизнес-деятельности (OSS/BSS – система поддержки операций/система поддержки бизнеса), некоторые методы обработки информации (статистика, предварительная обработка данных, извлечение функций и прогнозная аналитика и т. д.), хранение данных, информационная безопасность, бизнес-правила и бизнес-процесс управления молочной фермой.

На четвертом уровне, называемом прикладным, существуют различные типы приложений в системе Интернета вещей, касающейся молочной фермы. Для разных подсистем существуют различные типы приложений для секторов молочных ферм. Основываясь на приведенном выше описании, структуру IoT для управления молочной фермой можно представить в виде, показанном на рис. 1. Анализаторы и микроконтроллер относятся к уровню восприятия, шлюз – к сетевому уровню, облачная платформа обеспечивает уровень обслуживания, а мобильные приложения – к прикладному.

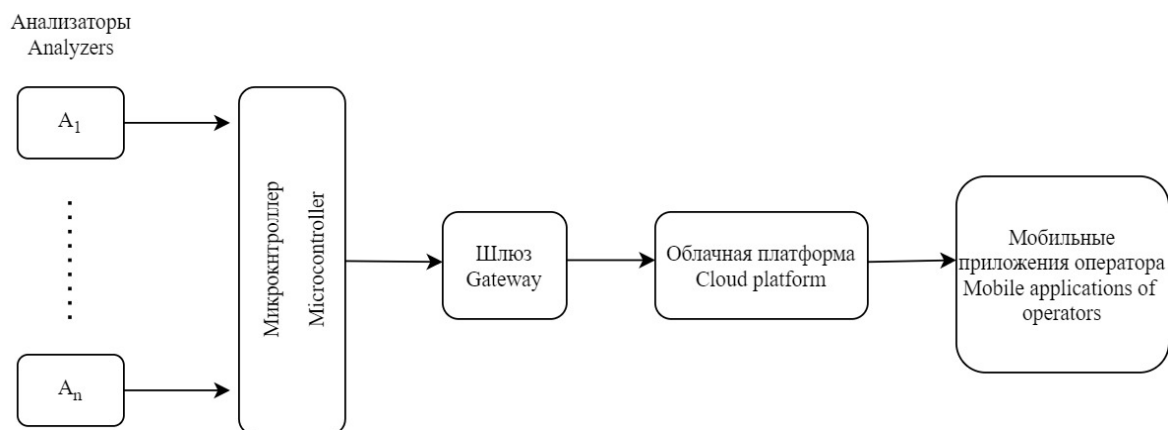


Рис. 1. Структура IoT для управления фермой
Fig. 1. IoT structure for farm management

Алгоритмы сети IoT для управления молочной фермой

Для решения конкретных вопросов управления молочными фермами, например, таких как контроль качества молока, необходимо контролировать его ключевые показатели (лактоза, жир, хлориды, белок). Обобщенный алгоритм контроля качества молока для предложенной структуры IoT состоит из этапов, описанных ниже.

1. Портативные анализаторы качества молока молочной фермы применяются как датчики показателей молока. Эти показатели молока будут преобразованы в передаваемые данные.

2. Перед отправкой данных датчиков в сеть Интернета вещей устройство портативных анализаторов должно быть проверено платформой Интернета вещей (авторизация службы). Если проверка не будет успешной, то менеджеру будет отправлен запрос на проверку до тех пор, пока идентификаторы устройств не будут исправлены.

3. Анализаторы молока через микроконтроллер посылают результаты на шлюз (вместо компьютера или принтера, через последовательный порт, как в большинстве ферм). Шлюз передает полученные показатели качества молока на облачную платформу (ОП). В этом процессе применяются различные сетевые протоколы.

4. В базе данных ОП обычно хранятся виды индикаторных данных, полученных от анализаторов молока. В базе данных хранятся данные, полученные с разных молочных ферм, взятые качественные характеристики по времени (количество, время суток, проверенные параметры и т.д.). База знаний содержит правила оценки качества молока в зависимости от содержания коров.

5. Данные отправляются решателю, который на основе принятых показателей и правил обработки показателей качества из базы знаний выдает решения по определенным параметрам качества. Эти решения также заносятся в базу данных.

6. В соответствии с различными типами полученных данных обработчик правил выполняет действия: классифицирует данные; сохраняет данные в базе данных; отправляет данные в аналитическую систему; отправляет команды предварительной обработки и т. д.

7. На мобильных устройствах операторов установлены приложения, которые позволяют фермеру или оператору проверять интересующую их информацию из базы данных ОП через сайт.

8. Сайт служит средством отображения полученных результатов по качеству молока для менеджера.

Алгоритм машинного обучения (ML) зависит от больших наборов данных, но, поскольку доступность данных низкая, что связано с коммерческой конкуренцией или конфиденциальностью информации (молочные фермеры, как правило, не желают делиться соответствующими данными), возникают трудности в интегрировании с источниками данных для алгоритма ML [8]. Цифровой близнец (DT) может быть хорошей идеей для решения этой проблемы. DT – это надежная стратегия переноса знаний из виртуального пространства в физическое. Известно, что алгоритм DT уже реализован на сельскохозяйственных фермах [9].

Для управления молочной фермой может быть применен алгоритм федерального обучения (FL) [10] благодаря его преимуществам в обеспечении информационной безопасности во время обмена большими данными и защиты конфиденциальности терминальных и персональных данных. Обсуждаются альтернативные решения проблемы, основанные на совместном обучении с сохранением конфиденциальности, и приводится набор сценариев, демонстрирующих их преимущества как для фермеров, так и для бизнеса. Таким образом, FL является подходящим алгоритмом для решения проблемы отсутствия ограничений безопасности и конфиденциальности данных молочной фермы.

Оптимизация протоколов сети IoT для контроля качества продукции

Метод анализа иерархии (МАИ) [11] – это метод организации и анализа сложных решений с использованием математики и психологии. В его основе лежат три составляющие: конечная цель (или проблема, которую необходимо решить), возможные решения, называемые альтернативами и критерии, по которым оцениваются альтернативы. Рассмотрим применение МАИ для оптимизации использования протоколов в сети IoT. Для различных сетевых протоколов характерны четыре показателя: скорость передачи, полоса частот, дальность (расстояние) связи и безопасность. Шкала оценки экспертами в МАИ содержит значения от 1 до 9 [12]. В соответствии со шкалой может быть построена матрица оценок экспертов, соответствующих четырем основным показателям протоколов сети, как показано в табл. 2.

Таблица 2. Матрица оценок экспертов, соответствующих четырем сетевым показателям

Table 2. Matrix of expert assessments corresponding to 4 network indicators

Цель – выбрать подходящую сеть / The goal is to choose a suitable network	Скорость передачи / Transmission rate	Диапазон частот / Frequency range	Расстояние связи / Communication distance	Безопасность / Security
Скорость передачи	1	4	1/3	1/2
Диапазон частот	1/4	1	1/7	1/3
Расстояние связи	3	7	1	3
Безопасность	2	3	1/3	1

Далее, для определения веса каждого показателя используется метод среднего арифметического. При расчете веса каждого показателя табл. 2 необходимо нормализовать оценки по столбцам. В результате получаем значение веса каждого показателя (табл. 3).

Таблица 3. Значение веса каждого показателя
Table 3. The weight value of each indicator

Цель – выбрать подходящую сеть / The goal is to choose a suitable network	Скорость передачи / Transmission rate	Диапазон частот / Frequency range	Расстояние связи / Communication distance	Безопасность / Security	Значение веса ω / Weight value ω
Скорость передачи	0,16	0,27	0,18	0,10	0,1775
Диапазон частот	0,04	0,07	0,08	0,07	0,065
Расстояние связи	0,48	0,47	0,55	0,62	0,53
Безопасность	0,32	0,20	0,18	0,21	0,2275

Для оценки обоснованности полученных весов показателей требуется провести одноразовую проверку. Сначала необходимо найти максимальное собственное значение в соответствии со следующей формулой:

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n \frac{[A\omega]_i}{n\omega_i}, \quad (1)$$

где λ_{\max} – максимальное собственное значение; n – порядок матрицы; $A\omega$ – матрица весов четырех показателей, соответствующая значению веса каждого показателя. В табл. 4 представлены значения $A\omega$.

Таблица 4. Значение $A\omega$
Table 4. The value of $A\omega$

Цель – выбрать подходящую сеть / The goal is to choose a suitable network	Скорость передачи / Transmission rate	Диапазон частот / Frequency range	Расстояние связи / Communication distance	Безопасность / Security	Значение веса $A\omega$ / Weight value $A\omega$	Значение $A\omega$ / Value of $A\omega$
Скорость передачи	0,16	0,27	0,18	0,10	0,1775	0,73
Диапазон частот	0,04	0,07	0,08	0,07	0,065	0,26
Расстояние связи	0,48	0,47	0,55	0,62	0,53	2,2
Безопасность	0,32	0,20	0,18	0,21	0,2275	0,95

Тогда получаем следующее значение λ_{\max} :

$$\lambda_{\max} = 4,109. \quad (2)$$

Значение индекса одноразовой проверки CI может быть рассчитано по следующей формуле:

$$CI = (\lambda - n) / (n - 1) = 0,036. \quad (3)$$

Средний индекс случайной согласованности RI находим по табл. 5, используемой в МАИ.

Таблица 5. Средний индекс случайной согласованности RI
Table 5. Average random consistency RI

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9
RI	0	0	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45

Значение RI выбираем равным 0,90 (табл. 5), поскольку порядок n матрицы равен 4.

Значение коэффициента согласованности может быть получено по формуле (4). Когда значение CR меньше 0,1, согласованность матрицы считается приемлемой.

$$CR = \frac{CI}{RI} = 0,04 < 0,1. \quad (4)$$

Таким образом, анализ процесса иерархии вышеуказанных показателей является обоснованным. В соответствии с весом полученных показателей можно считать, что диапазон передачи сети имеет наивысший приоритет, полоса частот передачи имеет наименьший

приоритет, а приоритет скорости передачи и безопасности находится между двумя вышеуказанными показателями.

Основываясь на приведенном выше анализе, рассматривается маломощная глобальная сеть – энергоэффективная сеть дальнего действия, например, сеть LTE 4-го поколения, которая выбрана для передачи ресурсов данных молока. Она предназначена для использования менеджерами ферм. Следует отметить, что в ее составе имеется технология CIoT-LTE-M, которая в рамках LTE имеет низкую скорость передачи данных, но большое покрытие.

Заключение

На основе мультиагентной модели предложена четырехуровневая структура Интернета вещей для управления молочной фермой, включающая анализаторы, шлюз, облачную платформу и различные приложения для операторов.

В процесс управления молочными фермами с использованием сети IoT разработан обобщенный алгоритм контроля качества продукции. В связи с недостатком высококачественных и надежных данных от молочной фермы, предложено применить алгоритм DT. Для повышения безопасности и конфиденциальности данных от молочных ферм целесообразно использовать алгоритм FL.

Выполнен процесс выбора подходящего протокола сети для контроля параметров молока на ферме с использованием метода анализа иерархий, в котором используются оценки экспертов, соответствующие четырем показателям сети: скорости передачи, расстоянию, частоте и безопасности.

Список литературы

1. Vate-U-Lan P., Quigley D., Masouras P. Smart dairy farming through the Internet of Things (IoT). *Asian International Journal of Social Sciences*. 2017;7:23-36.
2. Latino M., Corallo A., Menegoli M., Nuzzo B. Agriculture 4.0 as Enabler of Sustainable Agri-Food: A Proposed Taxonomy. *IEEE Transactions on Engineer*. 2021;8:1-20.
3. Akbar M.O., Shahbaz khan M.S., Ali M.J., Azfar H., Qaiser G., Pasha M., Pasha U., Missen A.S. Akhtar N. IoT for Development of Smart Dairy Farming. *Journal of Food Quality*. 2020;2:1-8.
4. Рентюк В.И. Краткий путеводитель по беспроводным технологиям «Интернета вещей». Часть 2. Ближний радиус действия. *Control Engineering*. 2018;1(73):51-57.
5. Рентюк В.И. Краткий путеводитель по беспроводным технологиям «Интернета вещей». Часть 4. Дальний радиус действия. *Control Engineering*. 2018;3(75):82-87.
6. Shoham Y., Leyton-Brown K. *Multiagent systems: algorithmic, game-theoretic, and logical foundations*. Cambridge University Press; 2009.
7. Вишняков В.А., Аль-Масри А.Х., Аль-Хаджи С.К. Организация управления и структуры в локальных сетях интернет вещей. *Системный анализ и прикладная информатика*. 2020;2:11-16.
8. Кошкаров А.В. Методы машинного обучения в цифровом сельском хозяйстве: алгоритмы и кейсы. *Международный журнал перспективных исследований*. 2018;8(1):11-26.
9. Pylianidis C., Osinga S., Athanasiadis A. Introducing digital twins to agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2021;2:1-25.
10. Gengler N. Symposium review: Challenges and opportunities for evaluating and using the genetic potential of dairy cattle in the new era of sensor data from automation. *Journal of Dairy Science*. 2019;102(6):5756-5763.
11. Саати Т. *Принятие решений. Метод анализа иерархий*. Москва: Радио и связь; 2003.

References

1. Vate-U-Lan P., Quigley D., Masouras P. Smart dairy farming through the Internet of Things (IoT). *Asian International Journal of Social Sciences*. 2017;7:23-36.
2. Latino M., Corallo A., Menegoli M., Nuzzo B. Agriculture 4.0 as Enabler of Sustainable Agri-Food: A Proposed Taxonomy. *IEEE Transactions on Engineer*. 2021;8:1-20.
3. Akbar M.O., Shahbaz khan M.S., Ali M.J., Azfar H., Qaiser G., Pasha M., Pasha U., Missen A.S. Akhtar N. IoT for Development of Smart Dairy Farming. *Journal of Food Quality*. 2020;2:1-8.
4. Rentyuk V.I. [Brief guide to wireless technologies of the Internet of things. Part 2. Short range]. *Control Engineering*. 2018;1:51-57. (In Russ)

5. Rentyuk, V.I. [Brief guide to wireless technologies of the Internet of things. Part 4. Long range]. *Control Engineering*. 2018;3:82-87. (In Russ)
6. Shoham Y, Leyton-Brown K. *Multiagent systems: algorithmic, game-theoretic, and logical foundations*. Cambridge University Press; 2009.
7. Visniakou U.A., Al-Masri A.H. Al-Hajj S.K. [Organization of management and structure in local networks internet of things]. *System analysis and application informatics*. 2020;2:11-16. (In Russ)
8. Koshkarov A.V. [Machine learning methods in digital agriculture: algorithms and cases]. *International Journal of Advanced Studies*. 2018;8(1):11-26. (In Russ)
9. Pylianidis C., Osinga S., Athanasiadis A. Introducing digital twins to agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2021;2:1-25.
10. Gengler N. Symposium review: Challenges and opportunities for evaluating and using the genetic potential of dairy cattle in the new era of sensor data from automation. *Journal of Dairy Science*. 2019;102(6):5756-5763.
11. Saati T. [*Decision-making. Hierarchy Analysis method*]. Moscow: Radio i svjas; 2003. (In Russ)

Вклад авторов

Вишняков В. А. детализировал структуру сети IoT и на ее основе разработал обобщенный алгоритм контроля качества продукции ферм.

Чжифэн Ху выявил проблемы передачи информации в сети IoT контроля качества продукции и провел оптимизацию протоколов передачи информации с использованием метода анализа иерархий.

Authors' contribution

Vishniakou U.A. detailed the structure of the IoT network and on it base proposed the generalized algorithm for quality control of farm products.

Zifeng Hu identified the problems of information transmission in the IoT network of product quality control and optimized information transmission protocols using the hierarchy analysis method.

Сведения об авторах

Вишняков В.А., д.т.н., профессор, профессор кафедры инфокоммуникационных технологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Чжифэн Ху, магистрант кафедры инфокоммуникационных технологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Information about the authors

Vishniakou U.A., Dr. of Sci. (Tech.), Professor, Professor at the Department of Infocommunication Technologies of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Zifeng Hu, Master's Student at the Department of Infocommunication Technologies 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. +375-44-486-71-82;
e-mail: vish@bsuir.by
Вишняков Владимир Анатольевич

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka St., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics;
tel. +375-44-486-71-82;
e-mail: vish@bsuir.by
Vishniakou Uladzimir Anatolievich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2022-20-4-88-95>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.762.2

ОЧИСТКА ВОЗДУХА В ЗАКРЫТЫХ ПОМЕЩЕНИЯХ ОТ ВЫСОКОДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ И АЭРОЗОЛЕЙ

Л.П. ПИЛИНЕВИЧ, М.В. ТУМИЛОВИЧ, Д.М. РУМЯНЦЕВ, К.В. ГРИБ, А.Г. БУНАС

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

Поступила в редакцию 18 января 2022

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2022

Аннотация. В результате производственной деятельности предприятий реального сектора экономики во многих случаях происходит образование высокодисперсных частиц и аэрозолей, что требует последующего отделения данных тонких частиц из газопылевого потока. Особенно актуальна данная проблема очистки, например, для производств порошкообразных пигментов и наполнителей и полимеров, технического углерода, химических средств защиты растений, извести и цемента, пылевидного кварца и асбеста, а также при плавке цветных и редких металлов. По заключению врачей высокодисперсные частицы, проникая в альвеолы легких, вызывают различные профессиональные заболевания рабочих горнорудной, угольной, машиностроительной промышленности – пневмокониозы, характеризующиеся развитием диффузного фиброза легочной ткани. Так, высокодисперсная пыль диоксида кремния вызывает у работающих развитие одной из тяжелых форм пневмокониоза – силикоз, а высокодисперсная пыль бериллия вызывает другое тяжелое заболевание – бериллиоз. Для решения проблемы очистки воздуха от высокодисперсных частиц и аэрозолей используются самые различные физические силы и средства: гравитационные, инерционные, капиллярные, центробежные и электрические силы, а также фильтрующие материалы на органической и неорганической основе с заданными фильтровальными характеристиками. Для обеспечения повышения эффективности очистки воздуха в закрытых помещениях от высокодисперсных частиц и аэрозолей, которые наносят наибольший вред здоровью, в данной работе предложено использовать электростатические фильтры, обеспечивающие фильтрацию в электрическом поле через высокопористые ячеистые материалы. В результате проведенных теоретических и экспериментальных исследований определены параметры процесса очистки и конструктивные параметры электростатического фильтра, обеспечивающие высокие производительность процесса и степень очистки.

Ключевые слова: фильтрация, очистка, электростатический фильтр, тонкость очистки, высокодисперсные частицы, аэрозоли.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Пилиневич Л.П., Тумилович М.В., Румянцев Д.М., Гриб К.В., Бунас А.Г. Очистка воздуха в закрытых помещениях от высокодисперсных частиц и аэрозолей. Доклады БГУИР. 2022; 20(4): 88-95.

CLEANING OF INDOOR AIR FROM HIGHLY DISPERSED PARTICLES AND AEROSOLS

LEANID P. PILINIVICH, MIRASLAU V. TUMILOVICH, DMITRIY M. RUMIANTSAV,
KANSTANTIN V. HRYB, ANDREI G. BUNAS

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

Submitted 18 January 2022

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2022

Abstract. The production activity of many industries is associated with the release of highly dispersed particles and aerosols, as well as the subsequent capture of fine particles. Such processes take place, for example, in the production of fillers and polymers, powdered pigments and chemicals, carbon black, plant protection chemicals, lime and cement, pulverized quartz and asbestos, in the melting of non-ferrous and rare metals. According to doctors, highly dispersed particles, penetrating into the alveoli of the lungs, cause various occupational diseases of workers in the mining, coal, machine-building industries – pneumoconiosis. For example, when working in the environment containing silicon dioxide dust, workers develop one of the severe forms of pneumoconiosis – silicosis, and exposure to beryllium dust causes a very serious disease – berylliosis. To purify air and other gases from mechanical impurities, a variety of physical forces and means are used: gravitational forces, inertial forces, centrifugal forces, electric interaction forces of charged particles, capillary forces, as well as filter partitions with the appropriate pore size. To solve the problem of cleaning indoor air from highly dispersed particles and aerosols that cause the greatest harm to health, in this paper it is proposed to use electrostatic filters that provide filtration in an electric field through highly porous cellular materials. As a result of the theoretical and experimental studies, the parameters of the cleaning process and the design parameters of the electrostatic filter were determined, ensuring high process performance and the degree of purification.

Keywords: filtration, cleaning, electrostatic filter, fineness of cleaning, highly dispersed particles, aerosols.

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

For citation. Pilinevich L.P., Tumilovich M.V., Rumyantsev D.M., Grib K.V., Bunas A.G. Cleaning of Indoor Air from Highly Dispersed Particles and Aerosols. Doklady BGUIR. 2022; 20(4): 88-95.

Введение

Многие процессы трудовой деятельности человека сопровождаются образованием вредных высокодисперсных частиц в виде газообразных аэрозолей (дым, туман), которые вызывают заболевания органов дыхания, зрения, кожного покрова и внутренних органов человека. В связи с этим особую актуальность приобретает проблема очистки газопылевых потоков от вредных примесей, например, при производстве порошкообразных пигментов и химикатов, наполнителей и полимеров, технического углерода, химических средств защиты растений, извести и цемента, пылевидного кварца и асбеста, а также при плавке цветных и редких металлов, проведении сварочных работ, проведении огневой подготовки личного состава и др. [1]. Необходимо также отметить, что большую опасность для жизни представляют техногенные катастрофы, различного рода пожары и взрывы, всегда сопровождающиеся выделением вредных веществ, которые при попадании в организм человека вызывают различного рода отравления, в том числе и со смертельным исходом. По данным, опубликованным Международной организацией труда (МОТ) (Official bulletin. Series B / International Labour Office. Geneva : ILO, 2019), ежегодно из-за несчастных случаев на производстве и связанных с работой заболеваний гибнут 2,78 млн работников (из них 2,4 млн – из-за заболеваний).

Сегодня предъявляются высокие требования к очистке воздуха в помещениях, загрязненного в результате трудовой деятельности человека. Необходимо не только обеспечить очистку помещений от вредных веществ, но и произвести сам процесс очистки за максимально короткий промежуток времени. В связи с этим разработана конструкция устройств для очистки воздуха

в закрытых помещениях от высокодисперсных частиц и частиц аэрозолей, которые будут обладать одновременно высокой степенью очистки и высокой производительностью, является актуальной задачей, имеющей большое практическое значение.

Проведенный анализ информационных источников, посвященных методам и способам очистки помещений от высокодисперсных вредных веществ [2–6], показал, что одним из наиболее перспективных методов очистки является метод электростатического осаждения в электрофильтрах. Цель настоящей работы – исследовать процесс очистки воздуха в помещениях от высокодисперсных частиц и аэрозолей с помощью электростатических сил.

Теоретический анализ

Теоретические и экспериментальные исследования процесса очистки от высокодисперсных частиц [6, 7] показали, что степень очистки воздушной среды зависит от большого числа факторов. Необходимо отметить, что начало теории фильтрации положено французскими инженерами Дарси (1856 г.) и Дюпюи (1848–1863 гг.), которые провели экспериментальные исследования процесса фильтрации воды через трубы, заполненные песком. Именем Дарси назван линейный закон фильтрации, который он установил в результате экспериментальных исследований:

$$Q = k_{\phi} \frac{\Delta P}{H} S, \quad (1)$$

где Q – объемный расход жидкости через песчаный фильтр, высота которого H , а площадь поперечного сечения S ; ΔP – разность давлений воды перед фильтром и после; k_{ϕ} – коэффициент фильтрации.

Закон Дарси можно применять не только для расчетов, связанных с фильтрацией воды, но и для других жидких и газообразных сред. Формула для расчета имеет следующий вид:

$$Q = \frac{k}{\mu} \frac{\Delta P}{H} S, \quad (2)$$

где μ – динамический коэффициент вязкости; k – коэффициент проницаемости, который не зависит от свойств жидкости и является динамической характеристикой только пористой среды.

Эффективность процессов очистки (фильтрации) определяется гидродинамическими режимами, характеристиками фильтрующих материалов и устройств, а также характеристиками внешних воздействий.

Осаждение частиц загрязнителя воздушной среды в устройствах очистки может происходить под действием инерционных и гравитационных сил, броуновской диффузии, электрического притяжения и др.

Степень очистки η можно представить как функцию следующих величин:

$$\eta = f(St_k R, G', D_{\phi} K_s), \quad (3)$$

где St_k , R , G' , D_{ϕ} , K_s – безразмерные параметры осаждения за счет эффектов инерции, касания, гравитации, диффузии и электрических сил соответственно. Инерционное осаждение вызвано отклонением траектории движения частиц загрязнителя под действием сил инерции от линии фильтруемого потока жидкости или газа.

Вероятность столкновения частиц загрязнителя с поровой стенкой перегородки определяется параметром инерционного осаждения, характеризующимся критерием Стокса:

$$St_k = \frac{V^2 S_0^2 \rho C}{18 \mu d_n}, \quad (4)$$

где C – поправка Кенингема; S_0 – условный диаметр частицы загрязнителя; ρ – плотность фильтруемой среды; d_n – диаметр поры фильтрующего материала; V – скорость потока; μ – динамическая вязкость.

Осаждение частиц за счет механизма касания проявляется при движении частиц по траектории, строго совпадающей с линиями потока. Улавливание частиц осуществляется

только за счет непосредственно зацепления. Определяющим параметром эффекта касания R является отношение размера частицы загрязнителя S к диаметру поры d_n :

$$R = \frac{S}{d_n}. \quad (5)$$

Наибольшая вероятность захвата частиц за счет механизма касания наблюдается при вязком течении, когда влияние сил инерции невелико (число Рейнольдса $Re < 0,5$).

Для газовых потоков эффективность захвата частиц за счет механизма касания η_k можно оценить выражением, предложенным авторами работы [4]:

$$\eta_k = R^2 \left(\frac{d_n V \rho}{\mu} \right)^{0,625}. \quad (6)$$

Гравитационное осаждение частиц заметно проявляется при малых скоростях потока и при горизонтальном течении жидкости или газа через пористые перегородки. Параметр осаждения частиц за счет гравитационных сил может быть определен из выражения

$$G' = \frac{St_k}{2F_r}, \quad (7)$$

где $F_r = \frac{V^2}{2gd_n}$ – критерий Фруда.

За счет броуновской диффузии главным образом осаждаются частицы размером менее 5 мкм при малых скоростях движения; данный механизм осаждения в основном проявляется при очистке газов. Уравнение для коэффициента диффузии D_ϕ , полученное Эйнштейном, имеет вид

$$D_\phi = \frac{K_B T C}{3\pi S_0 \mu}, \quad (8)$$

где K_B – константа Больцмана, T – абсолютная температура.

Наиболее существенное воздействие на процесс улавливания высокодисперсных частиц оказывают электростатические силы, однако в общем виде эта задача пока не решена в связи со сложностью учета структуры фильтрующих материалов и огромным разнообразием условий фильтрации, конкретной газообразной среды, содержащей высокодисперсные частицы загрязнителя. Поэтому необходимо проведение дополнительных экспериментальных исследований.

Результаты работы и их обсуждение

Как было отмечено выше, наиболее высокую эффективность очистки воздуха от высокодисперсных частиц из газовых потоков обеспечивают электростатические фильтры различных типов. Основным механизмом очистки от высокодисперсных частиц является их осаждение на осадительных электродах. Для экспериментального исследования процесса осаждения высокодисперсных частиц на электродах под воздействием электрического поля, разработан и изготовлен экспериментальный образец двухзонного электростатического фильтра, состоящий из зоны осаждения и зоны зарядки.

Экспериментальный образец электростатического фильтра содержит следующие основные элементы: корпус; высоковольтный блок питания с регулятором величины напряжения; датчики контроля напряжения и тока; коронирующие и осадительные электроды; систему крепления осадительных и коронирующих электродов, позволяющую закреплять и менять электроды, имеющие различную площадь поверхности; систему подвода, распределения и отвода очищаемых газов. Согласно работе [1], наиболее высокую тонкость очистки обеспечивают электростатические фильтры, у которых осадительные электроды выполнены из высокопористого материала с ячеистой структурой. Поэтому экспериментальные исследования проводились с использованием осадительных электродов, выполненных из высокопористого ячеистого материала на основе никеля, имеющего пористость до 98 % (рис. 1).

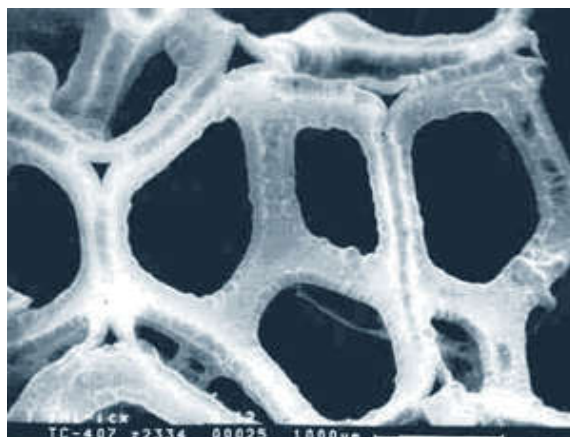


Рис. 1. Фрактограмма высокопористого ячеистого материала
Fig. 1. Fractogram of highly porous cellular material

Экспериментальные исследования гидравлических характеристик, тонкости очистки электростатического фильтра проводили с помощью стенда для определения эксплуатационных характеристик фильтрующих устройств.

Принцип работы стенда состоит в следующем, через исследуемое фильтрующее устройство, установленное и герметично закрепленное в специальной оснастке, вентилятором подается воздух. Одновременно с помощью датчика расхода газа измеряется расход воздуха через исследуемое устройство, а также с помощью датчика давления соответствующий ему перепад давления на фильтрующем устройстве. Установка определенной величины расхода осуществляется регулируемыми дросселями. Для определения тонкости очистки перед оснасткой с фильтрующим устройством устанавливается распылитель с мелкодисперсным порошком загрязнителя. В качестве модельных высокодисперсных частиц загрязнителя выбраны высокодисперсные порошки оксида алюминия Al_2O_3 , состоящие из частиц диаметром от 0,02 до 2 мкм.

Подсчет количества частиц загрязнителя по размерам осуществляли при помощи лазерного спектрометра LAS-01(250X) фирмы «PMS, Inc» (США).

Экспериментальные исследования проводили следующим образом. Вначале определяли гранулометрический состав и количество инородных частиц в воздухе без загрязнителя, полученные результаты заносили в таблицу. Испытываемое фильтрующее устройство помещали и герметично закрепляли в специальной оснастке, потом включали вентилятор. Затем с помощью регулируемого дросселя устанавливали заданный расход воздуха и фиксировали перепад давления на исследуемом устройстве. Измерения повторяли при нескольких перепадах давления или расходах на фильтрующем устройстве. Полученные данные заносили в таблицу. Затем в генератор аэрозолей засыпали мелкодисперсный загрязнитель (Al_2O_3) и с помощью спектрометра определяли гранулометрический состав и количество частиц загрязнителя, прошедшего через испытываемое устройство очистки воздуха при тех же значениях перепада и расхода воздуха, что и без мелкодисперсного загрязнителя.

Абсолютную тонкость очистки A определяли по максимальному размеру частиц, прошедших через устройство для очистки.

Удельное содержание m частиц загрязнителя в воздухе, проходящем через электрофильтр, определяли как массу M частиц загрязнителя, поступающих в электрофильтр в единицу времени при расходе воздуха Q , т. е.

$$m = \frac{M}{Q} \quad (9)$$

Степень очистки электрофильтра в процентах определяется как отношение массы осажденных частиц в электрофильтре M_2 к массе частиц, поступивших в электрофильтр M_1 :

$$\frac{M_2}{M_1} \cdot 100 \% \quad (10)$$

С целью определения влияния количества осадительных электродов N , их площади S , величины напряжения и величины зазора H между ними, напряжения питания U , толщины электрода L на процесс осаждения высокодисперсных частиц и эксплуатационные характеристики электрофильтра (абсолютную тонкость и степень очистки), исследовали его экспериментальный образец с одним, двумя и четырьмя осадительными электродами, выполненными в виде дисков с размером ячейки 4–5 мм, толщиной 10 и 23 мм, площадью поверхности 100 и 200 см².

Для исследования влияния величины зазора между осадительными электродами на абсолютную тонкость очистки в экспериментальном образце электрофильтра, расстояние между осадительными электродами изменяли от 3,4 до 20 мм. Результаты проведенных экспериментальных исследований образцов электростатических фильтров, их гидравлические и эксплуатационные характеристики представлены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры экспериментальных образцов электрофильтра и результаты исследований их характеристик

Table 1. Parameters of experimental samples of the electrofilter and the results of studies of their characteristics

№ обр.	Параметры образца				Толщина электрода L , мм	Гидравлические характеристики		Эксплуатационные характеристики	
	S , см ²	H , мм	N , шт.	U , кВ		Q , м ³ /ч	ΔP , с фильтро-элементом, Па	Степень очистки, %	Абс. тонкость очистки, мкм
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
						150 270	Перепад давления без фильтро-элементов 10 19	Размер частиц аэрозоли (пыли) в воздухе помещения 1 – 14 мкм	
1	100	3,4	1	5	10	150	340	99,4	0,1
2	100	3,4	1	5	10	270	500	99,2	0,1
3	200	3,4	2	5	10	150	680	99,5	0,1
4	200	3,4	2	5	10	270	1000	99,4	0,1
5	200	3,4	2	3	10	150	680	99,4	0,15
6	200	3,4	1	5	23	150	680	99,5	0,15
7	400	3,4	2	5	23	150	1200	99,6	0,1
8	400	3,4	2	5	23	270	2000	99,5	0,1
9	600	3,4	3	5	10	150	2100	99,6	0,08
10	300	3,4	3	5	10	150	1200	99,5	0,09
11	400	3,4	4	5	10	150	2500	99,7	0,08
12	800	3,4	4	5	23	150	4950	99,9	0,055
13	800	3,4	4	3,5	23	150	4950	99,7	0,06
14	800	10	4	5	23	150	4960	99,8	0,06
15	800	20	4	5	23	150	4970	99,8	0,06
16	800	3,4	4	5	23	270	8559	99,8	0,06
17	800	10	4	5	23	270	8559	99,8	0,06
18	800	20	4	5	23	270	8580	99,8	0,06
19	800	20	4	3,5	23	270	8580	99,75	0,065

Анализ результатов экспериментальных исследований, представленных в таблице, позволяет сделать следующие выводы:

1. Увеличение количества высокопористых осадительных электродов от 1 до 4 позволяет повысить степень и абсолютную тонкость очистки (см. образец № 12).

2. Уменьшение величины зазора между осадительными электродами приводит к увеличению степени очистки с одновременным увеличением абсолютной тонкости очистки.

3. Увеличение производительности очистки приводит к уменьшению степени и абсолютной тонкости очистки. Поэтому для обеспечения необходимых тонкости и производительности процесса очистки помещений от высокодисперсных частиц и аэрозолей целесообразно увеличивать количество электростатических фильтров.

Заключение

Приведенные в данной работе результаты теоретических и экспериментальных исследований, выполненных известными исследователями и авторами, позволяют сделать вывод, что электростатические силы оказывают значительное влияние на повышение степени очистки газопылевых потоков от высокодисперсных частиц и аэрозолей с размером частиц менее 0,5 мкм, и в частности от наиболее трудноулавливаемых частиц с размером около 0,3 мкм. Показано, что наибольшая степень очистки достигается в случае прохождения заряженных частиц сквозь заряженные осадительные электроды. Показано, что степень очистки увеличивается с повышением величины заряда частиц и осадительных электродов, а также с уменьшением скорости потока, что, однако, снижает производительность процесса очистки. В связи с этим важной и актуальной проблемой является увеличение производительности при сохранении высокой степени очистки от высокодисперсных частиц и аэрозолей. Для этих целей в качестве осадительных электродов предложено использовать высокопористые ячеистые материалы на металлической основе, имеющие пористость до 98 % при размере ячейки 0,5–2 мм, которые получают методом электролитического осаждения металлов (никель, медь) на высокопористый ячеистый пенополиуретан.

Список литературы

1. Тумилович В.В., Пилиневич Л.П., Савич В.В. *Пористые порошковые материалы и изделия на их основе для защиты здоровья человека и охраны окружающей среды: получение, свойства, применение*. Минск: Беларус. наука; 2010.
2. Shaddon R.W.L. Electrically enhanced collection of reparable aerosols in granular bed filters at low Reynolds numbe. *IEEE Trans. Ind. appl.* 1985;21(2):501-506.
3. Wang C. *Dust collection by particle inertia and electrical forces*. Powder Techn. Pap. Int. Symp. Kyoto; 1981.
4. Мазус М.Г., Малыгин А.Д., Моргулес М.Л. *Фильтры для улавливания промышленных пылей*. Москва: Машиностроение; 1985.
5. Двухименный В.А., Столяров Б.М., Черный С.С. *Системы очистки воздуха от аэрозольных частиц на АЭС*. Москва: Энергоиздат; 1987.
6. Галкин А.Е., Тумилович М.В., Пилиневич Л.П. Эффективность фильтрации аэрозолей в условиях действия электрических сил в зависимости от скорости потока. *Материалы. Технологии. Инструменты*. 2010;15(2):78-84.
7. Пилиневич Л.П., Мазюк В.В., Рак А.Л. *Пористые порошковые материалы с анизотропной структурой для фильтрации жидкостей и газов*. Минск: ОДО «Томпик»; 2005.

References

1. Tumilovich V.V., Pilinevich L.P., Savich V.V. [*Porous powder materials and products based on them for the protection of human health and environmental protection: preparation, properties, application*]. Minsk: Belarus. Science; 2010. (In Russ.)
2. Shaddon R.W.L. Electrically enhanced collection of reparable aerosols in granular bed filters at low Reynolds numbe. *IEEE Trans. Ind. appl.* 1985;21(2):501-506.
3. Wang C. *Dust collection by particle inertia and electrical forces*. Powder Techn. Pap. Int. Symp. Kyoto; 1981.
4. Mazus M.G., Malygin A.D., Morgulis M.L. [*Filters for capturing industrial dust*]. Moscow: Mashinostroenie; 1985. (In Russ.)
5. Dvukhimenny V.A., Stolyarov B.M., Cherny S.S. [*Air purification systems from aerosol particles at nuclear power plants*]. Moscow: Energoizdat; 1987. (In Russ.)
6. Galkin A.E., Tumilovich M.V., Pilinevich L.P. [Filtration efficiency of aerosols under the action of electric forces depending on the flow rate]. *Materials. Technologies. Tools. = Materialy. Tekhnologii. Instrumenty*. 2010;15(2):78-84. (In Russ.)
7. Pilinevich L.P., Mazyuk V.V., Rak A.L. [*Porous powder materials with anisotropic structure for filtration of liquids and gases*]. Minsk: ODO "Tompik"; 2005. (In Russ.)

Вклад авторов

Пилиневич Л.П. провел теоретический анализ исследуемой проблемы.

Тумилович М.В. сформулировал цель и задачи исследований, разработал схему стенда для определения эксплуатационных характеристик фильтрующих устройств, подготовил введение, заключение, провел анализ полученных результатов.

Румянцев Д.М. Гриб К.В. и Бунас А.Г. провели экспериментальные исследования влияния параметров фильтрации и фильтрующих элементов на эксплуатационные характеристики устройств.

Authors' contribution

Pilinevich L.P. carried out a theoretical analysis of the problem under study.

Tumilovich M.V. formulated the purpose and objectives of the research, developed a scheme of the stand for determining the operational characteristics of filtering devices, wrote an introduction, conclusion, and analyzed the results obtained.

Rumyantsev D.M. Grib K.V. and Bunas A.G. conducted experimental studies of the influence of filtration parameters and filter elements on the operational characteristics of devices.

Сведения об авторах

Пилиневич Л.П., 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.

Румянцев Д.М., аспирант кафедры инженерной психологии и эргономики Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Гриб К.В., аспирант кафедры инженерной психологии и эргономики Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Бунас А.Г., аспирант-соискатель кафедры инженерной психологии и эргономики Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники..

Information about the authors

Pilinevich L.P., Dr. of Sci. (Tech.), Professor, Professor at the Department of Engineering Psychology and of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Tumilovich M.V., Dr. of Sci. (Tech.), Associate Professor, Dr. of Sci., Associate Professor, Head of the Department of Highest Qualification Scientific Personnel Training of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Rumiantsev D.M., Postgraduate at the Department of Engineering Psychology and Ergonomics of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Hryb K.V., Postgraduate at the Department of Engineering Psychology and Ergonomics of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Bunas A.G., Postgraduate Candidate at the Department of Engineering Psychology and Ergonomics of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровка, 6,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники;
тел.+375-17-293-88-83;
e-mail: tumilovich@bsuir.by
Тумилович Мирослав Викторович

Address for correspondence

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



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2022-20-4-96-103>

Оригинальная статья / Original paper

УДК 159.9.072+159.9.078+612.821

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ ДИАГНОСТИКА СПОСОБНОСТИ К ВЫРАБОТКЕ НАВЫКА РЕЛАКСАЦИИ У МАШИНИСТОВ ЛОКОМОТИВНЫХ БРИГАД

Н.В. ЩЕРБИНА

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

Поступила в редакцию 21 марта 2022

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2022

Аннотация. Исследована эффективность проведения БОС-тренингов на выработку навыка релаксации с использованием аппаратно-программного комплекса NeuroDog. Проведен дискриминантный анализ (метод многомерного статистического анализа), который позволил оценить качество и точность группирования машинистов и помощников машинистов локомотивных бригад в группы с разной степенью успешной выработки навыка релаксации. Выделены наиболее информативные признаки деления машинистов на группы. Проверка точности представленных групп была проведена с помощью линейных квалификационных функций, информативность признаков оценивалась по F -критерию Фишера. Критический уровень значимости при проверке статистических гипотез $p < 0,05$. В ходе дискриминантного анализа рассчитан ряд характеристик, необходимых для интерпретации групп и их различий: линейные классификационные функции, канонические дискриминантные функции, факторная нагрузка канонических дискриминантных функций. Показаны информативные дифференциально-диагностические признаки для проведения диагностики машинистов локомотивных бригад на выработку навыка релаксации. Приведены формулы линейных квалификационных функций. Точность диагностики в среднем составила 84,91 %.

Ключевые слова: биологическая обратная связь, электродермальная активность кожи, саморегуляция, выработка навыка релаксации, функциональное состояние, дискриминантный анализ, моделирование.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Благодарности. Автор статьи благодарит всех участников эксперимента.

Для цитирования. Щербина Н.В. Дифференциальная диагностика способности к выработке навыка релаксации у машинистов локомотивных бригад. Доклады БГУИР. 2022; 20(4): 96-103.

DIFFERENTIAL DIAGNOSIS OF THE ABILITY TO DEVELOP THE SKILL OF RELAXATION IN THE DRIVERS OF LOCOMOTIVE CREWS

NATALIA V. SHCHERBINA

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

Submitted 21 March 2022

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2022

Abstract. The effectiveness of biofeedback trainings to develop relaxation skills was investigated using the NeuroDog hardware and software complex. Discriminant analysis (a method of multivariate statistical analysis) was carried out, which made it possible to assess the quality and accuracy of the grouping of drivers and assistant drivers of locomotive crews into groups with varying degrees of successful development of the relaxation skill. Highlighted the most informative signs of dividing drivers into groups. The accuracy of the presented groups was checked using linear qualification functions, the informativeness of the features was assessed by Fisher's F-criterion. The critical level of significance when testing statistical hypotheses is $p < 0.05$. In the course of discriminant analysis, a number of characteristics necessary for the interpretation of groups and their differences were calculated, such as: linear classification functions, canonical discriminant functions, and factor load of canonical discriminant functions. Informative differential diagnostic signs for diagnostics of locomotive crew drivers for the development of relaxation skills were shown. Formulas of linear qualifying functions are given. The diagnostic accuracy was 84.91 % on average.

Keywords: biofeedback, skin electrodermal activity, self-regulation, relaxation skill development, functional state, discriminant analysis, modeling.

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

Gratitude. The author of the article thanks all participants of the experiment.

For citation. Shcherbina N.V. Differential Diagnosis of the Ability to Develop the Skill of Relaxation in the Drivers of Locomotive Crews. Doklady BGUIR. 2022; 20(4): 96-103.

Введение

Представленная статья посвящена изучению эффективности выработки навыка релаксации одним из наиболее перспективных методов – методом биологической обратной связи (БОС) [1, 2]. БОС является одним из наиболее эффективных способов обучения управлению функциональным состоянием человека [3–5].

Цель работы – выявление наиболее важных дифференциально-диагностических критериев из психофизиологических и личностных показателей для диагностики успешной выработки навыка релаксации у машинистов и помощников машинистов (далее – машинистов) локомотивных бригад.

В работе [6] показано, что способность испытуемых к успешной выработке навыка релаксации зависит от совокупности психофизиологических и личностных показателей машинистов и помощников машинистов локомотивных бригад. С целью выявления наиболее значимых психофизиологических и личностных показателей машинистов локомотивных бригад применили дискриминантный анализ [7] для оценки уровня успешной выработки навыка релаксации. Для моделирования психофизиологических и личностных характеристик личности исследовали машинистов локомотивных бригад. Модель «уровня успешной выработки навыка релаксации» построена на основании выборки из 106 наблюдений.

В ходе дискриминантного анализа рассчитан ряд характеристик, необходимых для интерпретации групп и их различий, – линейные классификационные функции, канонические дискриминантные функции, факторная нагрузка канонических дискриминантных функций. Дискриминантный анализ дал возможность построить графики положения групп в признаковом пространстве.

Методика проведения эксперимента

В исследовании приняли участие 106 машинистов локомотивных бригад Моторвагонного депо г. Минска в возрасте от 18 до 65 лет, мужчины, средний возраст по выборке составил $32 \pm 11,4$ года. Стаж работы участников эксперимента – в диапазоне от 1 до 36 полных лет [1].

Для выработки навыка релаксации были проведены сеансы БОС-тренинга с использованием аппаратно-программного комплекса NeuroDog [1]. Комплекс предназначен для обучения пользователя навыкам релаксации путем визуализации его текущего уровня

бодрствования на экране монитора; текущий уровень бодрствования пользователя оценивается путем измерения параметров электродермальной активности кожи с помощью специального датчика (браслет, перстень). Количество БОС-сеансов – 10. Продолжительность каждого сеанса составляла 15–20 мин. По результатам БОС-тренинга испытуемые были распределены на три группы [1]: 1 – успешная (47 чел.); 2 – менее успешная (39 чел.); 3 – неуспешная (20 чел.). Оценка профессионально важных качеств испытуемых проводилась с использованием УПДК-МК [1].

Результаты и их обсуждение

Для анализа групп, сформированных во время исследования [1], использовался один из методов многомерного статистического анализа – дискриминантный анализ. Расчеты выполнены в электронном пакете Statistica 10.0.

Дискриминантный анализ позволил оценить качество группирования представленных на анализ групп, выделить наиболее информативные признаки деления машинистов локомотивных бригад на группы, точность группирования. Критерии распределения машинистов в группы автором рассмотрены ранее в статье [1].

Группирующей переменной в дискриминантном анализе явилась группа. В качестве независимых переменных выбраны 56 переменных, обозначающих разнообразные психофизиологические и личностные показатели машинистов локомотивных бригад.

Одним из важных показателей адекватности модели дискриминации испытуемых на исследуемые группы является качество (корректность) классификации участников исследования, проведенной на основании предсказаний, сделанных с помощью полученных дискриминантных функций. Результаты классификации машинистов локомотивных бригад на три группы с помощью установленной дискриминантной модели показывают, что дискриминантные функции корректно классифицируют 85,11 % испытуемых из группы 1, 89,74 % испытуемых из группы 2 и 75,00 % испытуемых из группы 3. При проверке линейными классификационными функциями были неверно разнесены пять испытуемых в группе 1, шесть испытуемых во группе 2 и пять испытуемых в группе 3. В целом имеющиеся функции правильно предсказывают принадлежность к своей группе для 84,91 % всех участников исследования (табл. 1).

Таблица 1. Матрица классификации групп
Table 1. Group classification matrix

Группа Group	Процент Percent	G_1:1 $p = ,44340$	G_2:2 $p = ,36792$	G_3:3 $p = ,18868$
G 1:1	85,10638	40	4	3
G 2:2	89,74359	2	35	2
G 3:3	75,00000	3	2	15
Всего / Total	84,90566	45	41	20

В результате дискриминантного анализа, проведенного пошаговым методом с включением переменных, была получена модель, позволяющая наилучшим образом предсказывать, к какой группе стоит отнести машиниста локомотивной бригады. Ее адекватность как различительную мощность характеризует лямбда Уилкса, равная 0,17. Проведенный с ее помощью тест показывает наличие статистически значимых различий ($F(72, 136) = 2,69$; $p = 0,000$) средних арифметических значений каждой из построенных дискриминантных функций между тремя сравниваемыми группами.

Учитывая, что значения лямбда Уилкса принадлежат интервалу [0,1] (значения, лежащие около 0, свидетельствуют о хорошей дискриминации, а значения, лежащие около 1, свидетельствуют о плохой дискриминации), полученное для заданной модели значение 0,17 означает, что эта модель хорошо справляется с дискриминированием исследуемых совокупностей испытуемых.

В пошаговом анализе дискриминантной функцией в модель включены 36 из 56 отобранных переменных, среди которых были отобраны информативные переменные с уровнями значимости от 0,04 до 0,0006.

С использованием коэффициентов линейных дискриминантных функций получены следующие линейные классификационные формулы (1)–(3), по которым для набора переменных

нового объекта (машиниста, помощника машиниста локомотивной бригады) выполняется расчет для каждой группы. Далее новый объект относят к той группе, для которой линейная классификационная функция получила наибольшее значение.

$$\begin{aligned} \text{Группа 1 (успешная)} = & 5,345x_1 - 3,588x_2 + 3,137x_3 + 9,288x_4 + 2,722x_5 + 1,175x_6 + 3,370x_7 + \\ & + 0,073x_8 + 1,304x_9 - 0,037x_{10} + 0,310x_{11} + 0,04x_{12} - 9,54x_{13} + 4,037x_{14} + 0,785x_{15} - 0,619x_{16} - \\ & - 0,861x_{17} + 15,988x_{18} + 2,591x_{19} - 0,473x_{20} - 17,594x_{21} - 1,025x_{22} - 1,271x_{23} + 6,848x_{24} + \\ & + 4,857x_{25} + 0,109x_{26} - 1,221x_{27} - 0,837x_{28} + 2,716x_{29} + 2,247x_{30} - 0,084x_{31} - 1,496x_{32} + \\ & + 0,790x_{33} - 0,013x_{34} + 0,467x_{35} + 15,850x_{36} - 383,752. \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{Группа 2 (менее успешная)} = & 4,825x_1 - 2,711x_2 + 2,788x_3 + 7,191x_4 + 2,404x_5 + 1,260x_6 + 3,557x_7 + \\ & + 0,119x_8 + 0,704x_9 - 0,086x_{10} + 0,341x_{11} - 0,005x_{12} - 8,202x_{13} + 3,812x_{14} + 0,644x_{15} - 0,308x_{16} - \\ & - 0,131x_{17} + 12,968x_{18} + 1,882x_{19} - 0,382x_{20} - 14,646x_{21} - 0,641x_{22} - 0,175x_{23} + 6,060x_{24} + 4,310x_{25} + \\ & + 0,097x_{26} - 1,210x_{27} - 0,559x_{28} + 2,411x_{29} + 2,120x_{30} - 0,099x_{31} - 0,470x_{32} + 0,608x_{33} + 0,090x_{34} + \\ & + 0,400x_{35} + 14,499x_{36} - 359,533. \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{Группа 3 (неуспешная)} = & 6,043x_1 - 3,263x_2 + 3,268x_3 + 8,151x_4 + 2,566x_5 + 1,376x_6 + 4,248x_7 + \\ & + 0,094x_8 + 0,914x_9 - 0,072x_{10} + 0,336x_{11} + 0,032x_{12} - 9,659x_{13} + 4,263x_{14} + 0,821x_{15} - 0,424x_{16} - \\ & - 0,522x_{17} + 14,735x_{18} + 1,780x_{19} - 0,446x_{20} - 17,558x_{21} - 0,913x_{22} - 0,553x_{23} + 6,981x_{24} + 5,015x_{25} + \\ & + 0,112x_{26} - 1,546x_{27} - 0,648x_{28} + 2,452x_{29} + 2,175x_{30} - 0,095x_{31} - 0,430x_{32} + 0,599x_{33} + 0,178x_{34} + \\ & + 0,350x_{35} + 15,054x_{36} - 405,516, \end{aligned} \quad (3)$$

где x_1 – количество ошибок, допущенных при оценке концентрации внимания; x_2 – фактор G: низкая-высокая нормативность поведения (т. Кеттелла); x_3 – суммарное отклонение от аутогенной нормы (т. Люшер); x_4 – интернальность в области достижений; x_5 – среднее значение ударов по теппинг-тесту; x_6 – ММРІ 0: социальная интроверсия; x_7 – фактор В: конкретное – абстрактное мышление (т. Кеттелла); x_8 – время выполнения задания для оценки эмоциональной устойчивости; x_9 – стаж; x_{10} – среднее квадратическое отклонение времени простой двигательной реакции; x_{11} – среднее время реакции на сигналы без предупреждения (оценка бдительности); x_{12} – среднее время реакции на сигналы с предупреждением (оценка бдительности); x_{13} – число пропущенных сигналов с предупреждением (оценка бдительности); x_{14} – фактор Q1: консерватизм-радикализм (т. Кеттелла); x_{15} – ММРІ 1: невротический сверхконтроль; x_{16} – ММРІ 3: эмоциональная лабильность, демонстративность, истерия; x_{17} – психологическое напряжение (т. Люшер); x_{18} – количество ошибок, допущенных в простой двигательной реакции; x_{19} – фактор М: практичность – мечтательность (т. Кеттелла); x_{20} – ММРІ 6: ригидность; x_{21} – число пропущенных сигналов без предупреждения (оценка бдительности); x_{22} – возраст; x_{23} – фактор Е: податливость – независимость (т. Кеттелла); x_{24} – фактор Q3: низкий – высокий самоконтроль (т. Кеттелла); x_{25} – фактор L: доверчивость-подозрительность (т. Кеттелла); x_{26} – среднее квадратическое отклонение времени реакции на движущийся объект; x_{27} – психологическое утомление (Люшер); x_{28} – межличностное доминирование (Лири); x_{29} – внутриличностное доминирование (Лири); x_{30} – ММРІ 4: импульсивность; x_{31} – среднее квадратическое отклонение времени сложной двигательной реакции; x_{32} – общая интернальность; x_{33} – ММРІ 7: тревожность; x_{34} – ММРІ 8: индивидуалистичность; x_{35} – ММРІ 5: мужественность-женственность; x_{36} – число неправильных нажатий (оценка бдительности).

Полученный результат расстояний между группами свидетельствует о различимости между собой групп 1, 2 и 3. Расстояние Махаланобиса между группами 1 и 2 – 9,32; между группами 1 и 3 – 8,37; между группами 2 и 3 – 9,1. При рассмотрении F -критерия и уровня значимости получена оценка различимости групп. F -критерий между группами 1 и 2 равен 3,64 ($p < 0,000002$); между группами 1 и 3 равен 2,15 ($p < 0,003230$); между группами 2 и 3 равен 2,21 ($p < 0,002490$).

Осуществленный в рамках дискриминантного анализа канонический анализ позволил построить две дискриминантные (канонические) функции для наилучшего дискриминирования

трех групп. Проведенный при помощи определенных для каждой функции лямбд Уилкса тест установил, что средние значения каждой функции статистически значимо отличаются между тремя группами машинистов: для функции (корня) 1 $\chi^2 = 151,43$ ($df = 72$) при $p = 0,000000$, для функции (корня) 2 $\chi^2 = 59,55$ ($df = 35$) при $p = 0,005960$. При этом обнаруженная лямбда Уилкса для корня 1 равна 0,17, лямбда Уилкса для корня 2 равна 0,50. Канонические коэффициенты корреляции (для функции 1 $R = 0,81$, для функции 2 $R = 0,71$), как меры удачности разделения групп с помощью данных дискриминантных функций, свидетельствуют о том, что обе функции хорошо справляются с этой задачей, если учесть, что канонический R изменяется в пределах значений от 0 до 1, и чем он больше, тем лучше разделение.

Получены стандартизированные коэффициенты β каждой дискриминантной переменной (для 36 переменных, вошедших в модель) для обеих канонических функций (табл. 2, столбцы 2, 3). По значениям β определяем частный вклад каждой переменной в предсказание исхода для испытуемых. Чем больше стандартизированный коэффициент по модулю, тем большим является собственный вклад соответствующей переменной в дискриминацию, выполняемую соответствующей дискриминантной функцией. Соответственно, переменные с наибольшими по модулю коэффициентами β вносят наибольший вклад в различение изучаемых групп.

По таблице факторной структуры канонических линейных дискриминантных функций (табл. 2, столбцы 4, 5) судят о корреляционной связи наблюдавшихся переменных, включенных в модели с каноническими линейными дискриминантными функциями. Данные о факторной нагрузке канонических линейных дискриминантных функций могут использоваться для оценки коэффициентов «весомости» переменных при решении диагностической задачи.

Таблица 2. Стандартизированные коэффициенты дискриминантных переменных канонических функций. Факторная нагрузка канонических линейных дискриминантных функций
Table 2. Standardized coefficients of discriminant variables of canonical functions. Factor load of canonical linear discriminant functions

Переменная Variable	Стандартизированные коэффициенты, β Standardized ratios, β		Факторная нагрузка Factor load	
	Корень 1 Root 1	Корень 2 Root 2	Корень 1 Root 1	Корень 2 Root 2
Концентрация внимания, количество ошибок	-0,31599	-0,707171	0,011909	-0,307669
Фактор G: низкая–высокая нормативность поведения (Кеттелла)	0,58642	0,070352	0,151181	-0,156431
Суммарное отклонение от аутогенной нормы (Люшер)	-0,65321	-0,673506	-0,105107	-0,117627
Интернальность в области достижений	-1,09434	0,096226	-0,110562	-0,158452
Теппинг/ср.зн.	-0,84593	0,021820	-0,108112	0,019373
ММПИ, 0: социальная интроверсия	0,27268	-0,611827	-0,016787	-0,239506
Фактор В: конкретное – абстрактное мышление, интеллект (Кеттелла)	0,14464	-0,701596	-0,008253	-0,042793
Время выполнения задания (эмоциональная устойчивость)	0,66115	0,016010	0,168856	-0,048423
Стаж	-1,58373	0,344736	-0,113374	0,115838
Среднеквадратическое отклонение времени простой двигательной реакции	-0,34499	0,097105	-0,116365	0,132898
Среднее время реакции на сигналы без предупреждения (бдительность)	0,61134	-0,271481	0,145721	-0,078314
Среднее время реакции на сигналы с предупреждением (бдительность)	-1,00905	-0,356083	0,086646	-0,129380
Число пропущенных сигналов с предупреждением (бдительность)	0,45129	0,306621	0,121340	0,062628

Продолжение таблицы 2

Фактор Q: консерватизм-радикализм (Кеттелла)	-0,15187	-0,275534	-0,047403	-0,156038
ММРІ, 1: невротический сверхконтроль	-0,35099	-0,310377	-0,073307	-0,086799
ММРІ, 3: эмоциональная лабильность	0,81950	-0,155750	0,065777	-0,114597
Психологическое напряжение (Люшер)	0,49682	0,002733	0,013855	0,049818
Количество ошибок в простой двигат. реакции	-0,61020	-0,040090	-0,088164	0,076559
Фактор М: практичность-мечтательность (Кеттелла)	-0,44877	0,363365	0,006495	0,077859
ММРІ, 6: ригидность, паранойя	0,30825	0,064832	0,043455	-0,145466
Число пропущенных сигналов без предупреждения (оценка бдительности)	0,59176	0,328466	0,054434	0,066736
Возраст	1,45716	0,315323	-0,051599	0,112438
Фактор Е: податливость – независимость (Кеттелла)	0,59379	-0,133162	0,062405	-0,043719
Фактор Q3: низкий – высокий самоконтроль (Кеттелла)	-0,46255	-0,359041	-0,038370	-0,124104
Фактор L: доверчивость - подозрительность (Кеттелла)	-0,35443	-0,327123	-0,030396	-0,066715
Среднеквадратическое отклонение времени реакции на движущийся объект, мс	-0,29115	-0,268911	-0,022256	-0,135787
Психологическое утомление (Люшер)	0,00522	0,311392	-0,029187	-0,050550
Доминирование, межлич. (Лири)	0,57268	-0,055865	0,048139	0,059073
Доминирование, внутрлич. (Лири)	-0,56442	0,268286	-0,059918	0,183016
ММРІ, 4: импульсивность	-0,32191	0,036410	0,058657	-0,077099
Среднеквадратическое отклонение времени сложной двигательной реакции, мс	-0,21895	0,083036	-0,082187	-0,025195
Интернальность общая шкала	0,54923	-0,375269	-0,076752	-0,125410
ММРІ, 7: тревожность	-0,52321	0,362515	-0,038342	-0,078428
ММРІ, 8: индивидуалистичность	0,27992	-0,462347	0,060323	-0,147452
ММРІ, 5: мужественность - женственность	-0,24554	0,375461	-0,016341	0,066634
Число неправильных нажатий (бдительность)	-0,28171	0,040720	-0,020568	0,174063
Соб. зн.	1,92921	1,006591	–	–
Кум.доля	0,65713	1,000000	–	–

Для того чтобы охарактеризовать исследуемые группы машинистов локомотивных бригад с точки зрения различающих их дискриминантных переменных, необходимо рассмотреть изображенную на рис. 1 диаграмму рассеяния канонических значений, вычисленных по каждой канонической функции для каждого испытуемого.

На диаграмме отчетливо видно, что первая дискриминантная функция (корень 1) хорошо отделяет группу 1, отличающуюся наивысшей степенью успешности выработки навыка релаксации, от групп 2 и 3. Среднее значение данной канонической функции равно: -1,39 в группе 1; 1,66 в группе 2; 0,04 – в группе 3.

С помощью второй дискриминантной функции (корня 2) можно разделить испытуемых второй и третьей групп, характеризующихся соответственно средней и низкой степенью

успешности формирования навыка релаксации. В группе 2 среднее значение канонической функции 2 равно 0,49, а в группе 3 равно –2,05.

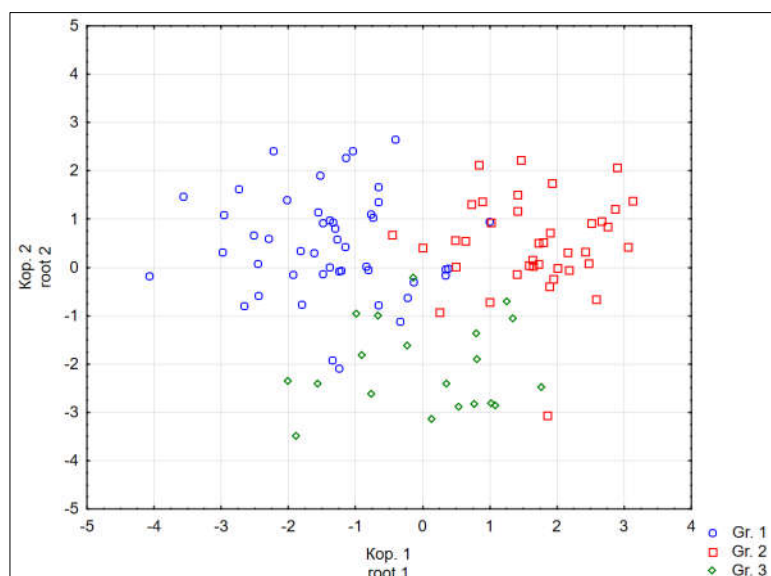


Рис. 1. Диаграмма рассеяния канонических значений для испытуемых
Fig. 1. Scatter diagram of canonical values for subjects

Таким образом, канонические значения корня 2 в группе со средним навыком релаксации в целом выше, чем в группе с плохим навыком.

Заключение

По результатам расчетов выявлено:

1. При проведении дискриминантного анализа было подтверждено наличие различий между группами в успешной выработке навыка релаксации.
2. Из табл. 1 видно, что точность диагностики по решающим правилам в среднем составила 84,91 %, для группы 1 – 85,11 %, для группы 2 – 89,74 %, для группы 3 – 75 %.
3. По формулам (1)–(3) рассчитываются линейные квалификационные функции. Отнесение нового объекта к соответствующей группе по успешной выработке навыка релаксации (1, 2 или 3) выполняется по максимальному значению линейных квалификационных функций.
4. Полученные стандартизированные коэффициенты β (табл. 2) позволяют определить частный вклад каждой переменной в предсказание исхода для испытуемого.
5. Полученные данные факторной нагрузки канонических линейных дискриминантных функций могут использоваться для оценки коэффициентов «весомости» переменных при решении диагностической задачи.

Список литературы

1. Щербина Н. В., Савченко В.В., Яшин К.Д. Исследование метода выработки навыка на релаксацию с биологической обратной связью по параметрам электродермальной активности. *Новости медико-биологических наук*. 2019;1;65-73.
2. Щербина Н.В. Регуляция функционального состояния машинистов локомотивных бригад с применением БОС-тренинга: факторный анализ экспериментальных данных. *Доклады БГУИР*. 2021;19(4);28-36. DOI: 10.35596/1729-7648-2021-19-4-28-36.
3. Сорокин Н.В., Гордиенко А.В., Леонтьев О.В., Соловьев М.В., Дударенко С.В. Динамика качества жизни при применении тренингов биологической обратной связи у больных артериальной гипертензией с тревожно-депрессивными расстройствами. *Вестник психотерапии*. 2021;77(82);27-36.
4. Александров А.Ю., Уплисова К.О., Иванова В.Ю. Влияние параметров и характера биологической обратной связи на амплитуду физиологического тремора. *Физиология человека*. 2020;46(2):22-29.

5. Бабич Т.Ю., Плехо Р.М., Юрченко Е.Ю., Сулейманова С.Р., Гришко Т.В. Метод функционального биоуправления при подготовке беременных женщин к родам. *Медико-фармацевтический журнал Пульс*. 2020;22(3):24-28. DOI 10.26787/nydha-2686-6838-2020-22-3-24-28.
6. Щербина Н.В. Анализ различий между группами машинистов локомотивных бригад с разной степенью способности к произвольной регуляции их функционального состояния. *Доклады БГУИР*. 2022;20(2):21-29. DOI: 10.35596/1729-7648-2022-20-2-21-29.
7. Ким Д., Мьюллер Ч.У. *Факторный, дискриминантный и кластерный анализ*. Пер. с англ. Москва: Финансы и статистика; 1989.

References

1. Shcherbina N.V., Savchenko V.V., Yashin K.D. [Research of the method of developing a skill for relaxation with biological feedback on the parameters of electrodermal activity]. *Novosti mediko-biologicheskikh nauk = News of medical and biological Sciences*. 2019;1;65-73. (in Russ.)
2. Shcherbina N.V. [Regulation of the functional state of locomotive crew drivers using biofeedback training: factor analysis of experimental data]. *Doklady BGUIR=Doklady BGUIR*. 2021;19(4):28-36. DOI: 10.35596/1729-7648-2021-19-4-28-36. (in Russ.)
3. Sorokin N.V., Gordienko A.V., Leontev O.V., Solovov M.V., Dudarenko S.V. [Dynamics of quality of life when applying biological feedback training in patients with arterial hypertension with anxiety-depressive disorders]. *Vestnik psihoterapii = Psychotherapy Bulletin*. 2021; 77(82); 27-36. (in Russ.)
4. Aleksandrov A.Y., Uplisova K.O., Ivanova V.Y. [Biofeedback specialization effect on physiological tremor amplitude dynamics]. *Fiziologiya cheloveka = Human Physiology*. 2020;46(2):22-29. (in Russ.)
5. Babich T.Yu., Pieho R.M., Yurchenko E.Yu., Suleymanova S.R., Grishko T.V. [The use of functional biocontrol during the antenatal education of women]. *Mediko-farmaceuticheskij zhurnal Pul's = Medical and pharmaceutical journal Pulse*. 2020;22(3):24-28. DOI 10.26787/nydha-2686-6838-2020-22-3-24-28. (in Russ.)
6. Shcherbina N.V. [Analysis of differences between groups of locomotive crew drivers with different degrees of ability to arbitrarily regulate their functional state]. *Doklady BGUIR=Doklady BGUIR*. 2022;20(2):21-29. DOI: 10.35596/1729-7648-2022-20-2-21-29. (in Russ.)
7. Kim J., Mueller C.W. [*Factor, discriminant and cluster analysis*]. Per. from English. Moscow: Finance and Statistics; 1989. (in Russ.)

Сведения об авторах

Щербина Н.В., старший преподаватель кафедры инженерной психологии и эргономики Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Information about the authors

Shcherbina N.V., Senior Lecturer at 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.: +375-29-755-92-70;
e-mail: shcherbina@bsuir.by
Щербина Наталья Витальевна

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka St., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics;
tel.: +375-29-755-92-70;
e-mail: shcherbina@bsuir.by
Shcherbina Natalia Vitalievna

