

---

---

# ДОКЛАДЫ БГУИР

---

---

**Выходит два раза в квартал**

Научный журнал издается с января 2003 года

**Главный редактор М.П. Батура**

**Редакционная коллегия:**

**А.П. Кузнецов** (зам. главного редактора),  
**Л.М. Лыньков** (зам. главного редактора),

**Т.В. Борботько** (ответственный секретарь),  
**В.Е. Борисенко, А.Л. Гурский, С.Е. Карпович, В.К. Конопелько,**  
**А.А. Кураев, В.А. Лабунов, В.В. Муравьев, М.М. Татур**

**Редакционный совет:**

**И.И. Абрамов, В.Е. Агабеков, В.В. Баранов, А.И. Белоус, И.В. Боднар, С.В. Бордусов,**  
**С.В. Гапоненко, В.В. Голенков, В.Ф. Голиков, Л.И. Гурский, А.П. Достанко, В.А. Емельянов,**  
**В.М. Колешко, Ф.Ф. Комаров, Ф.П. Коршунов, С.П. Кундас, В.А. Куренев, В.И. Курмашев,**  
**Н.И. Листопад, С.В. Лукьянец, В.Е. Матюшков, Л.И. Минченко, Ф.И. Пантелеенко, А.А. Петровский,**  
**В.А. Пилипенко, С.Л. Прищепа, А.М. Русецкий, В.А. Сокол, Н.К. Толочко, А.А. Хмыль, 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](http://www.doklady.bsuir.by)

E-mail: [doklady@bsuir.by](mailto:doklady@bsuir.by)

## СОДЕРЖАНИЕ

### *ЭЛЕКТРОНИКА, РАДИОФИЗИКА, РАДИОТЕХНИКА, ИНФОРМАТИКА*

<b>Бахтизин В.В., Оношко Д.Е.</b> Модель обнаружения уязвимостей в web-приложениях .....	5
<b>Кожевников М.М., Чумаков О.А., Илюшин И.Э., Старовойтов А.В.</b> Комбинированный метод синтеза траекторий сборочно-сварочных роботов-манипуляторов в рабочей среде с препятствиями.....	12
<b>Сыман А.Д., Яблонский А.П., Кашко И.А., Гирель К.В., Бондаренко А.В.</b> Структурные свойства частиц пористого кремния, формируемых методом магнийтермического восстановления диоксида кремния, изготовленного из кремнийсодержащих растений .....	19
<b>Печень Т.М., Прудник А.М.</b> Моделирование экранирующих покрытий со способностью интерференционного гашения отраженного излучения ультрафиолетового диапазона длин волн .....	26
<b>Шашок В.Н.</b> Синтез частотно-избирательных цепей с внутренними нулями функции передачи .....	32
<b>Мордачев В.И.</b> Электромагнитный фон, создаваемый базовым и абонентским радиооборудованием сотовых радиосетей .....	38
<b>Пастух И.М., Соколова Г.Н.</b> Вероятностные характеристики субпроцессов в тлеющем разряде.....	45
<b>Сивцевич В.В., Виноградов А.Е.</b> Формирование эталонов в устройстве распознавания движущихся наземных объектов .....	51
<b>Габец С.А., Седышев С.Ю.</b> Выбор алгоритма самонастройки для адаптивного устройства когерентного накопления отраженного сигнала в приемном устройстве радиолокатора обзора .....	57

<b>Белосова Е.С., Мохамед А.М.А., Касанин С.Н.</b> Композиционные материалы на основе технического углерода и гидрогеля для скрытия объектов от средств технической разведки .....	64
<b>Бойправ О.В., Борботько Т.В.</b> Влияние размера фракций влагосодержащего порошкообразного перлита на его значения проводимости .....	71
<b>Павловская О.В., Давыдовский А.Г.</b> Моделирование информационной системы оценки надежности водителей автотранспортных средств при стрессе .....	76
<b>Шерстнёв А.И., Чубенко Е.Б., Редько С.В., Петрович В.А., Пилипенко В.А., Бондаренко В.П.</b> Формирование нанокompозитных материалов на основе пористого кремния и оксида цинка электрохимическим методом .....	82
<b>Ахмед А.А.А., Аль-Адеми Я.Т.А., Насонова Н.В., Пулко Т.А., Лыньков Л.М.</b> Исследование влияния влажности на оптические характеристики тканых материалов с наноструктурированным ферромагнитным микропроводом.....	89
<b>Ahmed M.S., Drobov A.N.</b> Influence of plasma nitriding on surface roughness of steels .....	95

**КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ**

<b>Лазарук С.К., Купреева О.В., Исаев Д.В., Горбачев Ф.А., Ластовка А.С.</b> Влияние поверхностной структуры титановых имплантатов на реакцию со стороны костной ткани .....	100
<b>Богущ В.А.</b> Композиционные влагосодержащие экраны электромагнитного излучения на основе сфагновых мхов .....	104

Редактор Т. В. МИРОНЕНКО

Компьютерный дизайн и верстка О. В. БОЙПРАВ

---

Подписано в печать 16.02.2016. Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная. Отпечатано на ризографе.

Усл. печ. л. 13,02. Уч.-изд. л. 11,7. Тираж 100 экз. Заказ 31.

Индекс для индивидуальной подписки 00787.

Индекс для ведомственной подписки 007872.

---

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

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

© УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», 2016

---

---

# DOKLADY BGUIR

---

---

**Published twice quarterly**

The journal has been published since January, 2003

**Editor-In-Chief M.P. Batura**

Address of editorial office: P. Brovka Str., 6, Room 326, Minsk, 220013, Belarus

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

Web-site: [www.doklady.bsuir.by](http://www.doklady.bsuir.by)

E-mail: [doklady@bsuir.by](mailto:doklady@bsuir.by)

## CONTENTS

### *ELECTRONICS, RADIOPHYSICS, RADIOENGINEERING, INFORMATICS*

<b>Bakhtizin V.V., Onoshko D.E.</b> A web-application vulnerability detection model .....	5
<b>Kozhevnikov M.M., Chumakov O.A., Ilushin I.E., Starovoitov A.V.</b> Combined method for trajectory syntheses of assembly and welding robotic-manipulators in workspace with obstacles .....	12
<b>Syman A.D., Yablonski A.P., Kashko I.A., Girel K.V., Bandarenka H.V.</b> Structural properties of porous silicon particles formed by magnesiothermal reduction of silicon dioxide produced from silicon containing plants .....	19
<b>Pechen T.M., Prudnik A.M.</b> The simulation of the shielding coatings with the ability of the reflected radiation interference quenching in ultraviolet wavelength range .....	26
<b>Shashok V.N.</b> Synthesis of frequency-selective ranges with internal zero of transfer function.....	32
<b>Mordachev V.I.</b> Electromagnetic background created by base and mobile radio stations of cellular communications .....	38
<b>Pastukh I.M., Sokolova G.N.</b> Probabilistic characteristics of subprocesses in a glow discharge .....	45
<b>Siutsevich V.V., Vinogradov A.E.</b> Forming of the model signal in device used to recognition of ground moving objects.....	51
<b>Gabets S.A., Sedyshev S.U.</b> Choice of self-adjustment algorithm for the adaptive device of coherent accumulation of the reflected signal in the radar intake.....	57
<b>Belousova E.S., Mohamed A.M.A., Kasanin S.N.</b> Composite materials based on carbon black and hydrogels used for hidden objects from technical intelligence service .....	64
<b>Boiprav O.V., Borbotko T.V.</b> Influence of water-containing powdered perlite fractions size on it's conductivity values .....	71
<b>Pavlovskaya O.V., Davidovskij A.G.</b> The modeling of information system for reliability assessment of motor vehicles drivers under stress.....	76

<b>Sherstnyov A.I., Chubenko E.B., Redko S.V., Petrovich V.A., Pilipenko V.A., Bondarenko V.P.</b> Formation of nanocomposite materials based on porous silicon and zinc oxide by electrochemical technique .....	82
<b>Ahmed A.A.A., Al-Ademi Y.T.A., Nasonova N.V., Pulko T.A., Lynkou L.M.</b> Effect of moisture content on optical characteristics of fabrics, containing nanostructured ferromagnetic microwire .....	89
<b>Ahmed M.S., Drobov A.N.</b> Influence of plasma nitriding on surface roughness of steels.....	95

*SHORT NOTES*

<b>Lazarouk S.K., Kupreeva O.V., Isaev D.V., Gorbacheu F.A., Lastovka A.S.</b> Influence of surface structure of titanium implants on the response from the bone tissue .....	100
<b>Bogush V.A.</b> Composite water-containing electromagnetic radiation shields based on sphagnum moss.....	104

УДК 004.052.42:004.056.53

## МОДЕЛЬ ОБНАРУЖЕНИЯ УЯЗВИМОСТЕЙ В WEB-ПРИЛОЖЕНИЯХ

В.В. БАХТИЗИН, Д.Е. ОНОШКО

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь*

*Поступила в редакцию 3 июня 2015*

Предложена модель обнаружения уязвимостей в web-приложениях, основанная на статическом анализе исходных кодов. Приводится описание положенной в основу модели системы оценок. Рассматриваются способы расширения модели для некоторых сложных случаев ее применения.

*Ключевые слова:* web-приложение, статический анализ, SQL-инъекция, уязвимость.

### Введение

В настоящее время в сфере информационных технологий наблюдается тенденция к переходу от классических desktop-приложений к web-приложениям. Обусловленный такими отличительными особенностями web-приложений, как доступность из любой точки мира, кроссплатформенность и более простой механизм обновления, этот процесс сопровождается также ростом требований к надежности таких приложений.

По данным Открытого проекта обеспечения безопасности web-приложений (OWASP) в настоящее время наиболее распространенной угрозой для различных типов приложений (включая web-приложения) являются SQL-инъекции [1]. Анализ свойств этого вида угроз показывает, что главной причиной уязвимости web-приложений к действиям злоумышленников остается некорректная обработка данных, поступающих извне. В зависимости от их характера и того, каким образом они используются в web-приложении, «сырые» данные (raw data) необходимо подвергать фильтрации (обработке), которая может как сводиться к надлежащему экранированию специальных символов или проверке числовых данных на входжение в заданные диапазоны значений, так и представлять собой более сложные алгоритмы. Если фильтрация поступающих от пользователя данных производится неправильно, оказывается возможным встроить в них фрагменты, которые при обработке web-приложением ошибочно будут распознаны как управляющие, что позволит злоумышленнику заставить его выполнить действия, не предусмотренные разработчиками web-приложения.

Обнаружение и исправление ошибок такого рода (также называемых уязвимостями) является трудоемкой рутинной задачей, для успешного решения которой требуется не только повышенная концентрация внимания, но и хорошее знание архитектуры разрабатываемого web-приложения, характер взаимосвязей его отдельных модулей и т.д. При этом любое изменение в коде самого web-приложения или программного обеспечения, входящего в состав платформы (например, обновление web-сервера), может внести новые уязвимости, а также заставить проявиться уже существовавшие, но остававшиеся скрытыми уязвимости. Следовательно, необходимо осуществлять контроль web-приложения на наличие в нем уязвимостей на протяжении всего жизненного цикла с момента появления первого прототипа.

Для обеспечения такого контроля на различных этапах процессов разработки и сопровождения необходимо решить две задачи:

- выявить и формализовать причины появления уязвимостей в web-приложениях (разработать модель web-приложения в контексте обнаружения уязвимостей);
- автоматизировать обнаружение уязвимостей к SQL-инъекциям со сбором информации об их характере (разработать модель обнаружения уязвимостей).

## Модель web-приложения в контексте обнаружения уязвимостей к SQL-инъекциям

Для построения модели обнаружения уязвимостей к SQL-инъекциям в web-приложениях необходимо обозначить причины возникновения таких уязвимостей и сформулировать критерии, по которым можно определить, содержит ли их тот или иной фрагмент исходного кода.

На рис. 1 показан принцип обработки запросов web-приложением. Браузер передает web-серверу информацию о действиях пользователя в форме HTTP-запросов. Web-сервер обеспечивает формирование соответствующих этим запросам ответов. В зависимости от собственных настроек и типа запроса web-сервер может сформировать ответ самостоятельно (запрос на получение файла, хранящегося на сервере) или делегировать формирование ответа серверу приложений. Как правило, web-сервер и сервер приложений реализуют в виде программных средств, выполняющихся одним и тем же физическим узлом.



Рис. 1. Принцип обработки запросов web-приложением

В случае делегирования задачи формирования ответа данные из HTTP-запроса передаются серверу приложений, который, в свою очередь, обеспечивает выполнение web-приложения с заданными параметрами. В большинстве случаев для формирования ответа web-приложению приходится обращаться к системам управления базами данных (СУБД), взаимодействие с которыми, как правило, происходит с помощью SQL-запросов.

Таким образом, в контексте обработки запросов web-приложение может рассматриваться как некоторое ПС, выполняющее две основные функции:

- преобразование запросов клиента (браузера) в запросы к СУБД;
- преобразование ответов СУБД в ответы для клиента.

Данные для построения ответа могут быть получены web-приложением не только из баз данных, но и из других источников: сессий, файлов, переменных окружения и т.д. С точки зрения web-приложения эти источники фактически отличаются только способом взаимодействия с ними, поэтому в дальнейшем для обозначения всех возможных источников данных целесообразно применять более общее понятие – хранилище данных.

Современные web-приложения в зависимости от своего назначения могут являться достаточно сложными ПС с большими объемами кода и сложной логикой вышеуказанных преобразований. Для решения задачи обнаружения уязвимостей целесообразно рассматривать структуру web-приложений в соответствии с моделью, проиллюстрированной рис. 2.

В роли хранилища данных, как было отмечено ранее, чаще всего выступают системы управления базами данных. Хотя по отношению к web-приложению хранилище данных является внешним компонентом, доступ к нему (в т.ч. попадание данных, полученных от пользователя) возможен только через код web-приложения, поэтому данный слой на рисунке является центральным.

К ядру приложения в данной модели следует отнести код, составляющий основу web-приложения: код используемого в качестве основы фреймворка, набор вспомогательных процедур и классов, предоставляющих внешним слоям абстрактный интерфейс для доступа к хранилищу данных.

Слой бизнес-логики представляет собой код, отвечающий непосредственно за решение web-приложением возложенных на него задач. Размеры и состав этого слоя существенно варьируются в зависимости от предметной области.

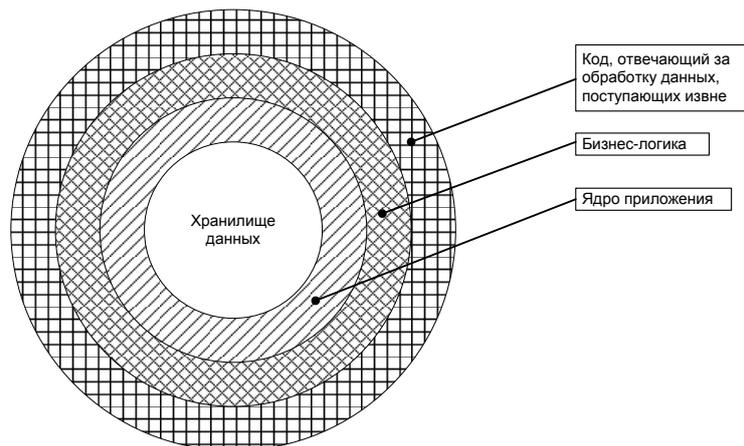


Рис. 2. Модель web-приложения в контексте обнаружения уязвимостей

Слой, который соответствует коду, отвечающему за обработку данных, поступающих извне, является уровнем абстракции, в задачи которого входит обеспечение взаимодействия кода бизнес-логики web-приложения с внешним миром.

Состав и размеры каждого слоя могут существенно различаться (вплоть до полного отсутствия) в зависимости от характера решаемых задач. Тем не менее, отсутствие какого-либо из предложенных слоев, как правило, говорит либо о невысокой сложности приложения, либо о недостаточной продуманности его архитектуры (некорректной или недостаточной декомпозиции задачи).

Такая модель web-приложения является развитием трехслойной модели из [2], где код, отвечающий за обработку данных, поступающих извне, назван слоем представления, слою бизнес-логики соответствует понятие домена, а ядро системы и хранилище данных представлены единым слоем «источник данных». Тем не менее, выделение хранилища данных как отдельного компонента является важным расширением модели, поскольку разработчик web-приложения использует этот компонент, как «черный ящик», не имея возможности изменить его поведение, а значит, ошибки в этом слое не являются ошибками web-приложения. Следовательно, исключение этого компонента из рассмотрения в рамках модели позволяет понизить ее сложность, не снижая эффективности.

SQL-инъекции, представляющие наибольший интерес ввиду их широкой распространенности, основываются на внедрении в SQL-запросы, посредством которых происходит взаимодействие web-приложения с СУБД (хранилищем данных), фрагментов кода, не предусмотренных разработчиками web-приложения. Причиной, по которой возникает такая возможность, является отсутствие, недостаточность или некорректность обработки (фильтрации) поступающих в web-приложение данных.

В качестве простого примера SQL-запроса к БД можно рассмотреть процедуру авторизации пользователя по переданной им паре значений «Логин-Пароль». Пусть web-приложение хранит информацию о пользователях и их правах доступа Users в таблице.

Пример таблицы БД с информацией о пользователях (Users)

ID	Login	PasswordHash	Access	...
1	Admin	fca1b7589df...	Full	...
2	JohnSmith	d1ba142e45...	Limited	...
...	...	...	...	...
89	BillGates	59df8512a1...	Limited	...
90	JoelSpolsky	2f135e15ad...	Full	...
...	...	...	...	...

Проверка соответствия переданных пользователем логина и пароля в данном случае сводится к проверке наличия в таблице записи со значениями соответствующих полей, равными переданным значениям. При наличии такой записи можно осуществить ее выборку и использовать полученную информацию для дальнейшей работы web-приложения (определение

прав доступа и т.п.). Таким образом, в общем виде запрос к СУБД при авторизации будет следующим:

```
SELECT * FROM `Users`  
WHERE Login = '<логин>'  
AND Passwordhash = SHA1('<Пароль>');
```

Web-приложение формирует запрос путем подстановки полученных от пользователя данных (логина и пароля) в соответствующие им части шаблона запроса и получает полноценный синтаксически корректный запрос на языке SQL. Например, если пользователь вводит в качестве логина и пароля JohnSmith и P@\$w0rd, SQL-запрос примет вид:

```
SELECT * FROM `Users`  
WHERE Login = 'JohnSmith'  
AND Passwordhash = SHA1('P@$w0rd');
```

При очевидной простоте данного подхода, основанного на конкатенации фрагментов шаблона и полученных от пользователя данных, у него есть существенный недостаток. Пусть злоумышленник в качестве логина вводит значение ' OR 1=1; --. В этом случае запрос примет следующий вид:

```
SELECT * FROM `Users`  
WHERE Login = '' OR 1=1; --'  
AND Passwordhash = SHA1('P@$w0rd');
```

Последовательность символов -- в наиболее часто применяемой для web-приложений СУБД MySQL является признаком начала комментария, поэтому запрос, который фактически будет выполнен, окажется следующим:

```
SELECT * FROM `Users` WHERE Login = '' OR 1=1;
```

Благодаря второй части условия (1=1), всегда принимающей значение «Истина», результатом данной выборки будут все записи таблицы. Продолжая варьировать вводимое в качестве логина значение, злоумышленник может сформировать условие, которому будет соответствовать учетная запись с административными правами, и тем самым повысить свои привилегии, получив большой (а возможно, и почти неограниченный) доступ к web-приложению и обрабатываемым им данным. Данный пример иллюстрирует простейшие уязвимости к SQL-инъекции и способ ее эксплуатации.

### Модель обнаружения уязвимостей

Как было показано ранее, причиной уязвимостей к SQL-инъекциям является попадание полученных от пользователя данных, не прошедших надлежащую обработку (фильтрацию), в запросы к СУБД. Также было отмечено, что все действия, выполняемые кодом web-приложения, можно свести к двум преобразованиям:

- преобразованию данных HTTP-запроса в запросы к хранилищу данных;
- преобразованию данных HTTP-запроса и данных, полученных из хранилища данных, в HTTP-ответ (HTML-страницу, JSON- или XML-данные и т.д.).

Исходя из этого, в рамках модели обнаружения уязвимостей web-приложение можно рассматривать, как конечный автомат Мили (рис. 3).

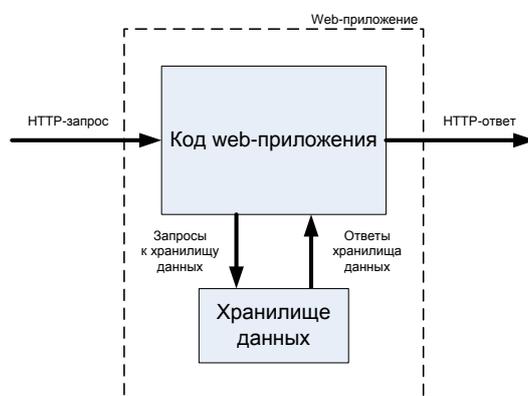


Рис. 3. Представление web-приложения как автомата Мили

Входным сигналом является HTTP-запрос, поступающий от клиента; выходной сигнал – ответ на этот запрос. Ответ зависит от параметров, переданных с запросом, и данных, полученных из хранилища данных. При этом, основываясь на предложенной модели web-приложения в контексте обнаружения уязвимостей, этот автомат следует разделить на две части: хранилище данных (внутренний слой модели web-приложения) и собственно код web-приложения (внешние слои).

При таком разделении существует четкое соответствие: состояние автомата представлено хранилищем данных, а код web-приложения выступает в роли функции, преобразующей аргументы (входной сигнал и состояние автомата) в результирующее значение (выходные сигналы и новое состояние автомата).

Преимущество такого разделения заключается в том, что код web-приложения не содержит запоминающих элементов, а значит, его поведение будет постоянным для одних и тех же исходных данных. Следовательно, для оценки этого поведения не требуется подготовка тестовых данных, а значит, и запуск web-приложения. Другими словами, возможна формальная верификация web-приложения с точки зрения его уязвимости к SQL-инъекциям путем статического анализа его исходных кодов.

В рамках предлагаемой модели обнаружения уязвимостей для формальной верификации используется абстрактная интерпретация [3]. При этом предлагается рассматривать web-приложение как множество процедур, связь между которыми устанавливается путем их вызова друг другом. Это целесообразно, т.к. работа с хранилищем данных, так или иначе, сводится к вызову стандартных процедур языка программирования или процедур стандартной библиотеки. Кроме того, вывод ответа на HTTP-запрос также можно выразить в терминах вызова стандартных процедур. При этом все свойства этих процедур известны заранее.

В соответствии с принципами восходящего проектирования точка входа (или главный блок) web-приложения также является процедурой, параметры и возвращаемое значение которой совпадают с входными и выходными данными web-приложения, а логика реализована с использованием иерархии вызовов более простых процедур, на нижнем уровне которой находятся стандартные процедуры.

Для удобства дальнейшего анализа необходимо изменить подход к рассмотрению параметров процедур. Во многих языках программирования помимо параметров, передаваемых по значению, существует возможность передавать параметры по указателю (ссылке), что позволяет вызываемой процедуре изменять значение переменной, использованной в качестве фактического параметра. Для того, чтобы обеспечить применимость модели к любому из существующих императивных языков программирования, предлагается выделить два вида параметров процедур:

- in-параметры – для описания данных, передаваемых в процедуру;
- out-параметры – для описания данных, возвращаемых из процедуры.

Возвращаемое значение функции может рассматриваться как особый случай out-параметра.

Следует отметить, что in- и out-параметры используются для обозначения передачи данных только в одном направлении (либо в процедуру, либо из нее). Параметры, позволяющие выполнять передачу в обоих направлениях, необходимо при анализе заменять сочетанием in- и out-параметров.

В [4] рассматривается подход, заключающийся в использовании венгерской нотации при написании кода web-приложений для обозначения того, является ли содержимое той или иной переменной потенциально опасным при подстановке в SQL-запрос. Применение данного подхода позволяет разрабатывать web-приложения, не содержащие уязвимостей к SQL-инъекциям. Однако при этом важно, чтобы программист обладал достаточной квалификацией для правильного выбора префиксов. Кроме того, при изменении кода web-приложения может возникнуть ситуация, когда должен быть выбран другой префикс, и отслеживание подобных ситуаций в больших проектах является проблематичным. Наконец, для ответа на вопрос о наличии или отсутствии уязвимостей в web-приложении, написанном без использования данного подхода, необходимо произвести переименование идентификаторов с правильным выбором префиксов, что может оказаться трудоемкой задачей. Между тем, [4] не предлагает

способов применения рассматриваемого подхода для автоматизированного обнаружения уязвимостей в web-приложениях, которые уже полностью или частично разработаны.

Предлагаемая в статье модель обнаружения уязвимостей в отличие от указанного подхода [4] основана на автоматизированном назначении оценок отдельным элементам web-приложений. В рамках модели предлагается выделить оценки двух видов – оценки для данных и оценки для параметров процедур.

Система оценок строится таким образом, чтобы ответ на вопрос о правильности обработки данных web-приложением можно было дать путем сравнения оценок in-параметров (формальных) с оценками фактически передаваемых значений. В простейшем варианте модели используется бинарная система оценки. В дальнейшем, при реализации основанных на предлагаемой модели программных средств, возможно расширение системы оценок.

Для данных (переменных, констант) предлагается использовать следующие оценки:

- оценку S (safe) получают данные, которые могут быть подставлены в текст SQL-запроса и при этом не приведут к возникновению уязвимости;
- оценку U (unsafe) получают данные, которые при подстановке в текст SQL-запроса могут изменить его логику, т.е. привести к SQL-инъекции.

Наилучшей оценкой считается оценка S, наихудшей – оценка U.

Оценка in-параметра равна наихудшей возможной оценке фактического параметра (данных), при которой его передача в процедуру не приведет к возникновению уязвимости:

- оценку S (safe) получают in-параметры, для которых передаваемое значение должно иметь оценку не ниже S, т.е. быть надлежащим образом обработано;
- оценку U (unsafe) получают in-параметры, для которых передаваемое значение должно иметь оценку не ниже U, т.е. может быть любым.

Оценки для out-параметров получаются в ходе абстрактной интерпретации кода процедуры. Значение оценки out-параметра – это значение наихудшей оценки для данных, которые процедура может возвращать через этот out-параметр. При анализе вызывающей процедуры эта оценка становится оценкой переменной, переданной в качестве out-параметра:

- оценку S (safe) получают out-параметры, через которые возвращаются данные с оценкой не ниже S;
- оценку U (unsafe) получают out-параметры, через которые возвращаются данные с оценкой не ниже U, т.е. которые следует в дальнейшем считать потенциально опасными.

Предложенная модель может быть расширена в соответствии со спецификой решаемой задачи по обнаружению уязвимостей.

Так, например, предложенная в качестве базовой бинарная система оценки может оказываться неэффективной из-за большого количества ложноположительных срабатываний. Они могут возникать в ряде случаев, например:

- web-приложение в настоящее время не имеет уязвимости, однако она может возникнуть в результате внесения изменений в код приложения;
- алгоритмы экранирования данных, созданные разработчиками web-приложения, оказываются слишком сложными для автоматического распознавания моделью обнаружения уязвимостей.

Следует понимать, что модель предполагает обнаружение не только уязвимостей, позволяющих успешно провести атаку, но и потенциальных уязвимостей, которые могут стать эксплуатируемыми при изменении кода web-приложения в ходе его дальнейшей разработки и/или сопровождения. Другими словами, наличие ложноположительных срабатываний в первую очередь говорит об общем качестве кода приложения, включая не только его надежность, но и сопровождаемость, и ряд других характеристик качества.

Тем не менее, на практике целесообразно расширить систему оценки третьим значением – UDS (user-defined safe, безопасное по определению пользователя), позволяющим пользователю программного средства обнаружения уязвимостей явно указать, что некоторые параметры процедур, получившие при автоматическом анализе с использованием модели обнаружения уязвимостей оценку U, на самом деле должны иметь оценку S.

Предлагаемая модель разработана в первую очередь для обнаружения уязвимостей к SQL-инъекциям, однако может быть адаптирована и для выявления других видов уязвимостей.

## Заключение

Предложенная в статье модель обнаружения уязвимостей предоставляет возможность автоматизации трудоемкого процесса анализа исходных кодов web-приложений на наличие уязвимостей к SQL-инъекциям. Результаты, получаемые при использовании модели, могут в дальнейшем быть использованы для отслеживания динамики изменений уровня качества web-приложений на различных этапах процессов разработки и сопровождения.

## A WEB-APPLICATION VULNERABILITY DETECTION MODEL

V.V. BAKHTIZIN, D.E. ONOSHKO

### Abstract

A web-application vulnerability detection model based on static analysis of source codes is proposed. Evaluation system used by the vulnerability detection model is described. Several ways of extending the model for certain difficult cases are shown.

*Keywords:* web-application, static analysis, SQL-injection, vulnerability.

### Список литературы

1. OWASP Top 10-2013. The Ten Most Critical Web Application Security Risks. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://owasptop10.googlecode.com/files/OWASP%20Top%2010%20-%202013.pdf>. – Дата доступа: 31.10.2013.
2. Фаулер М. Архитектура корпоративных программных приложений. М., 2006.
3. Patrick Cousot, Radhia Cousot // Conference Record of the Fourth ACM Symposium on Principles of Programming Languages. Los Angeles, California, USA, January, 1977. P. 238–252
4. Making Wrong Code Look Wrong – Joel on Software. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.joelonsoftware.com/articles/Wrong.html>. – Дата доступа: 21.12.2014.

УДК 681.5.015

## КОМБИНИРОВАННЫЙ МЕТОД СИНТЕЗА ТРАЕКТОРИЙ СБОРОЧНО-СВАРОЧНЫХ РОБОТОВ-МАНИПУЛЯТОРОВ В РАБОЧЕЙ СРЕДЕ С ПРЕПЯТСТВИЯМИ

М.М. КОЖЕВНИКОВ, О.А. ЧУМАКОВ\*, И.Э. ИЛЮШИН, А.В. СТАРОВОЙТОВ

Могилевский государственный университет продовольствия  
Шмидта, 3, Могилев, 3212027, Беларусь

\*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь

Поступила в редакцию 30 июля 2015

Предложен новый метод синтеза траекторий сборочно-сварочных роботов-манипуляторов в рабочей среде с препятствиями, который, в отличие от известных методов, позволяет эффективно учитывать сложную форму элементов роботизированного технологического комплекса. Эффективность разработанного метода подтверждается результатами тестирования.

*Ключевые слова:* робот-манипулятор, синтез траекторий, конфигурационное пространство.

### Введение

Задача синтеза траекторий роботов-манипуляторов в рабочей среде с препятствиями возникает при создании современных промышленных роботизированных технологических комплексов (РТК) преимущественно в машиностроении. Поскольку данная задача является довольно трудоемкой, то разработка эффективных методов ее решения позволит повысить эффективность сборочно-сварочных технологических процессов за счет сокращения сроков ввода новых РТК в эксплуатацию и сокращения сроков переналадки действующих комплексов.

В известных работах предложен ряд алгоритмов синтеза траекторий роботов в среде с препятствиями [1, 2], которые основаны на дискретной модели свободного от столкновений конфигурационного пространства. Задача синтеза при этом сводится к поиску кратчайшего пути на графе, ребрам которого ставятся в соответствие линейные либо дуговые фрагменты траектории робота, при движении по которым отсутствуют столкновения и удовлетворяются конструктивные ограничения. В ряде последних исследований [3, 4] реализованы алгоритмы синтеза выполняющие поиск нескольких решений, что увеличивает вероятность нахождения траектории за фиксированное время. В частности, в работе [5] синтез реализован с использованием концепции мультиграфа задачи движения (ТММ).

Необходимо отметить, что известные алгоритмы синтеза траекторий позволяют эффективно обойти проблему размерности конфигурационного пространства роботов [6–9], но не учитывают форму препятствий и форму звеньев манипулятора, что приводит к реализации траекторий низкого качества с большим объемом движений [6]. При использовании таких алгоритмов траектория робота может быть найдена за конечное время также лишь с определенной вероятностью, т.е. свойство «полноты» решения теряется [6, 10].

В данной работе предложен новый комбинированный метод синтеза траекторий роботов-манипуляторов в рабочей среде с препятствиями, основанный на использовании решетчатой дискретизации «насыщенных» препятствиями зон конфигурационного пространства. Такой подход, в отличие от известных, позволяет эффективно учитывать

сложную форму препятствий, характерную для сборочно-сварочных роботизированных комплексов. В соответствии с этим подходом синтез свободной от столкновений траектории осуществляется путем поиска кратчайшего пути на графе, ребрам которого ставятся в соответствие линейные движения робота между промежуточными конфигурациями, найденными как путем рандомизированной дискретизации (в зонах с малым количеством препятствий), так и путем решетчатой дискретизации (в зонах с большим количеством препятствий сложной формы.) Такой метод позволяет синтезировать участки траекторий робота в наиболее сложных зонах выполнения технологических операций сборки/сварки без предварительной проверки его движений на столкновение, что обеспечивает приемлемое количество тестов столкновения при сохранении свойства «полноты» при фиксированном шаге дискретизации.

### Комбинированный метод синтеза траектории роботов-манипуляторов

Рассматривается робот-манипулятор, имеющий  $n$  поворотных сочленений, в рабочей зоне которого расположено некоторое множество препятствий  $B = \{B_1, B_2, \dots, B_m\}$ . Конфигурацию этого робота зададим в виде вектора  $q = [q_i]^T$ , где  $q_i$  – величины углов в сочленениях ( $i = 1:n$ ). Ограничения на изменения углов в сочленениях зададим в виде  $q_{\min} \leq q \leq q_{\max}$ , где  $q_{\min}$ ,  $q_{\max}$  – векторы, определяющие нижнее и верхнее конструктивные ограничения на изменение углов в сочленениях робота-манипулятора. Зададим геометрическую модель робота-манипулятора, установленного в конфигурацию  $q$ , в виде множества  $M(q)$ . Тогда свободное от столкновений конфигурационное пространство определяется как

$$C_f = \{q \in C \mid M(q) \cap B = \emptyset\}. \quad (1)$$

Задача определения пересечения множеств  $M(q)$  и  $B$  решается путем проведения теста столкновения между роботом и препятствиями [2]. Прямолинейный участок траектории между двумя конфигурациями  $q_a$  и  $q_b$  ( $a \neq b$ ,  $q_a, q_b \in C_f$ ) задается в виде множества векторов

$$d_{ab} = \{d_k \mid M(d_k) \cap B = \emptyset\}, \quad (2)$$

где  $d_k = q_a + (h/Nh)(q_b - q_a)$ ,  $h = 0:Nh$ ,  $Nh > N$  – параметр дискретизации прямолинейного участка траектории.

Дискретная конфигурация робота  $q_b \in C_f$  является соседней с конфигурацией  $q_a \in C_f$ , если между ними существует прямолинейный участок траектории  $d_{ab}$  и  $D(q_a, q_b) \leq d$ , где  $D(\bullet)$  – симметричная функция, характеризующая расстояние между двумя локациями робота-манипулятора. Траектория, соединяющая стартовую  $q_{s1}$  и целевую  $q_{sg}$  конфигурации робота, представляет собой последовательность, состоящую из соседних конфигураций  $q_{s1}, q_{s2}, \dots, q_{sg} \in DC_f$  и прямолинейных участков, соединяющих эти конфигурации  $d_{s1s2}, d_{s1s2}, \dots, d_{(sg-1)sg}$ . В качестве критерия качества траектории движения робота манипулятора при сварке шва предлагается использовать суммарное время перемещения технологического инструмента:

$$\tau = N\Delta t + \rho/v, \quad (3)$$

где  $N$  – количество операций выполняемых роботом в технологическом процессе сборки/сварки,  $\Delta t$  – время выполнения одной операции,  $\rho$  – длина пути технологического инструмента при его движении в направлении от начальной к конечной локации,  $v$  – скорость движения технологического инструмента.

Тогда задача синтеза траектории робота-манипулятора может быть сформулирована следующим образом: среди всех последовательностей дискретных конфигураций  $q_{s1}, q_{s2}, \dots, q_{sg} \in C_f$ , координаты которых лежат внутри области, ограниченной предельно допустимыми значениями углов в сочленениях  $q_{\min} \leq q \leq q_{\max}$ , найти последовательность, на которой достигает минимума критерий качества (3).

Для описания конфигурационного пространства робота применена статистическая модель, представленная в виде неориентированного графа  $R = (V, E)$ . Вершины  $V$  этого графа

представляют собой множество свободных от столкновений конфигураций робота, координаты которых являются случайными величинами.

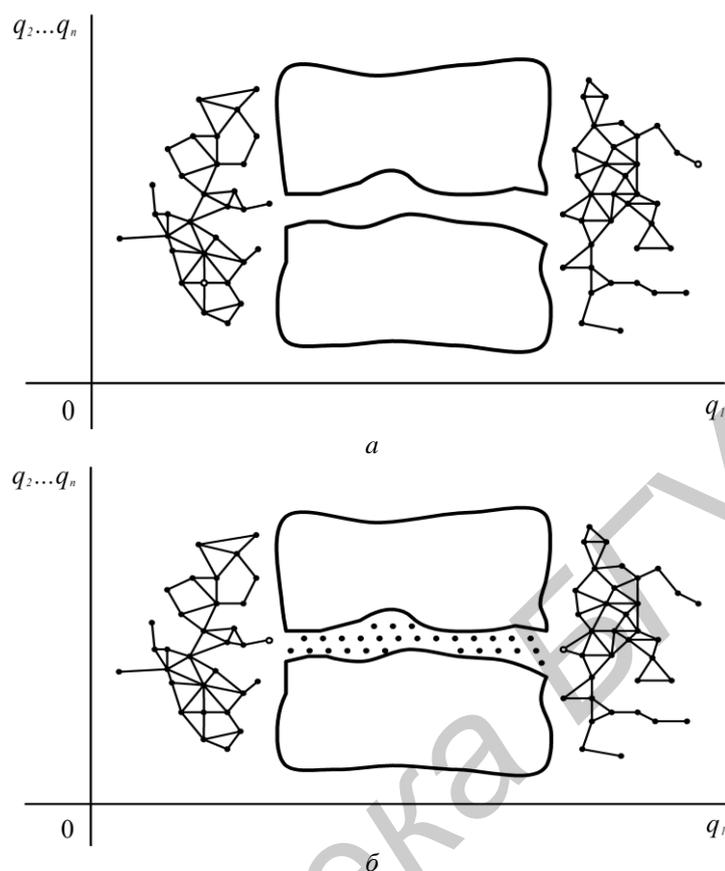


Рис. 1. Комбинированный подход к дискретизации конфигурационного пространства робота-манипулятора

Формирование множества  $V$ , осуществляется следующим образом: генерируется случайная конфигурация робота-манипулятора и выполняется тест столкновения робота с препятствиями. Если столкновения нет, то конфигурация добавляется в множество  $V$ , в противном случае она отбрасывается. Ребрам  $E$  графа ставятся в соответствие прямолинейные участки траекторий между свободными от столкновений конфигурациями рис. 1, а. Зона, насыщенная препятствиями (так называемый «узкий коридор» [1]) – рис. 1, б, дискретизируется регулярной решеткой, поскольку вероятность выявления такой зоны рандомизированным методом близка к нулю. Соответствующие вершины и ребра решетки добавляются в граф  $R$ . Такой подход к формированию статистической модели позволяет эффективно решить проблему размерности, возникающую при планировании траекторий промышленных роботов-манипуляторов [1, 2, 6].

Предложенный комбинированный метод синтеза траектории предполагает реализацию следующих этапов.

1. Генерируется множество  $V$ , состоящее из  $N_{\max}$  свободных от столкновений конфигураций робота-манипулятора.

2. Выполняется поиск прямолинейных участков траекторий между соседними конфигурациями  $q_i, q_j$  и найденные участки заносятся в множество  $E$ .

3. Если между соседними конфигурациями  $q_i, q_j$  нет прямолинейного участка траектории и эти конфигурации находятся в зоне, насыщенной препятствиями, то выполняется поиск криволинейного участка траектории между  $q_i$  и  $q_j$ , дискретизированного регулярной решеткой  $G$ . Если такой участок траектории найден, то он добавляется в граф  $R$ .

4. Формирование множества  $E$  выполняется путем циклического повторения шагов 2, 3  $K_{\max}$  раз.

5. Выполняется поиск кратчайшего пути на графе  $R$  исходя из критерия качества (3).

## Алгоритм синтеза траектории роботов-манипуляторов

С учетом специфики и возможностей геометрического моделирования роботов-манипуляторов в современных CAD-системах на основе предложенного метода разработан алгоритм планирования траектории, ориентированный на интеграцию в систему автономного программирования сборочно-сварочных роботизированных технологических комплексов (табл. 1). Алгоритм использует следующие обозначения.  $Randq$  – функция генерации вектора конфигурации с координатами, имеющими случайные значения в допустимом диапазоне  $q_{\min} \leq q \leq q_{\max}$ .  $Rand$  – функция генерации случайных целых чисел  $i \neq j$  в диапазоне от 1 до  $N_{\max}$ .  $EPath$  – функция вычисления прямолинейного участка траектории между двумя конфигурациями  $q_i$  и  $q_j$ ;  $TTest$  – функция, выполняющая оценку «насыщенности» окрестности конфигурации  $q$  препятствиями, путем генерации случайных конфигураций в ее окрестности и тестировании их на столкновение. В случае если количество столкновений превышает допустимый предел, функция  $TTest$  возвращает 1, указывая на то, что окрестность конфигурации  $q$  «насыщена» препятствиями.  $Connect$  – функция выполняющая поиск конфигураций  $(q_i^s, q_j^g)$  на решетке дискретизации  $G$ , являющихся соседними с конфигурациями  $(q_i, q_j)$ .  $GraphSearch$  – функция поиска кратчайшего пути на графе  $R$  исходя из критерия качества (3).

Таблица 1. Алгоритм синтеза траектории сборочно-сварочных роботов манипуляторов

Исходные данные: геометрическая модель РТК – $M(q)$ , $B$ , начальная и целевая конфигурации робота – $q_s, q_g$ .	
1:	$i \leftarrow 1; V \leftarrow q_s, q_g;$
2:	повторять
3:	$q_i \leftarrow Randq;$
4:	если $q_i \in Cf$
5:	то $V \leftarrow q_i;$
6:	$i \leftarrow i+1;$
7:	до тех пор пока $i \leq N_{\max};$
8:	$k \leftarrow 1;$
9:	повторять
10:	$(i, j) \leftarrow Rand(1, N_{\max});$
11:	если $(D(q_i, q_j) \leq d$ и $EPath(q_i, q_j) \neq \emptyset)$
12:	то $E \leftarrow EPath(q_i, q_j)$
13:	иначе
14:	если $(D(q_i, q_j) \leq d$ и $(TTest(q_i)=1$ или $TTest(q_j)=1))$
15:	то $(q_i^s, q_j^g) \leftarrow Connect(q_i, q_j, G),$
16:	$R \leftarrow SearchGridPath(q_i^s, q_j^g),$
17:	$V \leftarrow (EPath(q_i, q_i^s), EPath(q_j, q_j^g));$
18:	$k \leftarrow k+1;$
19:	до тех пор пока $k \leq K_{\max};$
20:	$path \leftarrow GraphSearch(R, q_s, q_g);$

Особого внимания заслуживает рассмотрение процедуры  $SearchGridPath$ , разработанной на основе методики, предложенной в предыдущих работах авторов данной статьи [11–14]. Процедура выполняет поиск криволинейной траектории между двумя конфигурациями робота-манипулятора  $(q_i^s, q_j^g)$ , путем дискретизации окрестности данных конфигураций дискретной решеткой. Соответственно, в результате выполнения процедуры в граф  $R$  добавляются вершины и ребра, принадлежавшие криволинейному участку траектории между  $(q_i^s, q_j^g)$ . Алгоритм процедуры  $SearchGridPath$  приведен в табл. 2.

Алгоритм использует следующие обозначения:  $N_0$  – начальное значение параметра дискретизации конфигурационного пространства робота решеткой;  $N_{\max}$  – максимально допустимое значение параметра дискретизации конфигурационного пространства робота решеткой;  $N_s$  – шаг изменения параметра дискретизации;  $P$  – криволинейная траектория робота. Алгоритм использует следующие функции:  $\max f(\phi_{b_k})$  – функция, возвращающая

максимальное значение весовой  $\phi$  из множества  $\phi_{b_k}$ ;  $\max b(\phi_{b_k})$  – функция, возвращающая индекс  $b$  максимального значения весовой функции из множества  $\phi_{b_k}$ ;  $q(\phi)$  – функция, возвращающая конфигурацию робота, соответствующую значению весовой функции  $\phi$ ;  $\text{explore}(q(\phi_a), q(\phi_b))$  – функция проверки существования прямолинейного участка траектории между двумя конфигурациями робота  $q(\phi_a)$  и  $q(\phi_b)$  в соответствии с формулой (2). Если такой участок траектории существует, функция возвращает «1», в противном случае она возвращает «0».

Таблица 2. Алгоритм процедуры SearchGridPath

Исходные данные: геометрическая модель РТК – $M(q)$ , $B$ , начальная и целевая конфигурации робота – $q_{s1} = q_i^s, q_{sg} = q_j^g$ .	
1:	установить начальное значение параметра дискретизации $N \leftarrow N_0$ ;
2:	повторять
3:	вычислить $V_a$ для параметра дискретизации $N$ ;
4:	установить весовые коэффициенты для ребер решетки $T_{ab_k} \leftarrow 1/3n$ ( $k=1:d$ );
5:	повторять
6:	вычислить весовую функцию $\phi_a$ ( $a=1:N^n$ );
7:	$a \leftarrow s1$ ;
8:	повторять
9:	$\phi \leftarrow \max f(\phi_{b_k})$ ;
10:	$b \leftarrow \max b(\phi_{b_k})$ ;
11:	$p \leftarrow \text{explore}(q(\phi_a), q(\phi_b))$ ;
12:	$P \leftarrow \{q(\phi_a), q(\phi_b)\}$ ;
13:	если $b = sg$ то вернуть фрагмент траектории $P$ ;
14:	$a \leftarrow b$ ;
15:	до тех пор пока $p=0$ ;
16:	$T_{ab_k} \leftarrow 0$ ;
17:	$P \leftarrow 0$ ;
18:	до тех пор пока $\phi_{s1}=0$ ;
19:	$N \leftarrow N+N_s$ ;
20:	до тех пор пока $N \leq N_{\max}$ .

Данный алгоритм функционирует следующим образом. Первоначально конфигурационное пространство робота дискретизируется с низким разрешением  $N_0$  и предполагается, что между всеми соседними конфигурациями существуют прямолинейные участки траектории, т.е. всем весовым коэффициентам ребер решетки присваивается значение  $1/3n$ . Далее вычисляется весовая функция для каждого узла решетки  $\phi_a$  ( $a = 1:N_n$ ) и ищется траектория между стартовой  $q_{s1}$  и целевой  $q_{sg}$  конфигурациями путем подъема в направлении градиента весовой функции узлов решетки. Для этого отрезки, соединяющие соседние конфигурации  $q_a$  и  $q_{b_k}$ , дискретизируются с высоким разрешением  $N_n$  в соответствии с (2) и для каждой дискретной конфигурации робота  $d_k$  выполняется тест столкновения. Если столкновения отсутствуют, то выбираются две новые конфигурации на решетке низкого разрешения в направлении градиента. Если обнаружено столкновение, то значение весового коэффициента ребра решетки  $T_{ab_k}$  устанавливается в нуль.

Значения весовой функции  $\phi_a$  для каждого узла решетки вычисляются на основе следующей итерационной формулы:

$$\phi_a^{(l+1)} = f_a \left( \sum_{k=1}^d T_{ab_k} \phi_{b_k}^{(l)} + V_a \right), \quad (4)$$

где  $l$  – номер итерации,  $V_a$  – параметр, значение которого определяется следующим образом:  $V_a = -1$ , если  $q_a \notin C_f$ ;  $V_a = 1$  если  $q_a = q_{sg}$ ;  $V_a = 0$  во всех остальных случаях.

Нелинейная функция  $f_a$  имеет следующий вид:

$$f_a(x) = \begin{cases} 0, & \text{если } x < 0 \\ \tanh(x), & \text{если } x \geq 0 \end{cases} \quad (5)$$

Величина весовых коэффициентов ребер решетки  $T_{ab_k}$  выбирается исходя из достаточных условий сходимости итерационной процедуры (4), полученных в работах [11, 14]. В частности,  $T_{ab_k} = 1/3n$ , если существует прямолинейный участок траектории между конфигурациями  $q_a$  и  $q_{b_k}$  и  $T_{ab_k} = 0$  в противном случае.

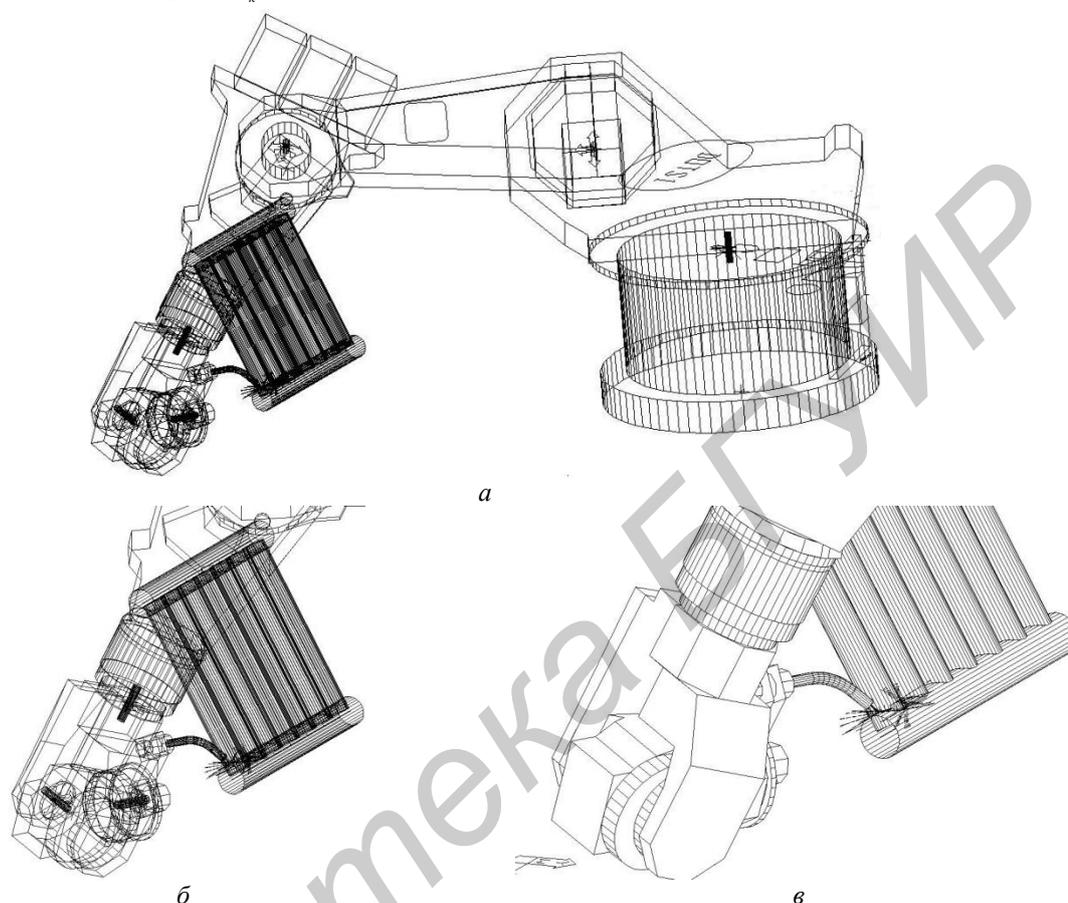


Рис. 2. Роботизированная ячейка для дуговой сварки и траектории движения сварочной горелки

### Исследование эффективности метода

Исследование эффективности предложенного метода выполнялось в среде САПР ROBOMAX. Предложенный алгоритм синтеза реализован на языке программирования С++ и интегрирован в данную САПР. В качестве объекта исследования использовалась роботизированная ячейка для дуговой сварки металлической конструкции, состоящей из 9 труб. Ячейка включает робот-манипулятор KR125, оснащенный сварочной горелкой (рис. 2, а). На трехмерную модель металлоконструкции нанесено 14 сварных швов, имеющих форму эллипса, изогнутого в пространстве. Предложенный алгоритм позволил выполнить синтез свободных от столкновений траекторий робота-манипулятора, обеспечивающих движение сварочной горелки вдоль каждого из 14 швов. На основе полученных траекторий сформированы технологические программы сварки на языке программирования робота SRCL (Siemens Robot Control Language). Тестирование этих программ в подсистеме off-line программирования САПР ROBOMAX показало, что они обеспечивают свободное от столкновений движение робота-манипулятора. Примеры позиционирования сварочной горелки на линии пространственного сварного шва, при выполнении роботом технологической программы, приведены на рис. 2, б, в. Анализ результатов данных экспериментов позволяет сделать вывод о том, что предлагаемый подход эффективен при синтезе траекторий роботоманипуляторов в рабочей среде с препятствиями.

## Заклучение

Предложен новый комбинированный метод синтеза траекторий сборочно-сварочных роботов-манипуляторов в рабочей среде с препятствиями, основанный на использовании решетчатой дискретизации «насыщенных» препятствиями зон конфигурационного пространства. Такой подход, в отличие от известных, позволяет эффективно учитывать сложную форму препятствий, характерную для сборочно-сварочных роботизированных комплексов. В соответствии с этим подходом синтез свободной от столкновений траектории осуществляется путем поиска кратчайшего пути на графе, ребрам которого ставятся в соответствие линейные движения робота между промежуточными конфигурациями, найденными как путем рандомизированной дискретизации, так и путем решетчатой дискретизации в локальных зонах с большим количеством препятствий сложной формы. Эффективность предложенного метода планирования подтверждается результатами тестирования в среде САПР ROBOMAX.

## COMBINED METHOD FOR TRAJECTORY SYNTHESSES OF ASSAMBLY AND WELDING ROBOTIC-MANIPULATORS IN WORKSPACE WITH OBSTACLES

M.M. KOZHEVNIKOV, O.A. CHUMAKOV, I.E. ILUSHIN, A.V. STAROVOITOV

### Abstract

A new method is proposed for trajectory syntheses of assembly and welding robotic manipulators in workspace with obstacles, which in contrast to known effectively take in to account complex shape of the elements of the robotic technological cell. The effectiveness of the proposed method is confirmed by the tests results.

*Keywords:* manipulator robot, trajectories synthesis, configurational space.

### Список литературы

1. Choset H., Lynch K.M., Hutchinson S. et. al. Principles of Robot Motion: Theory, Algorithms, and Implementations. Cambridge, 2006.
2. LaValle S.M. Planning Algorithms. Cambridge, 2006.
3. Lahijanian M. A., Kavraki L. E., Vardi M. Y. // International Conference on Robotics and Automation. Hong Kong, 2014. P. 3005–3012.
4. Maly M.R., Lahijanian M. A., Kavraki L.E. et. al // ACM International Conference on Hybrid Systems: Computation and Control (HSCC). Philadelphia, 2013. P. 353–362.
5. Sucan I.A., Kavraki L.E. // IEEE International Conference on Robotics and Automation. St. Paul, 2012. P. 4822–4828.
6. Motion planning. Springer Handbook of Robotics / edited by B. Siciliano and O. Khatib. Springer-Verlag, 2008.
7. Geraerts R.J., Overmars M.H. // Algorithmic Foundations of Robotics V. Berlin 2003. P. 43–58.
8. Geraerts R.J., Overmars M.H. // Journal of Robotics and Autonomous Systems. 2007. № 55. P. 824–836.
9. Geraerts R.J., Overmars M.H. // Journal of Robotics and Autonomous Systems. 2006. № 54. P. 165–173.
10. LaValle S.M., Branicky M., Lindemann S.R. // International Journal of Robotic Research. 2004. № 23(7/8). P. 673–692.
11. Pashkevich A.P., Kazheunikau M.M., Ruano, A.E. // International Journal of Systems Science. 2006. № 37 (8). P. 555–564.
12. Кожевников М.М., Паишевич А.П., Чумаков О.А. // Докл. БГУИР. 2010. № 4 (50), С. 55–62.
13. Кожевников М.М., Ульянов Н.И., Субоч С.Н. // Вест. Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований. 2011. № 1. С. 44–55.
14. Кожевников М.М. Господ А.В. // Исследования наукограда. 2012. № 1 (1). С. 37–41.

УДК 54.057, 546.05, 538.958

## СТРУКТУРНЫЕ СВОЙСТВА ЧАСТИЦ ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ, ФОРМИРУЕМЫХ МЕТОДОМ МАГНИЙТЕРМИЧЕСКОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДИОКСИДА КРЕМНИЯ, ИЗГОТОВЛЕННОГО ИЗ КРЕМНИЙСОДЕРЖАЩИХ РАСТЕНИЙ

А.Д. СЫМАН, А.П. ЯБЛОНСКИЙ, И. А. КАШКО, К.В. ГИРЕЛЬ, А.В. БОНДАРЕНКО

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь*

*Поступила в редакцию 2 октября 2015*

Приведены результаты исследования закономерностей формирования и изучения морфологии и состава частиц пористого кремния полученных методом магнийтермического восстановления диоксида кремния, изготовленного из образцов различных видов кремнийсодержащего растительного сырья, при температуре 650 °С в атмосфере аргона.

*Ключевые слова:* магнийтермическое восстановление, диоксид кремния, пористый кремний.

### Введение

Пористый кремний (ПК) является одним из примеров наиболее активно исследуемых наноматериалов, структура которого представляет собой области кремния, пронизанные развитой сетью каналов пор [1]. Наиболее часто для формирования ПК используется электрохимическое анодирование монокристаллического кремния в растворах на основе фтористоводородной кислоты [2]. ПК обладает многими свойствами, нехарактерными для объемного кремния. В частности, он может вести себя как прямозонный полупроводник, демонстрируя интенсивную фотолюминесценцию, что обусловлено квантовыми эффектами, возникающими в наноразмерных элементах кремниевого скелета [3]. Использование ПК позволяет решить задачу создания светоизлучающих диодов, интегрированных с другими электронными приборами на кремниевой подложке [4]. Не менее выдающаяся особенность ПК заключается в том, что он, представляя собой материал небиологического происхождения, способен взаимодействовать с биологической системой, т.е. в отличие от монокристаллического кремния является биосовместимым материалом [5, 6]. Это, в сочетании с его биодegradацией и высокими адсорбционными свойствами, используется в биомедицине для доставки питательных веществ и лекарств [7, 8].

Биомедицинское применение ПК требует разработки такой технологии производства больших объемов этого материала, которая отличалась бы своей экономичностью и простотой [9]. Электрохимическое анодирование не позволяет выполнить эти требования, так как стоимость кремниевых пластин достаточно высока для того, чтобы обеспечить рентабельность производства. Для решения этой проблемы проводятся исследования по формированию ПК путем восстановления оксида кремния, выделяемого из растений [9–11]. Многие растения отличаются высоким содержанием кремния, благодаря поглощению из почвы жидкости, содержащей кремниевые кислоты. Наиболее перспективными для исследований в этой области являются объекты, обеспечивающие получение больших объемов кремнийсодержащего сырья, такие как быстрорастущие растения, отходы сельского хозяйства или растения, приспособленные к условиям кислых почв, которые, в частности, распространены в Беларуси. Все вышесказанное определяет актуальность исследований, связанных с получением и изучением свойств наноструктурированного ПК, изготавливаемого путем переработки кремнийсодержащих растений.

### **Анализ методов восстановления оксида кремния**

В настоящее время в реальном производстве наиболее часто используется восстановление оксида кремния в печах с углеродосодержащей средой [12]. Однако такой метод связан с длительным применением высокотемпературных режимов (более 2000 °С) и, соответственно, крайне высокими энергетическими затратами. Также высокая температура процесса приводит к спеканию кремния, что не позволяет добиться формирования пористой структуры. Кроме того, побочным продуктом такого производства является углекислый газ, ответственный за нежелательный парниковый эффект.

Весьма привлекательный с точки зрения экологии метод, основанный на использовании солнечной энергии, был предложен в работе [13]. Однако этот процесс требует значительных временных затрат и поэтому неэффективен. Также известен метод восстановления оксида кремния активными металлами, в частности алюминием или магнием. При этом температура процесса снижается в несколько раз по сравнению с технологией восстановления углеродом. Тем не менее, в случае использования алюминия, побочным продуктом является химически стабильный оксид алюминия. Это приводит к трудностям при очистке полученных кремниевых структур.

В последнее время наблюдается увеличение количества исследований по восстановлению оксида кремния магнием [9–11]. В качестве исходного материала используются порошки оксида кремния, синтезированные из водорослей, бамбука, рисовой шелухи, хвоща и тому подобного. Температурные режимы при этом варьируются в пределах 630–650 °С. Необходимо отметить, что при температурах выше 535 °С наблюдается частичное спекание ПК, поэтому до сих пор ведутся поиски путей предотвращения этого эффекта. Изготовленные таким образом частицы ПК отличаются разнообразием морфологических форм, их свойства активно изучаются на предмет применения в сферах оральной доставки питательных веществ и лекарств, косметики, ортопедии, тканевой инженерии. Исследуется возможность разработки покрытий, содержащих частицы ПК с лекарственными препаратами, для обеззараживания и заживления открытых ран [14]. Крайне важно в этом случае контролировать содержание препарата в покрытии и уровень pH поврежденной поверхности, который имеет различные значения для здоровой и больной ткани. Частицы ПК, внедренные в покрытие, могут играть роль не только носителей лекарств, но и своеобразных детекторов, благодаря их уникальным оптическим свойствам [15]. Однако опубликованных работ по изучению спектральной чувствительности биологического ПК в различных диапазонах электромагнитного излучения к настоящему моменту еще нет. Недавно представлены результаты исследований адсорбции биологическим ПК искусственной имитации кожного сала, которые продемонстрировали перспективность применения этого материала в биомедицине и косметике в качестве пудры для тела [16]. Одним из требований к такой пудре со стороны косметических компаний является демонстрация ими фотолюминесценции в видимом диапазоне электромагнитного излучения, которая также до сих пор не изучена для образцов биологического ПК [17]. Таким образом, изучение закономерностей и оптимизация режимов восстановления биологического оксида кремния магнием, а также изучение структурных и оптических свойств формируемого при этом наноструктурированного ПК, остаются открытыми проблемами.

### **Методика эксперимента**

Для формирования частиц ПК был использован порошок диоксида кремния на основе рисовой шелухи Rice Silk, бамбуковой шелухи Bamboo Silk и междуузлий бамбука Tabasheer (производство Soliance, Франция). Порошки диоксида кремния растительного происхождения смешивались с порошками магния и хлорида натрия в соотношении 1:2,5:10 и размещались в керамических лодочках для последующей термической обработки. Взвешивание компонентов смеси производилось с помощью прецизионных весов Sartorius-CP225D, обеспечивающих точность до 0,01 мг. Хлорид натрия был добавлен в качестве буферного материала, предотвращающего спекание кремниевых нанокристаллитов, что позволило обеспечить присутствие большого количества пор в частицах порошка. Керамическая лодочка

устанавливалась в кварцевой трубе, в которой создавалась атмосфера инертного газа (аргона). Труба располагалась в трубчатой печи Carbolite HST 1200/600. Термическая обработка в печи проводилась при температуре 650 °С в течение 6–7 ч. После термической обработки образцы порошка смешивались с дистиллированной водой до образования взвеси, в которую постепенно добавлялась концентрированная соляная кислота. Смешивание с водой производилось с целью растворения хлорида натрия, содержащегося в продуктах термической обработки. Соляная кислота использовалась для вытравливания оксида магния. Образцы выдерживались в растворе соляной кислоты в течение 4–8 ч. Для равномерного взаимодействия реагентов и удаления пузырьков газа использовалась магнитная мешалка. После этого производилось от трех до пяти циклов промывки образцов порошков в дистиллированной воде, их фильтрация и сушка на воздухе при комнатной температуре.

Морфология порошков была изучена с использованием сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на оборудовании Hitachi S-4800 (производство Японии). Эта модель микроскопа обеспечивает увеличение до 300 – 500 тысяч крат и разрешение 1 нм. Элементный состав порошков определялся на энергодисперсионном рентгеновском спектроанализаторе (ЭДС) Link Analytical AN 10000 (производство США), встроенным в электронный микроскоп Cambridge Instruments Stereoscan-360 (производство Великобритании). Фазовый состав образцов изучался методом рентгеновской дифрактометрии. Спектры снимались на аппарате ДРОН-3 (производство России). При проведении анализа было использовано К $\alpha$ -излучение медного анода с длиной волны  $\lambda = 0,15406$  нм. Напряжение и анодный ток составляли 30 кВ и 20 А соответственно.

### Результаты и их обсуждение

Процесс термического восстановления кремния в смеси порошков оксида кремния и магния протекает согласно следующей химической реакции:  $\text{SiO}_2 + 2\text{Mg} \rightarrow \text{Si} + 2\text{MgO}$ .

На рис. 1 представлена схема проведения этого процесса, который заключается в том, что биогенный оксид кремния смешивается с магнием и выдерживается при температуре около 650 °С в вакууме или атмосфере инертного газа в течение 7 ч. Это приводит к формированию нанокompозита кремний/оксид магния, который затем промывается в соляной кислоте, растворяющей оксид магния. В результате остается порошок, состоящий из частиц ПК. В данной работе в исходную реакционную смесь был добавлен порошок NaCl, который препятствовал спеканию кремния в процессе термической обработки, тем самым обеспечивая более высокую пористость конечного материала.

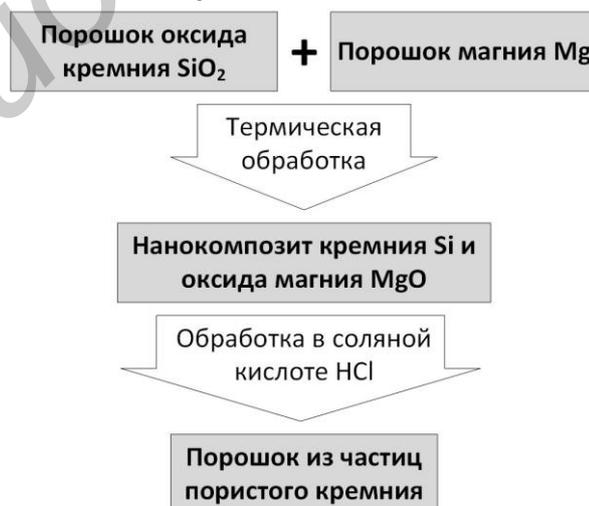


Рис. 1. Схема процесса формирования порошка частиц пористого кремния методом термического восстановления

Для изучения структурных свойств полученных порошков был проведен их комплексный анализ с использованием различных методов определения фазового и элементного составов, а также морфологии поверхности. На рис. 2 представлены

дифрактограммы, полученные в результате рентгеноструктурного анализа порошков, изготовленных путем магнийтермического восстановления оксида кремния. Можно сделать вывод о том, что все порошки имеют поликристаллическую природу и состоят из кремниевых кристаллитов. В порошке на основе рисовой шелухи присутствуют кристаллиты кремния с гексагональной и кубической кристаллической решеткой. В то же время в порошках на основе бамбука наблюдаются рефлексы, соответствующие только кубической кристаллической решетке кремния. Широкая полоса с низкой интенсивностью на всех дифрактограммах в области  $2\Theta = 20\text{--}25$  градусов свидетельствует о незначительном окислении кремниевых кристаллитов.

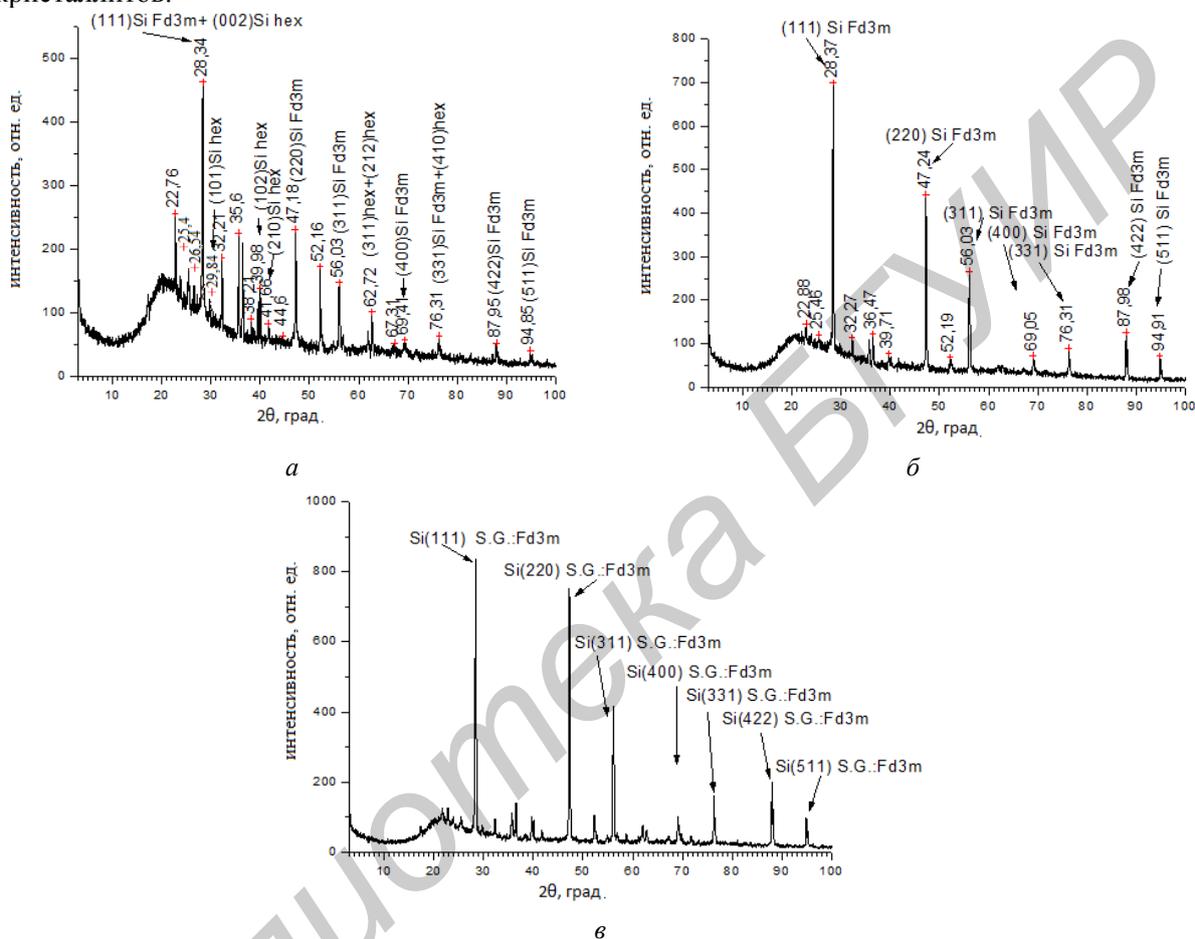


Рис. 2. Дифрактограммы, полученные в результате рентгеноструктурного анализа порошков, изготовленных методом магнийтермического восстановления диоксида кремния на основе рисовой шелухи (а), междуузлий бамбука (б) и бамбуковой шелухи (в)

Представленные выше результаты рентгеновской дифрактометрии дают информацию о фазовом составе порошков. Однако рентгеновская дифрактометрия не может регистрировать атомы веществ, не организованных в кристаллическую решетку. Для того, чтобы определить присутствие других элементов в полученных порошках был проведен ЭДС-анализ, который позволяет установить элементный состав изучаемых материалов, т.е. определить их атомарную чистоту. Электронный луч диаметром около 1 мкм при энергии 20 кэВ обеспечивал глубину анализа 1,3 – 1,5 мкм. На рис. 3 представлены ЭДС-спектры, типичные для порошков на основе материалов из рисового и бамбукового сырья. Видно, что для всех порошков характерно доминирующее содержание атомов кремния и кислорода. На спектрах также определяются слабые рефлексы магния, натрия и хлора. Присутствие магния может быть обусловлено двумя причинами. Во-первых, в ходе реакции термического восстановления магний не полностью прореагировал с оксидом кремния. Во-вторых, при последующем промывании нанокompозита в соляной кислоте оксид магния частично не растворился. Значительное содержание кислорода в большей степени связано с окислением кремниевых нанокристаллитов. Для ПК характерна большая удельная площадь поверхности, которая при выдержке на воздухе покрывается

тонким слоем оксида кремния. Присутствие в образце натрия и хлора связано с остатками соли, которая использовалась во время термической обработки и была не полностью растворена и удалена из порошков на стадиях финальной промывки.

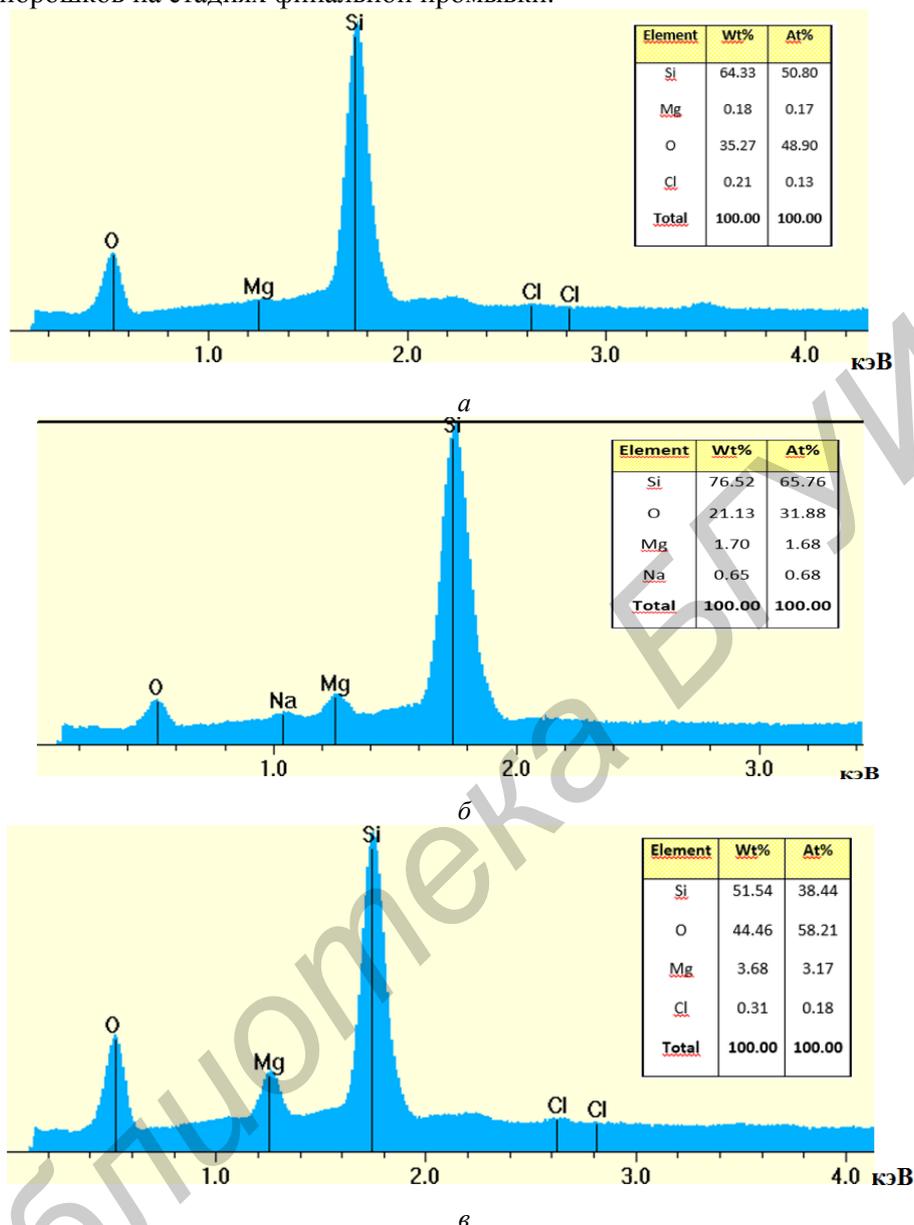


Рис. 3. ЭДС-спектры порошков, изготовленных методом магнийтермического восстановления диоксида кремния на основе рисовой шелухи (а), междуузлий бамбука (б) и бамбуковой шелухи (в).

Представлены данные по содержанию элементов в весовых и атомных процентах

Необходимо отметить, что наибольшее процентное содержание атомов кремния (65,76 %) характерно для образца на основе шелухи из бамбука, а наименьшее (38,44 %) – для порошка, изготовленного с использованием диоксида кремния из междуузлий бамбука. Это связано с тем, что исходный диоксид кремния на основе междуузлий бамбука представлял собой порошок, размеры частиц которого были значительно больше размеров частиц порошков, изготовленных из шелухи растительного сырья. Следовательно, удельная площадь поверхности частиц  $\text{SiO}_2$  из междуузлий бамбука была не настолько велика, чтобы обеспечить взаимодействие между реагентами, достаточное для полного восстановления.

Для изучения морфологии экспериментальных образцов был использован СЭМ-анализ. На рис. 4 представлены СЭМ-фотографии поверхности частиц порошков, полученных путем магнийтермического восстановления биогенного диоксида кремния. Видно, что полученные порошки состоят из частиц, пронизанных сетью пор с размерами, которые варьируются в

диапазоне от 10 до 1000 нм. Сравнивая данные СЭМ, рентгеноструктурного анализа и ЭДС, можно сделать вывод о том, что частицы порошков представляют собой ПК. Размеры частиц всех порошков варьируются от единиц до двух сотен микрометров (рис. 4, *a, в, д*). Формирование порошков ПК происходит таким образом, что пористый материал разделяется на частицы одинаковых размеров независимо от размеров частиц исходного диоксида кремния. Образец ПК, изготовленный с использованием сырья из рисовой шелухи, имеет несколько отличную от других образцов морфологию. Его кремниевые кристаллиты напоминают растительные волокна (рис. 4, *б*). В то время как образцы на основе шелухи и междуузлий бамбука имеют схожую морфологию и напоминают высокопористую губку (рис. 4, *з, е*). Это связано с тем, что ПК наследует морфологию исходного растительного сырья.

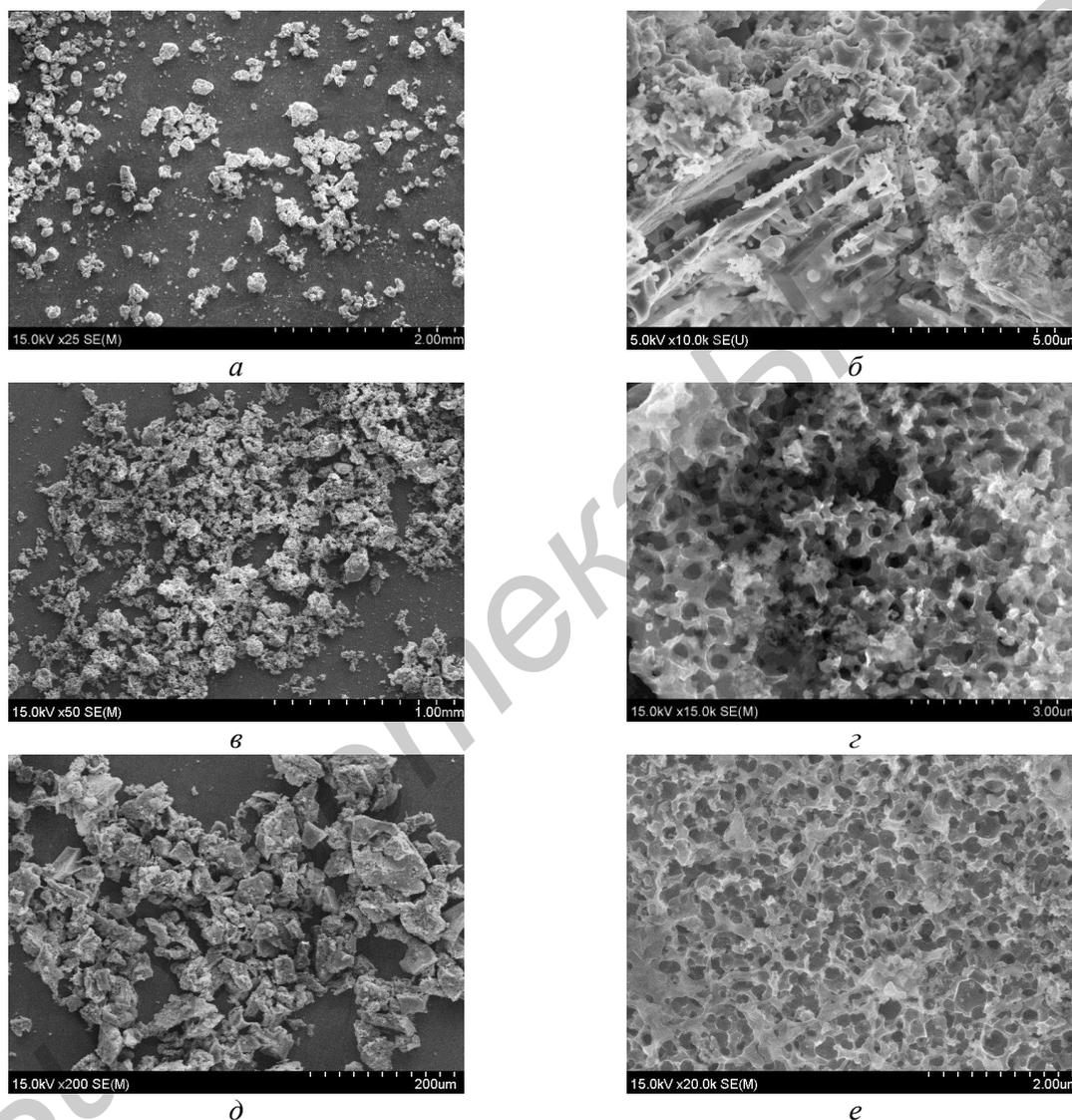


Рис. 4. СЭМ-фотографии поверхности частиц порошков ПК, полученных путем магнийтермического восстановления диоксида кремния на основе рисовой шелухи (*a, б*), бамбуковой шелухи (*в, з*) и бамбуковых междуузлий (*д, е*)

### Заключение

В процессе выполнения настоящей работы методом магнийтермического восстановления порошков диоксида кремния растительного происхождения были изготовлены порошки, состоящие из частиц ПК с размерами пор субмикронного диапазона. Установлено, что кремниевый остов ПК имеет поликристаллическую природу. Предполагается, что его поверхность в значительной степени окисляется при выдержке на воздухе. Образцы ПК на основе междуузлий бамбука содержат наименьшее количество атомов кремния, что

свидетельствует о недостаточном доступе магния в реакционной смеси к диоксиду кремния. Это связано с малой удельной площадью поверхности частиц исходного сырья. Показано, что структура ПК определяется природой растительного диоксида кремния. Это позволяет варьировать морфологией пористого материала в широких пределах путем подбора исходного растительного сырья.

## **STRUCTURAL PROPERTIES OF POROUS SILICON PARTICLES FORMED BY MAGNESIOTHERMAL REDUCTION OF SILICON DIOXIDE PRODUCED FROM SILICON CONTAINING PLANTS**

A.D. SYMAN, A.P. YABLONSKI, I.A. KASHKO, K.V. GIREL, H.V. BANDARENKA

### **Abstract**

The study results of formation regularities, morphology and composition of porous silicon particles fabricated by the magnesiothermal reduction of different samples of biogenic silicon dioxide at 650 °C under an argon atmosphere are presented.

*Keywords:* magnesiothermal reduction, silicon dioxide, porous silicon.

### **Список литературы**

1. *Labunov V.* // Thin Solid Films. 1986. Vol. 137. P. 123–134.
2. *Labunov V., Baranov I., Bondarenko V.* // Thin Solid Films. 1979. Vol. 64. P. 479–483.
3. *Cullis A. G., Canham L. T.* // Nature. 1991. Vol. 353. P. 335–338.
4. *Bondarenko V.P.* // Technical Physics Letters. 1993. Vol. 19, Issue 7. P. 463–464.
5. *Canham L.T.* // Adv. Mater. 1995. Vol. 7, №12. P. 1033–1036.
6. *Low S.P.* // Biomaterials. 2009. Vol. 30. P. 2873–2880.
7. *Anglin J.* // Advanced drug delivery reviews. 2008. Vol. 60. P. 1266–1277.
8. *Salonen J.* // Journal of controlled release. 2005. Vol. 108. P. 362–374.
9. *Batchelor L.* // Silicon. 2012. Vol. 4. P. 259–266.
10. *Bao Z.* // Nature. 2007. Vol. 446, № 8. P. 172–175.
11. *An Xing* // RSC Advances. 2013. Vol. 3, P. 10145–10149.
12. *Koch E. C., Clement D.* // Propell. Explos. Pyrotech. 2007. Vol. 32, № 3. P. 205–212.
13. *Murray J. P., Flamant G., Roos C. J.* / Solar Energy. 2006. Vol. 80, № 10. P. 1349–1354.
14. *Voelcker N.* // International autumn school; Nanostructured Materials in Biomedical Applications. Turku, 1–6 Sept. 2013. 2013. P. 5.
15. *McInnes S.J.P.* // Appl. Mater. Interfaces. 2012. Vol. 4. P. 3566–3574.
16. *Lee M.* // Technical memorandum. Intrinsic Materials. 2009. P. 9.
17. *George L.* / US Patent Application № 20020012681. 2002.

УДК 535.323

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКРАНИРУЮЩИХ ПОКРЫТИЙ СО СПОСОБНОСТЬЮ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОГО ГАШЕНИЯ ОТРАЖЕННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН

Т.М. ПЕЧЕНЬ, А.М. ПРУДНИК

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь*

*Поступила в редакцию 2 октября 2015*

Основная задача математического моделирования заключалась в определении расчётными методами способов минимизации функции описывающей отражательную способность экранирующих покрытий. Приведены результаты изучения характеристик покрытий, обладающих способностью интерференционного гашения отраженных лучей, в диапазоне длин волн от 250 до 600 нм. Проведенное моделирование в программе EMTL позволили установить: толщина данного покрытия в ультрафиолетовой (УФ) области прямо зависит от функции, описывающей спектральную отражательную способность экрана. Представлен сравнительный анализ данных экранирующих покрытий на основе оксида алюминия, фторида магния и диоксида титана.

*Ключевые слова:* экранирующее покрытие, коэффициент отражения, интерференционное гашение, ультрафиолетовое излучение.

### Введение

Современные средства оптической разведки объектов включают применение устройств обнаружения целей в ультрафиолетовом (УФ) диапазоне длин волн (200...400 нм). Главным образом это обусловлено тем, что большинство объектов в этой области имеют более высокие яркостные контрасты по отношению к естественным фонам, чем в видимом диапазоне. Важной особенностью УФ-области спектра является наличие меньшего уровня помех естественного, и искусственного происхождения, чем в видимой и инфракрасной областях. Одним из эффективных способов маскирования в указанном диапазоне является применение экранов с интерференционным гашением отраженного излучения. Это свойство позволяет обеспечить скрытие объекта от средств оптического слежения [1].

Минимизация коэффициента отражения от границы между двумя средами представляет крайне важную практическую задачу, особенно для средств и систем специального назначения [2]. Так следует отметить, что, например, в авиационной технике это обусловлено необходимостью маскировки для незаметного осуществления полетов в воздушном пространстве, в солнечной энергетике таким способом можно повысить эффективность, а также для устранения бликов от различных дисплеев для повышения видимости [3].

### Методика эксперимента

Показатель преломления является важным параметром при решении проблемы снижения отражения от поверхностей. Показатели преломления наиболее широко применяемых материалов для создания покрытий лежат в диапазоне 1,35...2,20 [4]. В задачах синтеза конструкций экранирующих покрытий со способностью эффективного интерференционного гашения отраженного света возникает сложность с выбором оптимальной толщины покрытия, как правило, которая составляет единицы нанометров.

Одной из разновидностей оптических покрытий являются свето- и спектроделительные покрытия. В таких покрытиях зоны прозрачности, подавления и контрастность (отношение максимального и минимального пропускания) имеют строго зафиксированные значения, определенные техническим заданием. На практике трудно обеспечить максимальную крутизну  $dR/d\lambda$ .

В [5] приводится эмпирическое выражение, которое устанавливает взаимосвязь между средним коэффициентом отражения и предельной оптической толщиной покрытия. Математическое выражение (1) справедливо для видимой и ближней инфракрасной областей.

$$R_{\text{ср.}} = 0,01 \cdot \left[ \frac{\lambda_{\text{макс.}}}{\lambda_{\text{мин.}}} \cdot (n_{\text{внеш.}} - 1) \right]^{3,4} \cdot \left( \frac{\lambda_{\text{макс.}}}{d_{\text{пред.}}} \right)^{0,63} \cdot \left[ (1,2 - \Delta n)^2 + 0,42 \right], \quad (1)$$

где  $R_{\text{ср.}}$  – средний коэффициент отражения многослойного покрытия;  $n_{\text{внеш.}}$  – показатель преломления внешнего слоя оптического покрытия;  $n_{\text{н}}$  – показатель преломления нижнего слоя оптического покрытия;  $n_{\text{с}}$  – показатель преломления среднего слоя оптического покрытия;  $\frac{\lambda_{\text{макс.}}}{\lambda_{\text{мин.}}}$  – отношение максимальной к минимальной длин волн заданного диапазона;  $d_{\text{пред.}}$  – предельная оптическая толщина покрытия;  $\Delta n$  – разность между показателями преломления нижнего и среднего слоев оптического покрытия.

Моделируемые покрытия являются планарными периодическими структурами: они периодичны по двум направлениям и имеют ограниченную протяженность по оставшемуся направлению. Реальные экспериментальные образцы, конечно, имеют ограниченный размер и по первым двум направлениям, но поскольку этот размер существенно больше их протяженности по непериодическому направлению, влиянием конечности образца с хорошей степенью точности можно пренебречь.

С учетом отмеченных замечаний для математического моделирования выбран метод конечных разностей FDTD (Finite-Difference Time-Domain), в основе которого лежит способ численного решения уравнений Максвелла [6]. Выражения (2) и (3) представляют собой математическую запись метода полного и рассеянного поля.

$$\vec{E}_{\text{полн.}} = \vec{E}_{\text{пад.}} + \vec{E}_{\text{рас.}}, \quad (2)$$

$$\vec{H}_{\text{полн.}} = \vec{H}_{\text{пад.}} + \vec{H}_{\text{рас.}}, \quad (3)$$

где  $\vec{E}_{\text{полн.}}$  – вектор напряженности электрического поля результирующей волны;  $\vec{H}_{\text{полн.}}$  – вектор напряженности магнитного поля результирующей волны;  $\vec{E}_{\text{пад.}}$  – вектор напряженности электрического поля падающей волны;  $\vec{H}_{\text{пад.}}$  – вектор напряженности магнитного поля падающей волны;  $\vec{E}_{\text{рас.}}$  – вектор напряженности электрического поля рассеянной волны;  $\vec{H}_{\text{рас.}}$  – вектор напряженности магнитного поля рассеянной волны.

При моделировании данным методом считается, что падающая волна известна в каждой точке пространства и времени. Расчеты проводили в программе EMTL (Electromagnetic Template Library), которая позволяет быстро и эффективно осуществлять расчеты методом конечных разностей FDTD. В [7] представлено подробное описание данной программы, написанной на C++.

## Результаты и их обсуждение

Одним из способов уменьшения отражения является просветление оптики, заключающееся в создании на поверхности тела оптически тонкой пленки. Принцип ее действия основан на взаимном гашении интерферирующих друг с другом лучей, которые отражаются от наружной и внутренней сторон пленки. На рис. 1 представлены изображения исследуемых структур моделируемых покрытий и графики зависимостей коэффициента преломления от толщины. У однослойных просветляющих покрытий (рис. 1, а и в) имеется

серьезный недостаток: они могут быть использованы только для узкого диапазона длин волн и углов падения. Этот диапазон можно расширить, применяя многослойные покрытия (рис. 1, б, з, д и е). Принцип действия таких покрытий тот же, что и у однослойных, – взаимное интерференционное гашение двух или нескольких волн, отраженных от разных границ раздела между слоями.

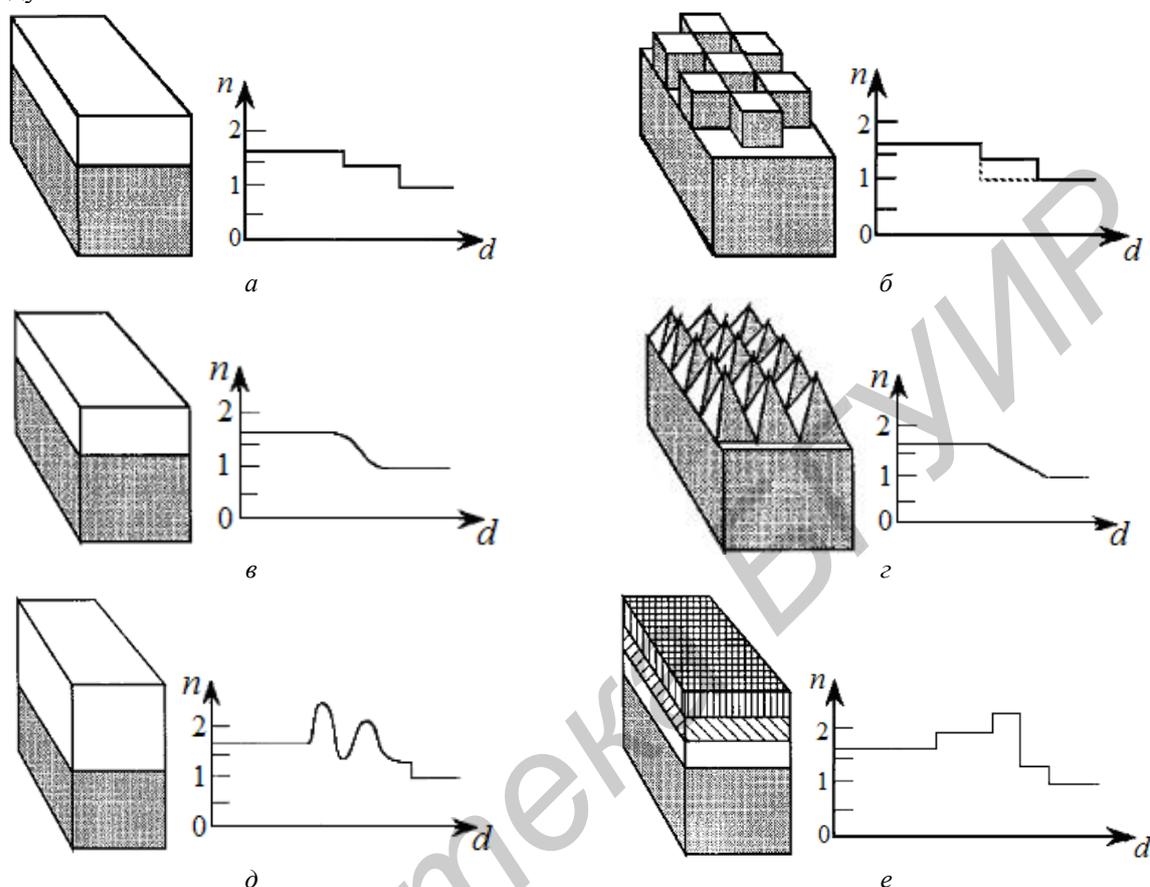


Рис. 1. Изображения исследуемых структур антиотражающих покрытий и графики зависимостей коэффициентов преломления от толщины: а – однородная однослойная; б – однородная дискретная; в – неоднородная простая; з – неоднородная пирамидальная; д – неоднородная сложная; е – однородная многослойная

Конкретные значения толщин слоев и их показателей преломления могут подбираться в зависимости от желаемого эффекта: близкий к нулю коэффициент отражения в широкой спектральной области или в широком диапазоне углов для заданной длины волны. Недостатком многослойных покрытий является проблематичность нахождения материалов с нужной диэлектрической проницаемостью. Альтернативой многослойных просветляющих покрытий могут служить слои с непрерывно меняющимся коэффициентом преломления. Применение таких покрытий позволяет достичь низких значений коэффициента отражения в широком спектральном диапазоне. Однако и у этого метода есть свои недостатки, среди которых несоответствие температурных коэффициентов расширения получаемых слоев и адгезия.

В результате моделирования определили математические выражения для расчета значений толщин слоев, необходимых для равенства нулю коэффициента отражения, при заданных показателях преломления слоев  $n_m$  и  $n_s$ . На рис. 2 представлена графическая интерпретация данной методики. Здесь рассматривается случай для двухслойного экранирующего покрытия.

В ходе математического моделирования была установлена причина, по которой для УФ-области (1) не справедливо, заключается в различном действии каждого из 3-х поддиапазонов этого спектра (коротковолновом, средневолновом и длинноволновом), а также

здесь нет строгой зависимости предельной оптической толщины слоя и максимальной длины волны поддиапазона.

Коэффициент преломления зависит от длины волны, поэтому отражение может отсутствовать только для определенной длины волны. Таким образом, следует выбирать коэффициент преломления и толщину так, чтобы минимизировать отражение на длине волны с наибольшей интенсивностью излучения.

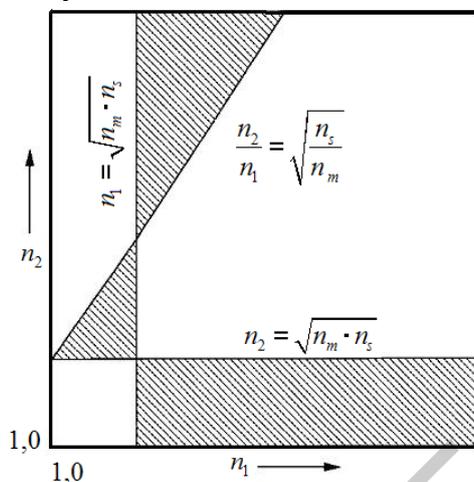


Рис. 2. Графическая интерпретация способа расчета коэффициентов преломления  $n_1$  и  $n_2$  для двухслойного антиотражающего покрытия

На практике наиболее широко применяются такие материалы для изготовления данных покрытий как оксид алюминия, фторид магния и диоксид титана. В УФ диапазоне длин волн эти материалы имеют минимальный коэффициент отражения [8]. На рис. 8 приведены графики зависимостей коэффициента отражения ( $R$ ) от длины волны ( $\lambda$ ) исследуемых покрытий, рассматриваемых материалов, нанесенных на кварцевое стекло.

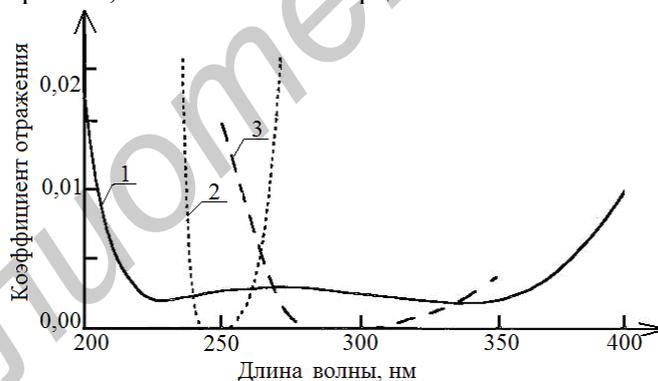


Рис. 3. Зависимость коэффициента отражения от длины волны:

- 1 — с покрытием оксида алюминия ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ );
- 2 — с покрытием фторидом магния ( $\text{MgF}_2$ );
- 3 — с покрытием диоксида титана ( $\text{TiO}_2$ )

Как видно из рис. 3, изучаемые экраны на основе оксида алюминия сохраняют свои фильтрующие свойства в широком диапазоне УФ-спектра от 220 до 360 нм, покрытие с фторидом магния является самым узкополосным (245...252 нм), а экраны с диоксидом титана отлично обеспечивают наибольший эффект от интерференционного гашения отраженного излучения для поверхностей в диапазоне 275...310 нм.

При реализации на практике многослойных интерференционных покрытий их спектры пропускания (отражения), в силу множества причин, всегда отличаются от расчетных. Поэтому вопросы синтеза дополнительных структур, которые позволяют скорректировать ошибки, возникающие при изготовлении оптических покрытий, путем добавления одного или нескольких слоев поверх готового покрытия, представляют несомненный практический интерес для конструкторов, занимающихся проектированием интерференционных фильтров.

А исследование влияния этих ошибок на оптические характеристики покрытий позволяет судить о сравнительной устойчивости нескольких структур, реализующих сходные спектральные характеристики. Однако эти вопросы слабо отражены в литературе.

Важной особенностью сохранения положительных свойств интерференционных экранов в УФ-диапазоне является влияние спектральных характеристик естественных поверхностей. Таким образом, для учета выше отмеченного на рис. 4 представлены графики зависимостей спектральных характеристик от длины волны (кривая 1 получена в результате измерений радиометром УФ-В (280...320 нм), а кривая 2 – УФ-А (320...400 нм)) [9].

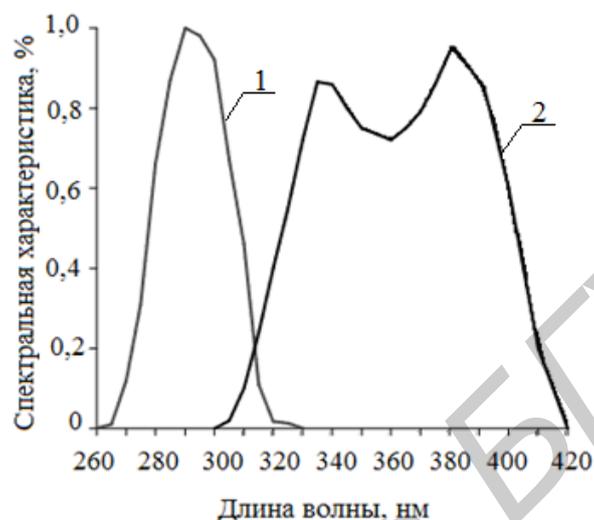


Рис. 4. Зависимости спектральных характеристик естественных поверхностей от длины волны

Необходимо применять интегральный подход для оценки в реальных условиях использования исследуемых покрытий для того, чтобы положительные свойства не были утрачены. Существуют различные способы, с помощью которых можно синтезировать любой произвольный спектр в УФ-диапазоне, с динамической имитацией рассеяния от естественной поверхности по распределению интенсивности, вплоть до имитации рассеивания света от листвы, колышущейся под ветром.

### Заключение

В результате математического моделирования в программе EMTL было установлено, что толщина интерференционного покрытия и функция, описывающая спектральную отражательную способность для УФ-области, находятся в прямой зависимости. Таким образом, можно на этапе расчетов определить необходимую толщину покрытия для заданного оптимального коэффициента отражения. В данной работе изучено несколько различных структур экранирующих покрытий: однослойные и многослойные. Результаты математического моделирования показали, что лучшими свойствами характеризуются многослойные неоднородные со сложной конфигурацией покрытия.

Для практической реализации экранирующих покрытий с эффективным интерференционным гашением отраженного излучения УФ-спектра, как правило, выбирают материалы с учетом оптимальной отражательной функции. Коэффициент отражения покрытий с нанесенным оксидом алюминия практически во всей УФ-области стремится к минимальному значению. Изучаемые экраны с фторидом магния или диоксидом титана характеризуются более узкой полосой с фильтрующим свойством в УФ-диапазоне длин волн. Выбор того или иного материала для изготовления подобных покрытий зависит от назначения системы.

В данной работе не учитывался поправочный коэффициент влияния, которое оказывают на экранирующие свойства покрытий спектральные характеристики естественных поверхностей: почвы, листвы и т.д. Этот вопрос требует детального изучения и является дальнейшим направлением исследований авторов.

# THE SIMULATION OF THE SHIELDING COATINGS WITH THE ABILITY OF THE REFLECTED RADIATION INTERFERENCE QUENCHING IN ULTRAVIOLET WAVELENGTH RANGE

T.M. PECHEN, A.M. PRUDNIK

## Abstract

The goal of simulation consisted in studying of ways of minimization of the function describing spectral reflectivity of the shielding coatings. The results of the simulation of the coatings having interference suppression property of the reflected rays in a wavelength range from 250 to 600 nm. The simulation realized in the program EMTL, allowed to determine: the thickness of shielding coating in the ultraviolet (UV) region is directly dependent on the function describing the spectral reflectance of the film. The comparative analysis of the shielding coatings based on aluminum oxide, magnesium fluoride and titanium dioxide is represented.

*Keywords:* shielding coating, reflection coefficient, interference quenching, ultraviolet radiation.

## Список литературы

1. Сулейманов С.Х., Дыскин В.Г., Джанклыч М.У. и др. // Письма в «Журнал технической физики». 2013. Т. 39, № 6. С. 74–78.
2. Волков В.Г // Специальная техника. 2004. № 2. С. 2–9.
3. Головкин В.А., Емельянов В.Н., Солк С.В. и др. // Матер. МНТК «Четвертые Уткинские чтения». Санкт-Петербург, Россия. 2009. Т. 1. С. 93–96.
4. Бутиков Е.И. Оптика. Санкт-Петербург, 2003.
5. Willey R.R. // 34<sup>th</sup> Annual Technical Conference of the Society of Vacuum Coaters. Philadelphia, March 17–22, 1991. P. 205–209.
6. Taflove A., Hagness S.H. Computational Electrodynamics: the Finite-Difference Time-Domain Method. Norwood, 2005.
7. Документация EMTL. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://fdtd.kintechlab.com/ru/documentation>. – Дата доступа: 27.08.2015.
8. Farjadpour A., Roundy D., Rodriguez A. et. al. // Optics Letters. 2006. Vol. 31. P. 2972–2980.
9. Chadysiene R., Girgzdys A. // J. of Environmental Engineering and Landscape Management. 2008. № 16 (2). P. 83–88.

УДК 621.372.512

## СИНТЕЗ ЧАСТОТНО-ИЗБИРАТЕЛЬНЫХ ЦЕПЕЙ С ВНУТРЕННИМИ НУЛЯМИ ФУНКЦИИ ПЕРЕДАЧИ

В.Н. ШАШОК

Военная академия Республики Беларусь  
Минск-57, 220057, Беларусь

Поступила в редакцию 7 мая 2015

Приведена методика синтеза фильтра-прототипа на основе модифицированной нулем передачи нарастающе-волновой аппроксимирующей функции. Показаны способы расчета номиналов элементов фильтра в зависимости от места реализации введенного нуля передачи.

*Ключевые слова:* синтез частотно-избирательных цепей, модифицированная нарастающе-волновая функция передачи, нули функции передачи.

### Введение

Задача обеспечения высокой крутизны амплитудно-частотной характеристики в переходной области частотно-избирательных цепей решается применением в качестве аппроксимирующей эллиптической функции передачи. Данная задача также может быть выполнена использованием классических аппроксимирующих функций, модифицированных нулями передачи на внутренних критических частотах ( $0 < \omega^0 < \infty$ ). Такие модифицированные функции могут применяться и при необходимости обеспечения бесконечного затухания синтезируемых частотно-избирательных цепей на заданных частотах. Синтез указанных цепей требует предварительного определения звеньев, реализующих введенные нули передачи.

При этом необходимо отметить, что критическим частотам, расположенным на полуоси  $+j\omega$ , в действительности соответствуют сопряженные с ними критические частоты на полуоси  $-j\omega$  [1]. Кроме того, введенные нули передачи  $s^0 = j\omega^0$  выбираются простыми, т.е. лежат на мнимой оси плоскости комплексной частоты.

### Синтез фильтра-прототипа на основе модифицированной функции передачи

В качестве базового при аналитическом синтезе фильтров, в том числе и активных, СВЧ, цифровых БИХ-фильтров, используется фильтр нижних частот, значения элементов которого нормированы относительно граничной частоты и волнового сопротивления источника. Именно для данного фильтра разрабатываются методики синтеза. Таким образом, свойства синтезируемых фильтров изначально определяются выбором функции передачи их фильтра-прототипа, аппроксимирующей с заданной точностью функцию передачи идеального неискажающего фильтра. Рассмотрим в качестве примера синтез фильтра-прототипа на основе аппроксимирующей нарастающе-волновой функции четвертого порядка, модифицированной введенным нулем передачи на частоте  $\omega^0 = 1,36$ ,

$$K(-s^2) = \frac{k^2}{1 - \left( \frac{j^2 - (j1,36)^2}{s^2 - (j1,36)^2} \right)^2} \cdot 0,509^2 s^2 T_{Cheb}^2(3, s) \quad (1)$$

$$= \frac{0,5^2 (0,390625 s^4 + 1,445 s^2 + 1,336336)}{1,168811805456 s^8 + 1,753217708184 s^6 + 1,048082 s^4 + 1,445 s^2 + 1,336336}$$

где  $T_{Cheb}(3, s)$  – обобщенный полином Чебышева первого рода 3 порядка;  $k = \frac{R_n}{R_c + R_n}$  – коэффициент, характеризующий уровень передачи ЭДС источника в нагрузку, в режиме согласования равный 0,5.

Выбранный коэффициент неравномерности в полосе пропускания 0,509 (1 дБ) обеспечивает внеполосное затухание не менее 20 дБ. Функция с нарастающе-волновыми свойствами позволяет синтезировать цепи с повышенной равномерностью характеристики группового времени запаздывания в большей части полосы пропускания при заданном внеполосном затухании [2]. Модификация ее нулем передачи обеспечивает в переходной области повышенную крутизну АЧХ синтезируемых цепей. Вид функции передачи мощности (1) при  $s = j\omega$  ( $\sigma = 0$ ) приведен на рис. 1.

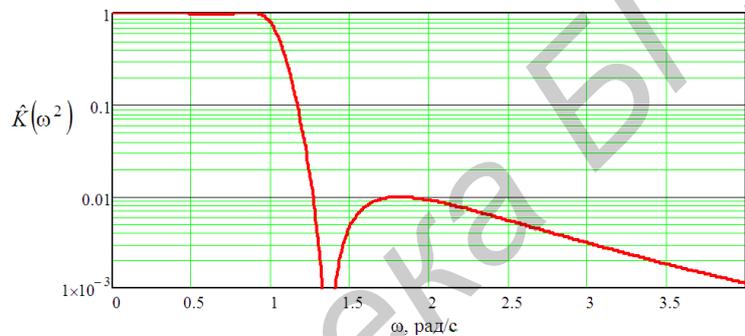


Рис. 1. Вид функции передачи мощности (1) при  $s = j\omega$

Входное сопротивление цепи с рассматриваемой функцией передачи (1) описывается выражением (см. рис. 2)

$$Z_{вх}(s) = \frac{1,040344 s^4 + s^3 + 1,74164 s^2 + 1,081078 s^2 + 0,556202}{s^3 + 0,961058 s^2 + 1,081078 s + 0,556202} \quad (2)$$

Функция сопротивления (2) на частоте  $s = j\omega$  принимает бесконечное значение (рис. 3). В данной особой точке вычет функции соответствует нормированному номиналу индуктивности  $L_1$  первой последовательно включенной ветви синтезируемого двухполюсника [1, 3]:

$$\lim_{s \rightarrow j\omega} \frac{Z_{вх}(s)}{s} = L_1 = 1,040344.$$

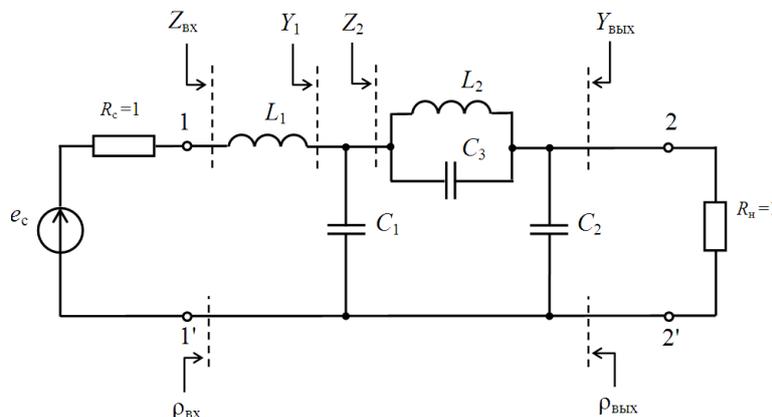


Рис. 2. Фильтр-прототип четвертого порядка с параллельным контуром в третьем звене

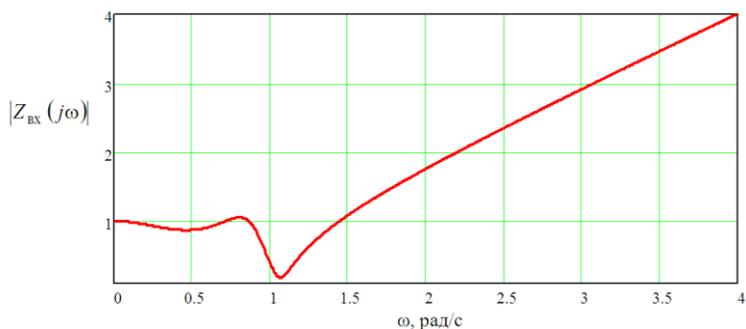


Рис. 3. Функция модуля сопротивления (4) при  $s = j\omega$

Вычитая сопротивление найденной индуктивности  $L_1$  из (2), найдем проводимость оставшейся части двухполюсника

$$Y_1(s) = \frac{1}{Z_{\text{вх}}(s) - L_1 s} = \frac{12,5s^3 + 12,01323s^2 + 13,513479s + 6,952526}{7,711831s^2 + 6,280457s + 6,952526}. \quad (3)$$

Функция проводимости (3) принимает бесконечное значение на частоте  $s = j\omega$ . По этой причине второе звено может содержать только емкость. Введенный ноль может быть реализован в третьем последовательном звене включением параллельного контура  $L_2, C_3$  (рис. 2). С учетом того, что проводимость параллельного контура на частоте  $\omega^0 = 1,36$  равна нулю, то проводимость  $Y_1$  на данной частоте определяется только емкостью  $C_1$ , т.е.

$$Y_1(j\omega^0) = C_1 j\omega^0. \quad (4)$$

Из данного равенства следует  $C_1 = 1,314134$ . Функция сопротивления

$$Z_2(s) = \frac{1}{Y_1(s) - C_1 s} = \frac{s^2 + 0,814392s + 0,90154}{0,306752s^3 + 0,487545s^2 + 0,56756s + 0,90154} \quad (5)$$

на частоте  $\omega^0 = 1,36$  имеет особую точку, в которой принимает бесконечное значение (рис. 4). Из этого следует, что в состав данного сопротивления входит слагаемое, соответствующее сопротивлению параллельного контура.

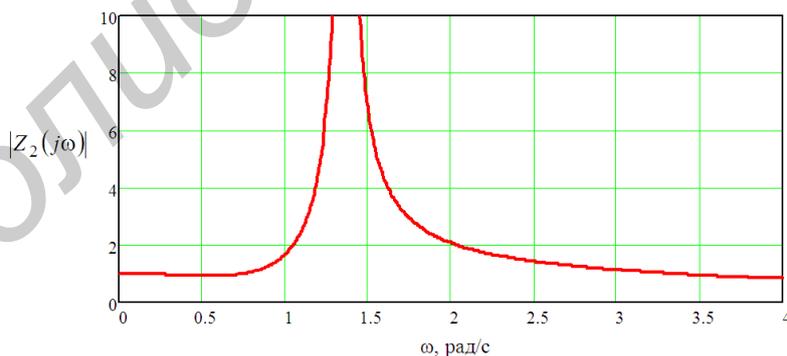


Рис. 4. Функция модуля сопротивления (5) при  $s = j\omega$

Согласно рис. 2

$$Z_2(s) = \frac{1}{C_3} \frac{s}{s^2 - (j\omega^0)^2} + \frac{1}{C_2 s + 1}, \quad (6)$$

где  $\frac{1}{C_3} \frac{s}{s^2 - (j\omega^0)^2}$  – сопротивление параллельного контура  $L_2, C_3$ .

Вычет функции (6) позволяет определить номиналы элементов контура

$$\lim_{s \rightarrow j\omega^0} \frac{Z_2(s)}{s} = \frac{1}{C_3} = 1,670643,$$

$$\frac{1}{s^2 - (j\omega^0)^2}$$

что соответствует  $C_3 = 0,598572$ .

$$\text{При этом } L_2 = \frac{1}{(\omega^0)^2 C_3} = 0,903248.$$

Определим номинал емкости  $C_2$  тем же способом, что и номинал емкости  $C_1$ . Аналогично равенству (4)

$$Y_{\text{вых}}(j\omega^0) = C_2 j\omega^0. \quad (7)$$

Фильтр является взаимным четырехполюсником и функция передачи (1) справедлива при прохождении сигнала с выхода на вход. В то же время последнее звено относительно выхода имеет сопротивление не индуктивного характера, а емкостного. Данные условия будут выполняться при соотношении коэффициентов отражения

$$\rho_{\text{вых}}(s) = -\rho_{\text{вх}}(s) = -\frac{Z_{\text{вх}}(s) - 1}{Z_{\text{вх}}(s) + 1} = \frac{\frac{1}{Z_{\text{вх}}(s)} - 1}{\frac{1}{Z_{\text{вх}}(s)} + 1} = \frac{Z_{\text{вых}}(s) - 1}{Z_{\text{вых}}(s) + 1}. \quad (8)$$

С учетом (2) и (8)

$$Y_{\text{вых}}(s) = \frac{1,040344s^4 + s^3 + 1,74164s^2 + 1,081078s^2 + 0,556202}{s^3 + 0,961058s^2 + 1,081078s + 0,556202}. \quad (9)$$

Из (7) и (9) следует  $C_2 = 0,5629074$ .

Таким образом, последовательно включенной индуктивности соответствует параллельно включенная емкость такого же номинала и наоборот. В этом заключается дуальность фильтров-прототипов. Нормированная амплитудно-частотная характеристика синтезированного фильтра-прототипа приведена на рис. 5 и ее вид соответствует заданной функции передачи мощности (1) (рис. 1). Минимальное внеполосное затухание равно заданному 20 дБ и ноль передачи реализован на частоте  $\omega^0 = 1,36$ .

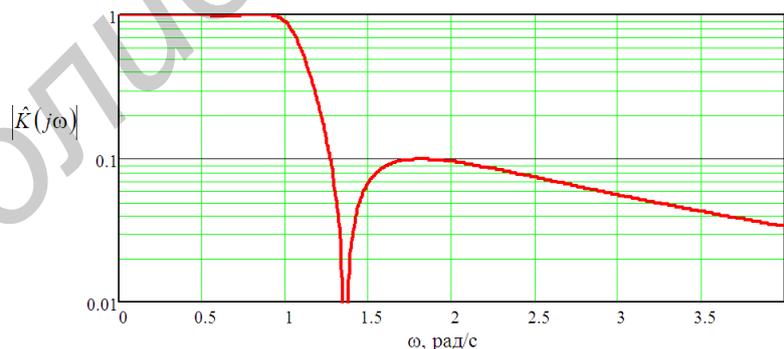


Рис. 5. Нормированная амплитудно-частотная характеристика фильтра-прототипа, синтезированного на основе функции передачи мощности (2)

В случае, когда вводимый ноль передачи реализуется включением во второе звено последовательного контура (рис. 6), номинал индуктивности  $L_1$  определяется условием  $Z_{\text{вх}}(j\omega^0) = L_1 j\omega^0$ , которое обеспечивается при  $L_1 = 0,629074$ .

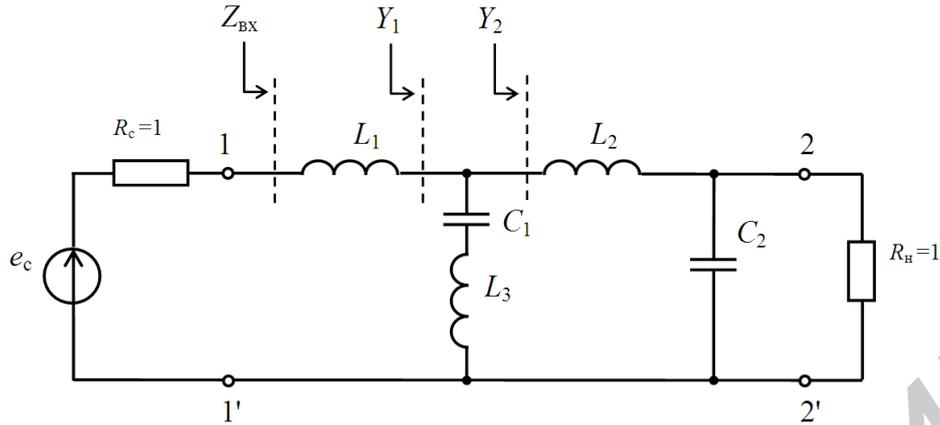


Рис. 6. Фильтр-прототип четвертого порядка с последовательным контуром во втором звене

Функция проводимости

$$Y_1(s) = \frac{1}{Z_{\text{ВХ}}(s) - L_1 s} = \frac{s^3 + 0,961058s^2 + 1,081078s + 0,556202}{0,41127s^4 + 0,395423s^3 + 1,061562s^2 + 0,731186s + 0,556202}, \quad (10)$$

описывающая трехзвенную цепь, в отличие от проводимости (3), остается функцией четвертого порядка, так как согласно рис. 6

$$Y_1(s) = \frac{(C_1 C_2 L_2 + C_1 C_2 L_3)s^3 + (C_1 L_2 + C_1 L_3)s^2 + (C_1 + C_2)s + 1}{C_1 C_2 L_2 L_3 s^4 + C_1 L_2 L_3 s^3 + (C_1 L_3 + C_2 L_2)s^2 + L_1 s + 1}.$$

Вид функции модуля проводимости (10) приведен на рис. 7.

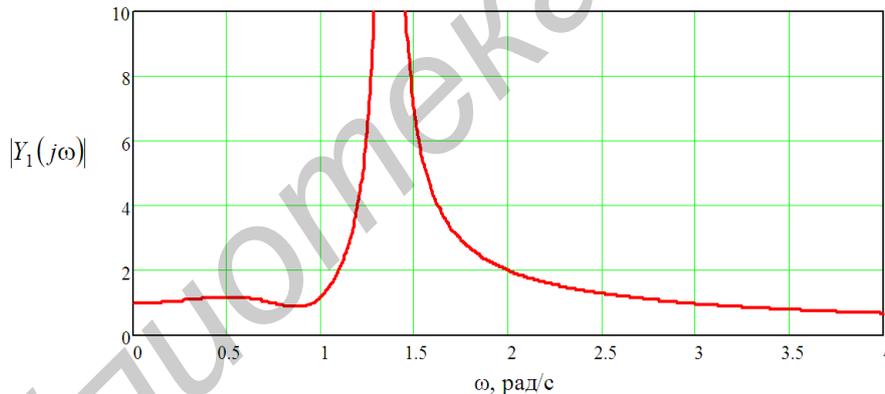


Рис. 7. Функция модуля проводимости (10) при  $s = j\omega$

Согласно рис. 6,  $Y_1(s) = \frac{1}{L_3} \frac{s}{s^2 - (j\omega^0)^2} + Y_2(s)$ , где  $\frac{1}{L_3} \frac{s}{s^2 - (j\omega^0)^2}$  – сопротивление последовательного контура  $L_3, C_1$ . Из-за наличия данного слагаемого функция проводимости (10) в точке  $\omega^0 = 1,36$  равна бесконечности. Вычет функции позволяет определить номиналы элементов последовательного контура

$$\lim_{s \rightarrow j\omega^0} \frac{Y_2(s)}{\frac{s}{s^2 - (j\omega^0)^2}} = \frac{1}{L_3} = 1,670643.$$

Из последнего выражения следует:

$$L_3 = 0,598597; \quad C_1 = \frac{1}{(\omega^0)^2 L_3} = 0,903207.$$

Равенство номиналов элементов  $L_1$ ,  $L_3$  и  $C_1$  второй схемы соответствует номиналам элементов  $C_2$ ,  $C_3$  и  $L_2$  первой схемы, подтверждает дуальность рассматриваемых фильтров-прототипов. Воспользовавшись данным свойством, найдем номиналы элементов  $L_2$  и  $C_2$  второй схемы:  $L_2 = 1,314134$ ;  $C_2 = 1,040344$ . Нормированная амплитудно-частотная характеристика синтезированного фильтра-прототипа, представленного на рис. 6 полностью соответствует характеристике, приведенной для первой схемы фильтра (рис. 5)

### Заключение

Синтез частотно-избирательных цепей на основе эллиптической функции и функций, модифицированных нулями передачи, требует предварительного определения звеньев, реализующих такие нули. По виду функции входного сопротивления синтезируемой цепи нельзя однозначно определить место включения контура, реализующего введенный ноль передачи. Функции сопротивления или проводимости цепи в точке подключения контура должны иметь на единицу больший порядок в сравнении с цепью, имеющей такое же количества звеньев, но при отсутствии контура. Применение вычета для нахождения номинала элемента звена, стоящего перед контуром, не позволяет выполнить данное условие. На фильтры-прототипы с контурами, реализующими введенные нули передачи, также распространяется свойство дуальности, что позволяет упростить процедуру расчета фильтров четных порядков.

## SYNTHESIS OF FREQUENCY-SELECTIVE RANGES WITH INTERNAL ZERO OF TRANSFER FUNCTION

V.N. SHASHOK

### Abstract

Method of prototype filter synthesis based on modified by transfer zero rising ripple approximating function is presented. The ways of calculation of rates of filter elements according to location of realization of added transfer zero are shown.

*Keywords:* synthesis of frequency-selective circuit, modified growing wave transmission function, zero of transmission function.

### Список литературы

1. Карни Ш. Теория цепей. Анализ и синтез. М., 1973.
2. Шашок В.Н. // Докл. БГУИР. 2011. № 8 (62). С. 52–58.
3. Батура М.П. Теория электрических цепей. Минск, 2007.

УДК 621.396.218:614.89.086.5

## ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ ФОН, СОЗДАВАЕМЫЙ БАЗОВЫМ И АБОНЕНТСКИМ РАДИООБОРУДОВАНИЕМ СОТОВЫХ РАДИОСЕТЕЙ

В.И. МОРДАЧЕВ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь

Поступила в редакцию 1 июня 2015

Предложена методика оценки суммарной интенсивности электромагнитного фона, создаваемого базовым и абонентским радиооборудованием сотовой связи, основанная на оценке электромагнитной нагрузки на территорию, создаваемой этим оборудованием. Методика применима для сотовых радиосетей всех действующих и перспективных стандартов и поколений и обеспечивает возможность оценки вынужденных экологических рисков от использования сотовой связи в местах с высокой плотностью населения.

*Ключевые слова:* радиоэлектронная обстановка, электромагнитная нагрузка, электромагнитная экология, электромагнитная безопасность.

### Введение

Чрезвычайно интенсивное развитие сотовой связи является причиной существенного увеличения электромагнитного фона (ЭМФ) в местах с высокой плотностью населения. В этой связи разработка практической методики оценки интенсивности этой составляющей суммарного ЭМФ, фактически определяющей электромагнитную экологию среды обитания и уровень электромагнитной безопасности населения, является весьма актуальной.

В [1–4] введено и развито понятие электромагнитной нагрузки (ЭМН) на территорию как интегральной системной характеристики электромагнитной безопасности радиоэлектронной обстановки (РЭО) и электромагнитной экологии территорий городской застройки. Электромагнитная нагрузка на территорию, создаваемая радиооборудованием сотовой сети, определяется как суммарная эквивалентная изотропно излучаемая мощность (ЭИИМ) абонентских (АС) либо базовых станций (БС) сотовой связи, приходящаяся на единицу площади территории. В [1–4] даны оценки влияния этой характеристики РЭО на параметры электромагнитной обстановки (ЭМО) вблизи земной поверхности, создаваемой как стационарными, так и мобильными радиоэлектронными средствами (РЭС) – источниками электромагнитных полей (ЭМП). В этих работах установлены аналитические зависимости ЭМН на территорию, создаваемой отдельными видами радиооборудования сотовой связи стандарта GSM, с ЭМН от этого оборудования на население, определяемой суммарной интенсивностью ЭМП от БС либо АС вблизи земной поверхности, а также связь ЭМН на территорию с вероятностью  $p$  превышения суммарной интенсивностью всех ЭМП в точке наблюдения у земной поверхности предельно допустимого уровня (ПДУ) ЭМП, регламентируемого действующими санитарно-гигиеническими нормативами [5–7]. Применительно к сотовой связи эти исследования выполнены в предположении независимости электромагнитных излучений базового и абонентского оборудования.

На самом деле и ЭМП БС и АС, и создаваемая ими ЭМН на территорию, а также совокупные уровни ЭМФ от стационарного и мобильного сегментов радиооборудования сотовой связи взаимозависимы и непосредственно связаны с нагрузкой на сеть, создаваемой

множеством абонентов, находящихся на данной территории и обращающихся к услугам сотовой связи в рассматриваемый период.

Цель данной работы – с использованием подхода [1–4] разработать методику оценки суммарной интенсивности ЭМФ, создаваемого и базовым, и абонентским радиооборудованием сотовой связи, на основе анализа создаваемой этим оборудованием ЭМН на территорию в часы максимальной нагрузки сети.

### Исходные модели и соотношения

1. Электромагнитная нагрузка на территорию  $L_T$  от ЭМП РЭС, характеризующихся средней ЭИИМ  $P_e$  и средней территориальной плотностью  $\rho$  РЭС, определена в [1–3] следующим образом:

$$L_T = P_e \rho. \quad (1)$$

2. Для описания случайного размещения РЭС в пространстве используем известную модель равномерного пуассоновского случайного распределения РЭС как точечных источников ЭМП по плоской поверхности:

$$p_k(N_{\Delta S}) = (N_{\Delta S}^k \exp(-N_{\Delta S})) / k!, \quad N_{\Delta S} = \rho \cdot \Delta S, \quad (2)$$

где  $p_k(N_{\Delta S})$  – вероятность попадания в некоторый элемент  $\Delta S$  поверхности ровно  $k$  точечных источников ЭМП, если среднее число источников ЭМП в этом элементе равно  $N_{\Delta S}$ ;  $\rho$  – средняя территориальная плотность источников ЭМП. Дополнительно будем считать, что случайное размещение РЭС как точечных источников ЭМП по плоской поверхности предполагает их расположение на определенной высоте  $H$  над земной поверхностью.

3. В качестве модели условий РРВ от РЭС в точку наблюдения со случайными координатами, расположенную на высоте  $H_{OP}$  над поверхностью, используем известную составную модель [8], для которой характерно следующее:

– на небольшом удалении  $R$  РЭС от точки наблюдения условия РРВ соответствуют условиям РРВ в свободном пространстве;

– начиная с некоторой дистанции  $R_{BP}$  условия РРВ для РЭС рассматриваемого вида меняются: плотность потока мощности  $\Pi$  ЭМП РЭС убывает обратно пропорционально четвертой степени расстояния в связи с многолучевостью РРВ; граница  $R_{BP}$  между зонами «свободного» и «интерференционного» РРВ (положение точки “breakpoint”) зависит от высоты подвеса антенн  $H$  РЭС рассматриваемого вида и высоты  $H_{OP}$  точки наблюдения над земной поверхностью и определяется следующим известным соотношением:

$$R_{BP} = 4H_{OP}H / \lambda, \quad (3)$$

где  $\lambda$  – длина волны ЭМП РЭС рассматриваемого вида.

На удаленности РЭС от точки наблюдения менее  $R_{BP}$  используется следующая общепринятая модель условий РРВ в свободном пространстве:

$$\Pi = P_e / 4\pi R^2, \quad R \leq R_{BP}, \quad (4)$$

где  $\Pi$  – плотность потока мощности ЭМП, образуемая РЭС на удаленности  $R$ , Вт/м<sup>2</sup>,  $P_e$  – ЭИИМ электромагнитного излучения РЭС данного вида.

На удаленности РЭС от точки наблюдения более  $R_{BP}$  используется следующая модель, характерная для условий интерференционного (многолучевого) РРВ:

$$\Pi = R_{BP}^2 P_e / (4\pi R^4), \quad R \geq R_{BP}. \quad (5)$$

4. Соотношения, полученные с использованием (1)–(5) и обеспечивающие возможность оценки отдельных компонент ЭМФ, создаваемого стационарными и подвижными радиопередатчиками сотовой радиосети, для различных вариантов взаимного размещения

точки наблюдения вблизи земной поверхности по отношению к стационарным (БС) и мобильным (АС) РЭС сотовой связи, приведены в [1–4].

### Электромагнитный фон, создаваемый радиооборудованием сотовой сети

Удельная территориальная нагрузка сотовой радиосети, равная территориальной плотности АС «в активном состоянии» (в состоянии электромагнитного излучения)  $\rho_{MS}$ , является важнейшей характеристикой сотовой связи, определяемой территориальной плотностью абонентов  $\rho_S$  (фактически – плотностью населения) и удельной интенсивностью трафика  $E$  [Эрл.]:  $\rho_{MS} = \rho_S E$ . В периоды наибольшей интенсивности трафика (часы максимальной нагрузки сети)  $E = 0,025 \dots 0,08$ , с учетом имеющих место тенденций удешевления услуг сотовой связи и массового «многослойного» охвата ими населения в качестве среднего значения при выполнении оценок целесообразно принять  $E = 0,05 \dots 0,055$ .

Эквивалентная изотропно излучаемая мощность АС является случайной величиной в связи с наличием в сети принудительной регулировки мощности электромагнитного излучения АС (в диапазоне 30 дБ с шагом 2–3 дБ в сетях GSM и в диапазоне более 70 дБ с шагом 0,25–1,5 дБ в сетях UMTS/CDMA) [9–11], среднее значение  $m_1(P_{MS})$  ЭИИМ АС определяется наряду с другими факторами условиями РРВ между АС и БС и может быть принято равным  $1/2 \dots 1/3$  от максимального значения [12].

Каждая АС в активном состоянии использует канал связи (канал трафика) с БС, при этом ЭИИМ БС  $P_{ceBS}$ , приходящаяся на этот канал, существенно превышает ЭИИМ АС:

$$P_{ceBS}[dBW] = P_{eMS}[dBW] + \Delta_{eBM}, \quad \Delta_{eBM} = G_{ABS}[dB] - G_{AMS}[dB] + D_{UD}[dB], \quad (6)$$

где  $G_{ABS}$ ,  $G_{AMS}$  – коэффициенты усиления антенн БС и АС,  $D_{UD}$  – разница в энергетике радиолиний «вниз» и «вверх», необходимая для обеспечения функционирования сети. Как правило, в системах сотовой связи коэффициенты усиления антенн БС и АС отличаются на 15–18 дБ, и разница  $\Delta_{eBM}$  в средней ЭИИМ БС, приходящаяся на один канал трафика, и средней ЭИИМ АС, могут достигать 20–25 дБ.

Используя результаты [1–4], получим соотношения для определения суммарной интенсивности ЭМФ, создаваемого совместно совокупностью АС и БС сотовой связи.

1. Интенсивность ЭМФ, создаваемого в точке наблюдения у земной поверхности совокупностью БС в часы максимальной нагрузки сети, определяется соотношением:

$$\Pi_{\Sigma BS} \approx \frac{L_{TBS}}{2} \ln \left( \frac{6,6H_{OP}}{\lambda} \right) = \frac{L_{TMS} \Delta_{eBM}}{2} \ln \left( \frac{6,6H_{OP}}{\lambda} \right), \quad L_{TBS} = L_{TMS} \Delta_{eBM}. \quad (7)$$

где  $L_{TBS}$ ,  $L_{TMS}$  – средняя ЭМН на территорию, создаваемая БС и АС соответственно.

2. Совокупная интенсивность ЭМФ, создаваемого в точке наблюдения у земной поверхности множеством АС в часы максимальной нагрузки сети, определяется соотношением:

$$\Pi_{\Sigma MS} \approx \frac{L_{TMS} (Z+1)}{4} + \frac{L_{TMS}}{4p} = \frac{L_{TMS}}{4} \left( Z+1 + \frac{1}{p} \right), \quad (8)$$

$$Z = \sum_{H=2}^{\text{int}\{N_A\}} \frac{1}{H-1}, \quad N_A = \pi \rho_{MS} R_{BPMS}^2, \quad R_{BPMS} = \frac{4H_{OP}^2}{\lambda}.$$

3. Суммарная ЭМН на территорию  $L_{T\Sigma}$ , создаваемая радиооборудованием сотовой связи, равна  $L_{T\Sigma} = L_{TBS} + L_{TMS} = L_{TMS}(\Delta_{eBM} + 1)$ . Суммарная интенсивность ЭМФ, образуемого БС и АС в точке наблюдения на высоте  $H_{OP}$  над земной поверхностью, может быть определена следующим образом:

$$\Pi_{\Sigma BG} = \Pi_{\Sigma BS} + \Pi_{\Sigma MS} \approx \frac{L_{TMS}}{2} \left( \Delta_{eBM} \ln \left( \frac{6,6H_{OP}}{\lambda} \right) + \frac{1}{2} \left( Z+1 + \frac{1}{p} \right) \right), \quad p \leq 0,1. \quad (9)$$

4. В случаях малой доверительной вероятности и малых значений  $Z$ , характерных при малых значениях  $\rho_{MS}$  и/или  $R_{BP}$ , соотношение (9) для оценки суммарной интенсивности ЭМФ,

создаваемого БС и АС в точке наблюдения на высоте  $H_{OP}$  над земной поверхностью, может быть упрощено следующим образом:

$$P_{\Sigma BG} \approx \frac{L_{TMS}}{2} \left( \Delta_{eBM} \ln \left( \frac{6,6 H_{OP}}{\lambda} \right) + \frac{1}{2p} \right), \quad p \leq 0,1. \quad (10)$$

Разница между значениями (9) и (10) равна  $L_{TMS}(Z+1)/4$  и при представляющих практический интерес значениях  $L_{TMS} \leq 10^{-4}$ ,  $Z < 10$  она не превышает 1 % от значения, полученного с использованием (9), или  $(1...2)10^{-4}$  Вт/м<sup>2</sup> ( $(1...2)10^{-2}$  мкВт/см<sup>2</sup>).

### Расчетные оценки интенсивности ЭМФ, создаваемого сотовыми радиосетями

На рис. 1–6 приведены семейства расчетных кривых, иллюстрирующих зависимости оценочных значений интенсивности суммарного ЭМФ, создаваемого радиоборудованием сотовой связи, от создаваемого этим оборудованием средней ЭМН на территорию, а также от уровня доверительной вероятности  $p$  при оценках вынужденных экологических рисков, связанных с влиянием ЭМФ на здоровье населения, а также от принятого превышения ЭИИМ БС над ЭИИМ АС. Расчеты выполнены для  $\lambda = 0,167$  м (полоса частот GSM-1800).

На рис. 1 приведены зависимости суммарной интенсивности ЭМФ  $P_{\Sigma BG}$  [Вт/м<sup>2</sup>] и интенсивности его отдельных компонент в точке наблюдения, от доверительной вероятности  $p$  при средней ЭМН на территорию, создаваемой АС,  $L_{TMS} = 10^{-4}$  Вт/м<sup>2</sup>, и  $\Delta_{eBM} = 100$  (20 дБ): кривая 1 соответствует суммарной интенсивности ЭМФ, определяемой соотношениями (9), (10), горизонтальная прямая 2 соответствует интенсивности слагаемого ЭМФ, создаваемого ЭМП БС, кривая 3 соответствует интенсивности в точке наблюдения преобладающего ЭМП от ближайшей АС, кривая 4 соответствует суммарной интенсивности ЭМФ (8), создаваемого в точке наблюдения всей совокупностью АС.

На рис. 2 приведены зависимости суммарной интенсивности ЭМФ  $P_{\Sigma BG}$  [Вт/м<sup>2</sup>] от доверительной вероятности  $p$  при  $\Delta_{eBM} = 100$  (20 дБ) и различных уровнях средней ЭМН на территорию, создаваемой АС:  $L_{TMS} = 10^{-4}$  Вт/м<sup>2</sup> (кривая 1),  $L_{TMS} = 10^{-5}$  Вт/м<sup>2</sup> (кривая 2) и  $L_{TMS} = 10^{-6}$  Вт/м<sup>2</sup> (кривая 3); горизонтальная прямая 4 соответствует ПДУ ЭМП 10 мкВт/см<sup>2</sup> (0,1 Вт/м<sup>2</sup>), регламентируемого [5–7].



Рис. 1. Зависимости суммарной интенсивности ЭМФ и интенсивности его отдельных компонент от доверительной вероятности  $p$  при  $L_{TMS} = 10^{-4}$  Вт/м<sup>2</sup>,  $\Delta_{eBM} = 20$  дБ

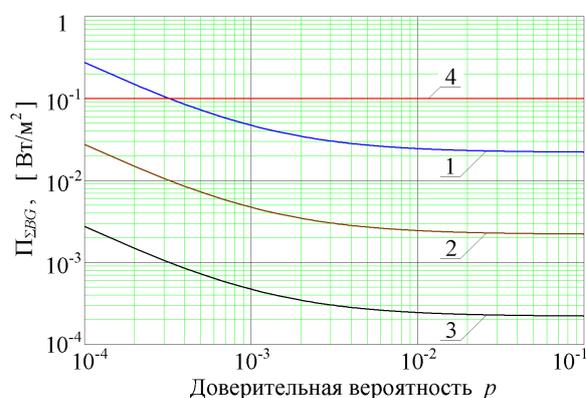


Рис. 2. Зависимости суммарной интенсивности ЭМФ от доверительной вероятности  $p$  при  $\Delta_{eBM} = 20$  дБ и различных уровнях средней ЭМН на территорию, создаваемой АС:

Анализ кривых рис. 1, 2 позволяет сделать вывод, что влияние ЭМП АС на суммарный уровень ЭМФ в точке наблюдения у земной поверхности на высоте человеческого роста оказывается существенным при уровнях доверительной вероятности  $p \leq 10^{-2}$ . Вместе с тем, различия в оценках вклада ЭМП АС в суммарную интенсивность ЭМФ с учетом и без учета слагаемого ЭМФ, создаваемого всеми АС, кроме преобладающего, оказываются заметными только в области  $p > 10^{-2}$ . Поэтому, в целом, при равномерном случайном распределении АС по земной поверхности и существенном превышении  $\Delta_{eBM}$  ЭИИМ БС над средним ЭИИМ АС вкладом ЭМП АС, за исключением вклада ЭМП ближайшей АС, в формирование совокупной интенсивности ЭМФ у земной поверхности можно пренебречь.

На рис. 3 приведены зависимости суммарной интенсивности ЭМФ от средней ЭМН на территорию, создаваемой АС, при  $\Delta_{eBM} = 100$  (20 дБ) и различных уровнях доверительной вероятности: кривая 1 соответствует  $p = 10^{-1}$ , кривая 2 соответствует  $p = 10^{-2}$ , кривая 3 соответствует  $p = 10^{-3}$ , кривая 4 соответствует  $p = 10^{-4}$ , горизонтальная прямая 5 соответствует ПДУ ЭМП  $0,1 \text{ Вт/м}^2$ .

Анализ кривых рис. 3 подтверждает целесообразность регламентации доверительной вероятности, определяющей уровень электромагнитной безопасности населения, на уровне  $p = 10^{-2}$ , реализованной в [13]. Выбор  $p \geq 10^{-2}$  практически не приводит к ужесточению требований, направленных на ограничение электромагнитных излучений оборудования сотовой связи. В то же время при уменьшении доверительной вероятности по отношению к уровню  $p = 10^{-2}$  наблюдается резкое уменьшение критических уровней ЭМН на территорию, при которых суммарная интенсивность ЭМФ, создаваемая РЭС сотовой связи, достигает ПДУ.

На рис. 4 приведены зависимости суммарной интенсивности ЭМФ от средней ЭМН на территорию, создаваемой АС, при различных  $\Delta_{eBM}$  для доверительной вероятности  $p = 0,01$ : кривая 1 соответствует  $\Delta_{eBM} = 10$  дБ, кривая 2 соответствует  $\Delta_{eBM} = 15$  дБ, кривая 3 соответствует  $\Delta_{eBM} = 20$  дБ, кривая 4 соответствует  $\Delta_{eBM} = 25$  дБ, горизонтальная прямая 5 соответствует ПДУ ЭМП  $0,1 \text{ Вт/м}^2$ .

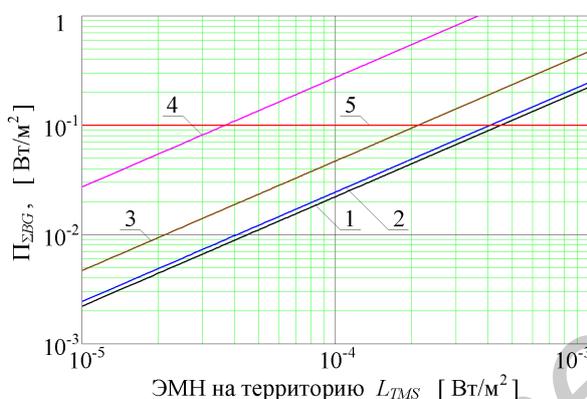


Рис. 3. Зависимости суммарной интенсивности ЭМФ от средней ЭМН на территорию, создаваемой АС, при  $\Delta_{eBM} = 20$  дБ и различных значениях доверительной вероятности

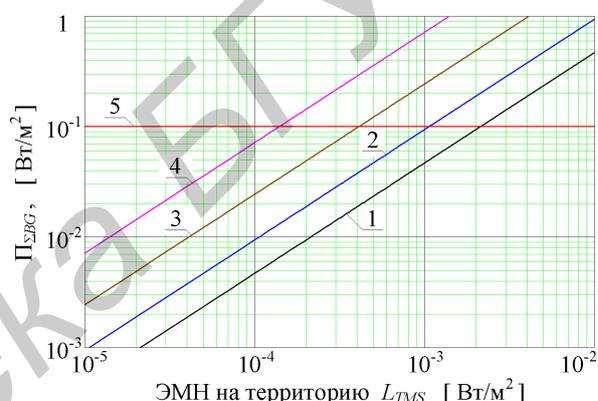


Рис. 4. Зависимости суммарной интенсивности ЭМФ от средней ЭМН на территорию, создаваемой АС, при различных  $\Delta_{eBM}$  для доверительной вероятности  $p = 0,01$

Анализ графиков рис. 4 позволяет сделать вывод, что разница  $\Delta_{eBM}$  в ЭИИМ БС, приходящаяся на канал трафика, и ЭИИМ АС, является важнейшим фактором, определяющим степень преобладания интенсивности ЭМФ от стационарных источников ЭМП, являющихся частью инфраструктуры сотовой связи, над суммарной интенсивностью ЭМП АС у земной поверхности. Эта разница в энергетике радиолиний «вниз» и «вверх», необходимая для обеспечения функционирования сети, в числе прочих факторов зависит от качества частотно-территориального планирования сотовой радиосети (от уровней внутрисетевых помех) и может быть уменьшена за счет увеличения объема используемого сетью радиочастотного ресурса, развития инфраструктуры и оптимизации частотно-территориальной структуры сети.

На рис. 5 приведены зависимости суммарной интенсивности ЭМФ от доверительной вероятности  $p$  при  $\Delta_{eBM} = 100$  (20 дБ) и средней ЭМН на территорию, создаваемой АС,  $L_{TMS} = 10^{-4} \text{ Вт/м}^2$ , для различных уровней локального превышения  $D_L = L_{TMSL}/L_{TMS}$  средней ЭМН на территорию, создаваемой АС в окрестности точки наблюдения, по сравнению со средней ЭМН на территорию, создаваемой АС:  $D_L = 0$  дБ ( $L_{TMSL} = L_{TMS}$ , кривая 1),  $D_L = 5$  дБ ( $L_{TMSL} = 3,16 L_{TMS}$ , кривая 2),  $D_L = 10$  дБ ( $L_{TMSL} = 10 L_{TMS}$ , кривая 3),  $D_L = 15$  дБ ( $L_{TMSL} = 31,6 L_{TMS}$ , кривая 4),  $D_L = 20$  дБ ( $L_{TMSL} = 100 L_{TMS}$ , кривая 5); горизонтальная прямая 6 соответствует ПДУ ЭМП.

На рис. 6 приведены зависимости суммарной интенсивности ЭМФ от средней ЭМН на территорию, создаваемой АС, при  $p = 0,01$  и  $\Delta_{eBM} = 100$  (20 дБ) для различных уровней локального превышения  $D_L$  средней ЭМН на территорию, создаваемой АС в окрестности точки наблюдения, по сравнению со средней ЭМН на территорию, создаваемой АС:  $D_L = 0$  дБ

(кривая 1),  $D_L = 5$  дБ (кривая 2),  $D_L = 10$  дБ (кривая 3),  $D_L = 15$  дБ (кривая 4),  $D_L = 20$  дБ (кривая 5); горизонтальная прямая 6 соответствует ПДУ ЭМП.

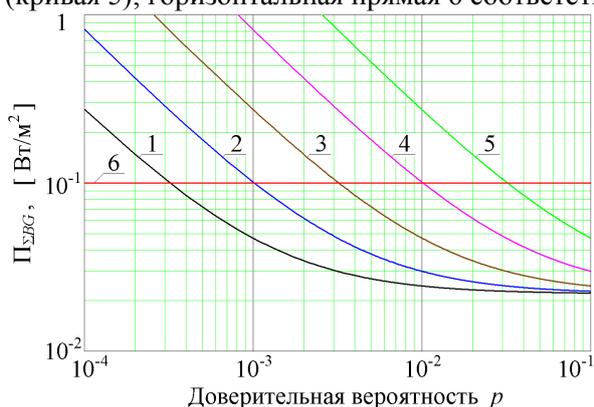


Рис. 5. Зависимости суммарной интенсивности ЭМФ от доверительной вероятности  $p$  при  $\Delta_{eBM} = 20$  дБ и  $L_{TMS} = 10^{-4}$  Вт/м², для различных уровней  $D_L$  локального превышения в окрестности точки наблюдения средней ЭМН на территорию, создаваемой АС

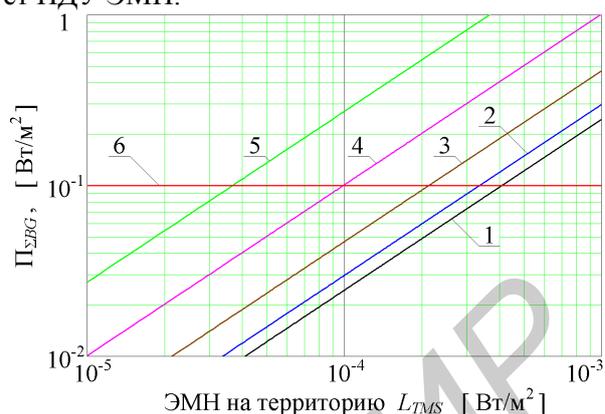


Рис. 6. Зависимости суммарной интенсивности ЭМФ от средней ЭМН на территорию, создаваемой АС, при  $p = 0.01$  и  $\Delta_{eBM} = 20$  дБ для различных уровней  $D_L$  локального превышения в окрестности точки наблюдения средней ЭМН на территорию, создаваемой АС

Локальное превышение  $D_L$  средней ЭМН на территорию, создаваемой АС в окрестности точки наблюдения, до уровня  $L_{TMSL}$  по сравнению со средней ЭМН на территорию  $L_{TMS}$ , создаваемой АС в зоне обслуживания сети, может создаваться на локальных малоразмерных объектах (в общественном транспорте, в местах розничной торговли, на массовых мероприятиях и т.п.). Как следует из рис. 5, 6, в таких местах влияние ЭМП АС на совокупную интенсивность ЭМФ существенно возрастает, и может оказаться преобладающим.

Из данных рис. 5, 6 следует, что в пешеходных зонах, для которых средняя ЭМН на территорию составляет  $(1...4) \cdot 10^{-4}$  Вт/м², при принятых критериях защиты населения (ПДУ  $0,1$  Вт/м²,  $p = 10^{-2}$ ) любое локальное превышение  $D_L$  средней ЭМН на территорию, создаваемой АС (т.е. любое скопление людей), представляет опасность, поскольку при этом суммарный уровень ЭМФ оказывается соизмеримым с ПДУ либо превышающим его.

### Заключение

Полученные оценки, иллюстрируемые кривыми на рис. 1–6, вполне соответствуют реальным уровням вынужденных экологических рисков, связанных с массовым использованием сотовой связи на густонаселенных территориях. В частности, эти оценки хорошо согласуются с экспериментальными результатами [14], определяющими суммарную интенсивность ЭМФ, образуемого системами сотовой связи на городской территории:

- на рис. 1 при  $L_{TMS} = 10^{-4}$  Вт/м² (этот уровень ЭМН в целом согласуется с известными данными [8, 12] для городской территории ( $\rho_{MS} = (1-2) \cdot 10^{-3}$  АС/м²,  $m_1(P_{eMS}) = 0,05-0,1$  Вт) и  $\Delta_{eBM} = 20$  дБ) для принятой в [13] доверительной вероятности  $p = 0,01$  точка на кривой 1 соответствует суммарной интенсивности ЭМФ  $P_{\Sigma BG} = 0,0244$  Вт/м²; горизонтальная прямая интенсивности ЭМФ, создаваемого БС, соответствует  $P_{\Sigma BS} = 0,0219$  Вт/м²;

- на рис. 2 для  $p = 0,01$  точка кривой 2, полученной при  $L_{TMS} = 10^{-5}$  Вт/м² (этот уровень ЭМН также в целом согласуется с известными данными [8, 12] ( $\rho_{MS} = (1-2) \cdot 10^{-4}$  АС/м²,  $m_1(P_{eMS}) = 0,05-0,1$  Вт) и  $\Delta_{eBM} = 20$  дБ), соответствует суммарной интенсивности ЭМФ  $P_{\Sigma BG} = 0,00244$  Вт/м² и ее слагаемому, создаваемому ЭМП БС,  $P_{\Sigma BS} = 0,00219$  Вт/м²;

- данные [14] о суммарной интенсивности ЭМФ, создаваемого радиоборудованием сотовой связи на городской территории, находятся в интервале  $0,004-0,015$  Вт/м²; т.е. внутри интервала  $0,00219-0,0244$  Вт/м², соответствующего приведенным расчетным данным.

Полученные результаты позволяют сформулировать ряд рекомендаций, направленных на повышение уровня электромагнитной безопасности населения. В частности, это касается ограничений (как в добровольном, так и в принудительном порядке) использования сотовой

связи в местах массового скопления народа, поскольку локальные выбросы средней ЭМН на территорию, создаваемой АС в этих местах, могут быть причиной соответствующего недопустимого локального увеличения интенсивности ЭМФ в этих местах; использования в сотовой сети минимально необходимого превышения ЭИИМ БС над ЭИИМ АС, поскольку избыточные уровни ЭИИМ БС оказывают определяющее влияние на совокупный уровень ЭМФ, создаваемого системами сотовой связи на территориях с высокой плотностью населения.

Изложенная методика оценки ЭМФ, создаваемого как стационарным (БС), так и мобильным (АС) радиооборудованием сотовых радиосетей, применима для сотовых радиосетей всех действующих и перспективных стандартов и поколений, и обеспечивает возможность существенного упрощения методики [13], используемой для оценки экологических рисков от использования сотовой связи и беспроводного широкополосного доступа на социально-значимых объектах.

## **ELECTROMAGNETIC BACKGROUND CREATED BY BASE AND MOBILE RADIO STATIONS OF CELLULAR COMMUNICATIONS**

V.I. MORDACHEV

### **Abstract**

The technique of an estimation of the electromagnetic background total intensity created by base and subscriber's radio stations of cellular communications, is offered. This technique is based on an estimation of the electromagnetic loading on territory in busyhours, created by this radio equipment. The technique is applicable for cellular radio networks of all standards and generations and ensures a capability of an estimation of forced ecological risks provided by cellular communications mass usage in places with high population density.

*Keywords:* radioelectronics conditions, electromagnetic capacity, electromagnetic ecology, electromagnetic security.

### **Список литературы**

1. *Мордачев В.И.* // Докл. БГУИР. 2012. № 6 (68). С. 116–123.
2. *Mordachev V.* // Proceedings of the 9<sup>th</sup> International Wireless Communications & Mobile Computing Conference IWCMC 2013, Cagliari, Sardinia, Italy, July 1–5 2013. P. 590–595.
3. *Мордачев В.И.* // Докл. БГУИР. 2012. № 7 (69). С. 25–33.
4. *Мордачев В.И.* // Докл. БГУИР. 2012. № 8 (70). С. 23–31.
5. СанПиН 2.2.4/2.1.8.9-36-2002. Электромагнитные излучения радиочастотного диапазона (ЭМИ РЧ).
6. Единые санитарно-эпидемиологические и гигиенические требования к товарам, подлежащим санитарно-эпидемиологическому надзору (контролю).
7. СанПиН 2.1.8/2.2.4.1190-03. Гигиенические требования к размещению и эксплуатации средств сухопутной подвижной радиосвязи.
8. Propagation data and prediction methods for the planning of short-range outdoor radiocommunication systems and radio local area networks in the frequency range 300 MHz to 100 GHz, Rec. ITU-R P.1411-8.
9. ETSI EN 300 910, V8.5.1 (2001-11). Digital Cellular Telecommunications System (Phase 2+). Radio Transmission and Reception (GSM 05.05 version 8.5.1 Release 1999).
10. *Prasad R., Mohr W., Konhauser W.* Third generation mobile mobile communication systems. Artech House, 2000.
11. Methodology for the calculation of IMT-2000 terrestrial spectrum requirements. Rec. ITU-R M.1390.
12. *Мордачев В.И.* Системная экология сотовой радиосвязи. Минск, 2009.
13. Оценка риска для здоровья населения от воздействия электромагнитных полей, создаваемых базовыми станциями сотовой подвижной электросвязи и широкополосного беспроводного доступа. Инструкция по применению. Минск, 2010.
14. *Ozdemir A.R., Alkan M., Gulsen M.* // IEEE EMC Magazine. 2014. № 3. P. 43–48.

УДК 621.785.532

## ВЕРОЯТНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СУБПРОЦЕССОВ В ТЛЕЮЩЕМ РАЗРЯДЕ

И.М. ПАСТУХ, Г.Н. СОКОЛОВА

*Хмельницкий национальный университет  
Институтская, 11, Хмельницкий, 29016, Украина**Поступила в редакцию 15 июня 2015*

Приведены аналитические выражения для расчета вероятностных характеристик наиболее весомых субпроцессов при азотировании в тлеющем разряде, полученные на основе результатов обработки экспериментальных данных.

*Ключевые слова:* тлеющий разряд, субпроцессы, вероятность.

### Введение

Модификация поверхности металлов с применением технологий, использующих для интенсификации процесса электрический разряд в газовой среде низкого давления, позволяет реализовать концепцию управляемости результатами обработки в зависимости от требований предстоящей эксплуатации. Однако на практике параметры модификации в тлеющем разряде (АТР) выбираются в основном, руководствуясь экспериментальной базой данных, полученных путем технологических проб, возможно даже оптимизированных по тем или иным критериям, однако мало приспособленной к автоматизированному проектированию параметров процесса и прогнозированию заданных конечных показателей модификации. Кроме того, метод технологических проб сравнительно дорогой, особенно в тех случаях, когда нужно оптимизировать режим обработки деталей, имеющих сложную форму, локальные исключения поверхности. Учитывая указанные недостатки традиционных методов, предложена модель [1], в которой главными факторами формирования падающего на деталь (катод) потока (ПП) являются элементарные субпроцессы в области катодного падения (ОКП) электрического разряда в газе (ЭРГ). Модель следует квалифицировать как мультипроцессную, то есть такую, в которой учитывается достаточно обширный круг субпроцессов в ОКП. Исследование более тонкого механизма АТР на основе подобной модели открывает путь к практическому использованию его дополнительных потенциальных возможностей.

Вероятность субпроцессов в ОКП характеризуется сечением, которое рассчитывается с помощью аналитических зависимостей. Несмотря на наличие в литературе значительного объема экспериментальных данных по этим характеристикам [2–9], в большинстве случаев они за небольшим исключением непригодны для применения в аналитических моделях. В некоторых случаях приведены формулы, однако они слишком сложны по методологии расчета или не всегда адекватно отображают экспериментальный материал, упрощенные же уравнения неточно учитывают индивидуальные особенности поведения отдельных компонентов газовой среды. Например, потенциал ионизации аргона больше, чем у азота, но сечение с ростом энергии увеличивается более стремительно и достигает больших значений в максимуме, а в универсальных зависимостях эти субпроцессы развивались бы параллельно [9].

Целью настоящей работы является обработка экспериментальных данных и получение аналитических зависимостей для расчета важнейшего показателя вероятности субпроцессов – сечения.

## Методика исследований

Имеющиеся экспериментальные данные [2–9], представленные, как правило, в виде графиков обрабатывались по условию минимизации суммы квадратов отклонений значений сечений, приведенных в источниках, от результатов расчета по предполагаемым аналитическим зависимостям. При этом контролировалось корреляционное отношение. Далее расчетные значения выборочно сопоставлялись в реальном диапазоне аргументов с контрольными значениями в литературных источниках. При этом с позиций практического применения полученных зависимостей ориентировались на модификацию поверхности металлов, в частности – азотирование в тлеющем разряде.

## Результаты исследований

1. *Ударная ионизация.* Экспериментальные данные зависимости сечения ударной ионизации  $\sigma_{иу}$  ( $\text{м}^2$ ) от энергетических характеристик активных частиц (в области типичных для АТР значений) [3, с. 60; 8, с. 201] могут быть отображены в виде

$$\sigma_{иу} = a \cdot 10^{-26} (V - V_I) \cdot \exp\left(-b \left(\frac{V - V_I}{10^6}\right)^c\right),$$

где  $V$  – скорость электрона, м/с;  $V_I$  – скорость электрона, соответствующая потенциалу ионизации; для компонентов газовой среды, реально применяемых в АТР, она имеет значения: молекулярный азот –  $V_I = 2,343 \cdot 10^6$  м/с, аргон –  $V_I = 2,358 \cdot 10^6$  м/с, молекулярный водород –  $V_I = 2,327 \cdot 10^6$  м/с, атомарный азот –  $V_I = 2,259 \cdot 10^6$  м/с, атомарный водород –  $V_I = 2,187 \cdot 10^6$  м/с;  $a$ ,  $b$ ,  $c$  – числовые коэффициенты, значения которых приведены в табл. 1 (единицы измерения, согласующие размерность результата, для компактности не приводятся).

Таблица 1. Коэффициенты для расчета сечения ударной ионизации

Компонент	Источник, пределы энергии	Уравнение	$a$	$b$	$c$
Азот молекулярный $\text{N}_2$	[8, с. 201], $\epsilon \leq 1150$ eV	Точное	1,692	0,185	1,082
		Упрощенное	1,95	0,2	1,1
Аргон атомарный Ar	[8, с. 201], $\epsilon \leq 1200$ eV	Точное	7,999	1,164	0,519
		Упрощенное	6,6	1	0,555
Азот молекулярный $\text{N}_2$	[3, с. 60], $\epsilon \leq 200$ eV	Точное	1,471	0,085	1,498
		Упрощенное	1,5	0,085	1,5
Аргон атомарный Ar	[3, с. 60], $\epsilon \leq 200$ eV	Точное	4,065	0,477	0,83
		Упрощенное	4	0,5	0,8
Водород молекулярный $\text{H}_2$	[3, с. 60], $\epsilon \leq 200$ eV	Точное	1,142	0,409	0,972
		Упрощенное	1,2	0,4	1
Водород молекулярный $\text{H}_2$	[3, с. 60], $\epsilon \leq 750$ eV	Точное	1,988	0,877	0,644
		Упрощенное	2	0,85	0,667
Азот молекулярный $\text{N}_2$	[3, с. 60], $\epsilon \leq 750$ eV	Точное	1,799	0,245	0,976
		Упрощенное	2	0,25	1
Азот атомарный N	[9, с. 181], $\epsilon \leq 270$ eV	Точное	0,77301	34	10
Водород атомарный H	[9, с. 181], $\epsilon \leq 270$ eV	Точное	0,8787	9,3	2,5

Сечение ударной ионизации атомарных компонентов может быть рассчитано с учетом методики, изложенной в [9], по формуле:  $\sigma_{иу} = a \cdot 10^{-20} \left(\frac{V^2 - V_I^2}{V^2}\right)^{1,5} \cdot \frac{b}{(V^2 - V_I^2)/V_I^2 + c}$ .

2. *Ступенчатая ионизация.* Сечение ступенчатой ионизации ( $\text{м}^2$ ) [3, с. 67] определяется по формуле:  $\sigma_{ис} = a_c \cdot 10^{-20} (2,843 \cdot 10^{-12} \cdot V^2 - b_c)$ , где  $a_c$ ,  $b_c$  – числовые коэффициенты, значения которых приведены в табл. 2.

Таблица 2. Коэффициенты для расчета сечения ступенчатой ионизации

Компонент	$a_c$	$b_c$
Аргон Ar	0,2	11,5
Водород $\text{H}_2$	0,076	8,7
Азот $\text{N}_2$	0,085	6,2

3. *Рекомбинация.* Отмечается [2–4, 6, 9], что при концентрации частиц в газовой среде  $n < 10^{13} \text{ см}^3$  преобладают процессы радиационной рекомбинации, при больших концентрациях порядка  $n > 10^{17} \text{ см}^3$  основной становится ударная рекомбинация. Диссоциативная рекомбинация играет существенную роль в низкотемпературной молекулярной плазме. Фоторекомбинация имеет значение, если отсутствуют другие двухчастичные процессы, при малой концентрации электронов, не способствующей более-менее заметной тройной рекомбинации. Для определения типа рекомбинационных явлений рассмотрим состояние ионизированной газовой среды с параметрами, характерными для АТР. При давлении  $p = 1 \text{ торр}$  и температуре  $T = 500 \text{ }^\circ\text{C} = 773 \text{ }^\circ\text{K}$  концентрация частиц в газе определится по формуле  $n = 9,658 \cdot 10^{18} p/T = 1,25 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}$ .

Плотность электронного тока на анодной границе ОКП:  $j_{ec} = q_e n_{e\delta} V_{se\delta}$ , где  $q_e$  – заряд электрона,  $q_e = 1,6022 \cdot 10^{-19} \text{ А}\cdot\text{с}$ ;  $n_{e\delta}$  – концентрация электронов на анодной границе ОКП;  $V_{se\delta}$  – скорость дрейфа электронов под воздействием поля на анодной границе ОКП.

Максимальная плотность тока в экспериментах с реальным АТР составляла  $j_{ec} = 140 \text{ А/м}^2$ , номинальные же значения плотности тока в типичных процессах модификации находятся в пределах  $j_{ec} = 10 - 20 \text{ А/м}^2$ .

Подвижность электронов на анодной границе ОКП:  $\mu_{e\delta} = q_e / m_e \bar{V}_e C_p p \sigma_{vce}$ , где  $m_e$  – масса электрона,  $m_e = 9,109 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$ ;  $\bar{V}_e$  – средняя скорость электрона на анодной границе ОКП, где энергия электронов стабилизируется и соответствует их энергии в положительном столбе  $E_{пс} = 1-2 \text{ эВ}$  [3, с. 359], а средняя скорость имеет значение порядка  $\bar{V}_e = 0,839 \cdot 10^6 \text{ м/с}$ ;  $C_p$  – константа концентрации компонента, при постоянной Больцмана  $k = 1,381 \cdot 10^{23} \text{ Дж/к}$  и типичной температуре газовой среды  $T = 773 \text{ К}$  константа концентрации компонента  $C_p = 9,368 \cdot 10^{19} \text{ с}^2/\text{кг}\cdot\text{м}^2$ ,  $\sigma_{vce}$  – сечение столкновений электронов с частицами газа, в газовой среде с преобладанием молекулярного азота  $\sigma_{vce} = 11,32 \cdot 10^{-20} \text{ м}^2$ .

Таким образом, подвижность электронов при выбранных условиях  $\mu_{e\delta} = 209,8 \text{ м}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ . Напряженность поля в положительном столбе  $E_{пс} \approx -1,5 \text{ В/см} = 100-150 \text{ В/м}$  [7]; приняв напряженность поля на анодной границе ОКП равной  $E(\delta) = 100 \text{ В/м}$ , скорость дрейфа электронов в поле  $V_{se\delta} = \mu_{e\delta} E(\delta) = 2,098 \cdot 10^4 \text{ м/с}$ . Тогда концентрация электронов на границе ОКП при плотности тока  $j_{ec} = 10-20 \text{ А/м}^2$ :  $n_e = j_{ec\delta} / q_e V_{se\delta} = (0,0297-0,0595) \cdot 10^{17} \text{ м}^{-3}$ , а степень ионизации  $\alpha = (2,38-4,76) \cdot 10^{-7}$ . Неуравновешенной газоразрядной плазмой считается слабоионизованный газ при степени ионизации  $\alpha = 10^{-8}-10^{-6}$  [2, с. 72]. Обычная температура электронов при этом порядка 1 эВ, что соответствует принятым выше условиям, со значительным отрывом температуры электронов от температуры газа. При столь низкой степени ионизации основной вид рекомбинации – ударная, так как для фоторекомбинации, когда столкновения должны происходить с периодом не меньше времени гашения возбуждения или для тройной рекомбинации условий нет.

4. *Ударная рекомбинация.* Справочные материалы, касающиеся ударной рекомбинации, используют в качестве основного показателя коэффициент ударной рекомбинации  $\beta$ . Примененная в этой работе методика базируется на однотипном показателе, характеризующем вероятность тех или других субпроцессов – их сечения. Для перехода от коэффициента ударной рекомбинации к сечению учтем, что изменение количества электронов в слое в результате ударной рекомбинации  $dz_{ep}$  может определяться как через сечение, так и через коэффициент рекомбинации, исходя из того, что скорость изменения количества электронов в

результате рекомбинации составляет:  $\frac{dn_{ep}}{dt} = -\beta n_e n_+$ , где  $n_e$ ,  $n_+$  – соответственно

концентрации электронов и положительных ионов:  $dz_{ep} = -n_+ n_e (\bar{V}_e)^2 \sigma_{yp} s \cdot dt = -\beta n_+ n_e V_{se} s \cdot dt$ ,  $\sigma_{yp}$  – сечение ударной рекомбинации ( $\text{м}^2$ );  $s$  – единичная площадь основы объема, в котором проходит рекомбинация.

Таким образом, сечение ударной рекомбинации может определяться через ее коэффициент  $\sigma_{yp} = \beta / \bar{V}_e$ .

Известны справочные материалы [5, с. 270], в которых оперируют не коэффициентом ударной рекомбинации, а его отношением к концентрации электронов как функцией энергии электронов  $K_{\beta ne} = \beta/n_e$  (м<sup>6</sup>/с).

Обработка материалов из упомянутых источников дает следующие уравнения для определения отношения коэффициента ударной рекомбинации к концентрации электронов (следует применять точные значения коэффициентов):

$$\text{– для азота: } K_{\beta ne} = 10^{-33} \left( 0,5 - 0,49442973 \left( V \cdot 10^{-6} - 0,174 \right)^{0,01528712} \right);$$

$$\text{– для аргона: } K_{\beta ne} = 10^{-33} \left( 0,5 - 0,494152632 \left( V \cdot 10^{-6} - 0,174 \right)^{0,01502406} \right).$$

5. *Рекомбинация атомарных ионов.* В плазме умеренной и низкой плотности превалирует двухчастичная рекомбинация [9, с. 123], для которой в соответствии с приведенной там же методикой рассчитывается скорость диэлектронной рекомбинации (м<sup>3</sup>/с):

$$x_d = 10^{-19} \cdot A_d \cdot \left( \frac{124,454}{T_e} \right)^{1,5} \cdot \exp \left( -\frac{124,454}{T} \cdot b_d \right) = \bar{V}_e \sigma_{др},$$

где  $A_d$ ,  $b_d$  – коэффициенты, которые для атомарного азота соответственно равны 20 и 0,19, для атомарного водорода – 36,7 и 0,72 [9, с. 238–239];  $T_e$  – температура электронов в энергетических единицах измерения (эВ):  $T_e = 2,8428 \cdot 10^{-12} (\bar{V}_e)^2$ ,  $\sigma_{др}$  – сечение диэлектронной рекомбинации, м<sup>2</sup>.

Расчеты показывают, что в диапазоне реально возможных при АТР скоростей электронов  $(2\text{--}6) \cdot 10^6$  м/с сечение диэлектронной рекомбинации атомарных ионов на 6–12 порядков меньше сечений ионизации этих же компонентов, потому для упрощения эти элементарные процессы допустимо не учитывать.

6. *Диссоциативная рекомбинация.* Диссоциативная рекомбинация характерна, в первую очередь, для молекулярного азота и проходит по схеме  $e + M^+ = A + A$  ( $M^+$  – положительный молекулярный ион,  $A$  – компонент в атомарном состоянии). Коэффициент диссоциативной рекомбинации слабо уменьшается с ростом энергии электронов, поэтому можно принять его при энергии электронов  $\varepsilon = 1$  эВ равным  $\beta_{др} = 1,6 \cdot 10^{-19}$  м<sup>3</sup>/с [2, с. 152]. Тогда при скорости электронов в диапазоне  $(0,5931\text{--}5) \cdot 10^6$  м/с, что соответствует их энергии 1–70 эВ, сечение диссоциативной рекомбинации  $\sigma_{др} = (2,7\text{--}0,32) \cdot 10^{-25}$  м<sup>2</sup>, которое, таким образом, на 5 порядков меньше сечения ударной ионизации. Это дополнение допускает в первом приближении не учитывать диссоциативную рекомбинацию как составляющую баланса заряженных частиц, однако в последующем при более точных расчетах подобное упрощение желательно не применять.

7. *Диссоциация молекул электронным ударом.* Сечение диссоциации электронным ударом (м<sup>2</sup>) в зависимости от скорости электрона на основе экспериментальных данных [3, с. 76] моделируется уравнениями: для молекулярного азота N<sub>2</sub>, точная формула:

$$\sigma_{деу} = 1,8325 \cdot 10^{-20} \left( V \cdot 10^{-6} - 1,7574 \right)^3 \cdot \exp \left( -1,1068 \left( V \cdot 10^{-6} - 1,7574 \right) \right);$$

$$\text{– упрощенная формула: } \sigma_{деу} = 1,85 \cdot 10^{-20} \left( V \cdot 10^{-6} - 1,7574 \right)^3 \cdot \exp \left( -1,1 \left( V \cdot 10^{-6} - 1,7574 \right) \right);$$

– для молекулярного водорода, точная зависимость:

$$\sigma_{деу} = 2,0436 \cdot 10^{-20} \left( V \cdot 10^{-6} - 1,6776 \right) \cdot \exp \left( -0,9272 \left( V \cdot 10^{-6} - 1,6776 \right)^{1,32998} \right);$$

упрощенная формула:

$$\sigma_{деу} = 2,15 \cdot 10^{-20} \left( V \cdot 10^{-6} - 1,6776 \right) \cdot \exp \left( -0,9 \left( V \cdot 10^{-6} - 1,6776 \right)^{1,35} \right).$$

8. *Резонансная перезарядка.* Сечение резонансной перезарядки может определяться по формуле [3, с. 49]:

$$\sigma_{pn} = \pi a^2 \frac{I_H}{I} \ln^2 \left( \frac{100V_0}{V_+} \sqrt{\frac{I_H}{I}} \right), \quad (1)$$

где  $V_0$  – скорость электрона на первой боровский орбите,  $V_0 = 2,19 \cdot 10^6$  м/с;  $\pi a^2$  – площадь первой боровской орбиты,  $\pi a^2 = 0,88 \cdot 10^{-20}$  м<sup>2</sup>;  $I_H$  – потенциал ионизации атомарного водорода,  $I_H = 13,6$  эВ;  $I$  – потенциал ионизации компонента (для атомарного аргона – 15,8 эВ, для атомарного азота – 14,5 эВ, для молекулярного азота – 15,6 эВ, для молекулярного водорода – 15,4 эВ);  $V_+$  – скорость иона, которая определяется через его энергию  $V_+ = K_{VE}(\varepsilon)^{0,5}$  при числовом коэффициенте  $K_{VE}$  в м/с: для аргона –  $2,195 \cdot 10^3$ , для молекулярного азота –  $2,622 \cdot 10^3$ , для атомарного азота –  $3,708 \cdot 10^3$ , для молекулярного водорода –  $9,78 \cdot 10^3$  и для атомарного водорода –  $13,83 \cdot 10^3$ .

В указанном источнике отмечается, что расчет по формуле (1) может давать относительно большое отклонение от действительных значений сечения (порядка 50 %). В [6, с. 219] приведены несколько другие значения, которые при энергиях порядка до 10 эВ отличаются от рассчитанных по формуле (1) примерно в такой же мере. Сведение данных из разных источников, в том числе – использование значений асимптот [3, с. 47] в качестве базовых точек привязки зависимостей, приводит к формуле общего вида, по которой с учетом коэффициентов, приведенных в табл. 3, определяется сечение резонансной перезарядки ионов на собственных атомах или молекулах соответственно в м<sup>2</sup>:  $\sigma_{pn} = a_{pn} V_+^{-b_{pn}} \cdot 10^{-20}$ .

9. Упругие столкновения электронов с частицами газа. Сечение упругих столкновений (рассеивание электронов нейтральными атомами) на основе материалов, которые приведены в [3, 8], зависит от сорта газа и скорости электронов. Характер зависимостей почти для всех газов имеет вид функции с относительно узким, но стремительным экстремумом, который в дальнейшем переходит в участок незначительного влияния энергии электрона вплоть до потенциала ионизации.

Таблица 3. Коэффициенты для определения сечения резонансной перезарядки

Компонент газовой среды	Точное уравнение		Упрощенная зависимость	
	$a_{pn}$	$b_{pn}$	$a_{pn}$	$b_{pn}$
Аргон атомарный Ar	190,3891	0,1769	190	0,18
Водород атомарный H	384,5755	0,2314	395	0,24
Азот атомарный N	210,1672	0,1827	200	0,18
Азот молекулярный N <sub>2</sub>	213,9094	0,1868	215	0,19
Водород молекулярный H <sub>2</sub>	272,5858	0,2124	255	0,21

Аналитически эти зависимости имеют вид (сечение определяется в м<sup>2</sup>):

$$- \text{ для молекулярного азота: } \sigma_{ceN_2} = \left( 6 + 38 \cdot (\bar{V}_e \cdot 10^{-6} - 0,08) \cdot \exp(-0,95 \bar{V}_e \cdot 10^{-6}) \right) \cdot 10^{-20},$$

$$- \text{ для аргона: } \sigma_{ceAr} = \left( 4 + 11,845 \cdot \bar{V}_e \cdot 10^{-6} \cdot \exp(-0,093(\bar{V}_e \cdot 10^{-6})^{2,293}) \right) \cdot 10^{-20},$$

- для молекулярного водорода:

$$\sigma_{ceH_2} = \left( 4,528 + 11,056 \cdot (\bar{V}_e \cdot 10^{-6} + 0,6) \cdot \exp(-0,105(\bar{V}_e \cdot 10^{-6} + 0,6)^{3,621}) \right) \cdot 10^{-20}.$$

Для сложных газовых сред оперируют приведенным сечением упругих столкновений:

$$\sigma_{vce} = \sum_1^i K_{pWi} \cdot \sigma_{ceWi}, \quad \text{где } \sigma_{ceWi} - \text{ сечение упругих столкновений электрона с частицами}$$

произвольного компонента;  $K_{pWi}$  – коэффициент объемной доли компонента в газовой среде;  $i$  – количество компонентов в газовой среде.

Относительно других субпроцессов следует отметить, что неупругие столкновения ионов с атомами и молекулами, которые приводили бы к их возбуждению и ионизации, сколь-нибудь существенной роли не играют, поскольку для этого ион должен иметь скорость порядка скорости электрона на первой орбите ( $\sim 10^6$  м/с). Но подобные значения скорости соответствуют энергии в несколько десятков–сотен килоэлектронвольт, что в исследуемых технологиях невозможно. Кроме того, известно, что электрону пройти область неупругих

потерь значительно проще, поскольку сечение возбуждения по порядку величин  $\sim 10^{-21} \text{ м}^2$  – намного меньше сечения упругих столкновений ( $\sim 10^{-19} \text{ м}^2$ ). Столкновения типа электрон-электрон, электрон-ион в зависимости от температуры и других условий более-менее заметны при степени ионизации  $10^{-4}$ – $10^{-2}$ . При реальной отмеченной выше степени ионизации столкновения заряженных частиц существенной роли также не играют. Для образования негативных ионов необходимо иметь в газовой среде кислород, что уже по самому принципу технологического процесса АТР недопустимо, чем и объясняется наличие устройств удаления кислорода и влаги в системе подготовки газовой смеси.

### Заключение

Проведенный анализ позволяет определить весомость каждого из субпроцессов, характерных для азотирования в тлеющем разряде, и, таким образом, сформировать модель управляемости модификацией поверхности металлов с учетом, прежде всего, условий и требований предстоящей эксплуатации.

Полученные аналитические выражения в первую очередь могут быть применены в программном обеспечении систем управления процессом азотирования, причем – с обеспечением возможности оптимизации технологических режимов.

На основе представленного материала в инженерной и научной практике рассчитываются критерии, характеризующие формирование фазовой структуры поверхностных слоев металлов, модифицированных азотированием в тлеющем разряде.

## PROBABILISTIC CHARACTERISTICS OF SUBPROCESSES IN A GLOW DISCHARGE

I.M. PASTUKH, G.N. SOKOLOVA

### Abstract

As a result of analyzing experimental data, analytical expressions were developed for calculating the probabilistic characteristics of the most tangible subprocesses during nitriding in a glow discharge.

*Keywords:* glow discharge, subprocess, probability.

### Список литературы

1. *Пастух И.М.* Теория и практика безводородного азотирования в тлеющем разряде. Харьков, 2006.
2. *Райзер Ю.П.* Основы современной физики газоразрядных процессов. М., 1980.
3. *Райзер Ю.П.* Физика газового разряда. М., 1987.
4. *Биберман Л.М., Воробьев В.С., Якубов И.Т.* Кинетика неравновесной низкотемпературной плазмы. М., 1982.
5. *Смирнов Б.М.* Ионы и возбужденные атомы в плазме. М., 1974.
6. *Смирнов Б.М.* Введение в физику плазмы. М., 1982.
7. *Смирнов Б.М.* Физика слабоионизированного газа. М., 1978.
8. *Мирдель Г.* Электрофизика. М., 1972.
9. *Вайнштейн Л.А., Собельман И.И., Юков Е.А.* Возбуждение атомов и уширение спектральных линий. М., 1979.

УДК 621.391

## ФОРМИРОВАНИЕ ЭТАЛОНОВ В УСТРОЙСТВЕ РАСПОЗНАВАНИЯ ДВИЖУЩИХСЯ НАЗЕМНЫХ ОБЪЕКТОВ

В.В. СИВЦЕВИЧ, А.Е. ВИНОГРАДОВ

ГУО «Институт пограничной службы Республики Беларусь»  
Калиновского 4, Минск, 220103, Беларусь

Поступила в редакцию 30 июня 2015

Для решения задач обнаружения и распознавания движущихся наземных объектов сейсмическими средствами охраны требуется формирование эталонов, соответствующих классам объектов. Неопределенность момента прихода сейсмической волны в точку приема и параметров сейсмического сигнала требует построения многоканальной схемы формирователя опорных (эталонных) сигналов.

*Ключевые слова:* корреляционная обработка, сейсмический сигнал, эталон.

### Введение

Одним из направлений развития технических средств охраны границы является применение сложных алгоритмов обработки сигналов, позволяющих повысить информативность средств охранной сигнализации. Такая возможность обусловлена бурным развитием микропроцессорной техники [1]. В настоящее время особый интерес представляет разработка устройств распознавания движущихся наземных объектов по их сейсмическим портретам, на основе корреляционной обработки.

Определенную сложность вызывает вопрос создания эталонов, используемых в качестве опорных сигналов в корреляционных схемах каналов устройства распознавания движущихся наземных объектов.

### Постановка задачи

Рассмотрим устройство распознавания [2] движущихся наземных объектов с корреляционной обработкой сейсмического сигнала (рис. 1).

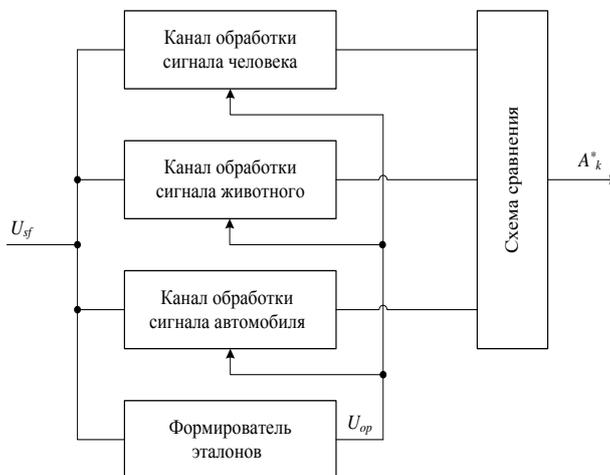


Рис. 1. Структурная схема устройства распознавания

На вход устройства поступает сигнал  $U_{sf}$ , состоящий из смеси полезных и фоновых компонент, в процессе обработки формируется решение о классе объекта  $A^*_k$ . Могут быть приняты решения  $A^*_1=1$ , если входной сигнал в наибольшей степени соответствует эталонному сигналу шагов человека,  $A^*_2=1$ , при соответствии эталонному сигналу шагов крупного животного и  $A^*_3=1$  для сигнала, вызванного движением автомобиля. При недостаточном соответствии сигнала эталону принимается решение  $A^*_k=0$ .

Для оценки степени соответствия  $N$ -элементной дискретной выборки слабых сейсмических сигналов на фоне помех  $U_{sf}$  эталону полезного сигнала  $U_{op}$  может применяться корреляционная обработка [2]. Тогда в качестве опорного сигнала коррелятора используется выборка эталонного сигнала длиной  $N$  элементов, а для принятия решения выбирается наибольшее значение коэффициента корреляции [3].

Полезная составляющая принятого сейсмического сигнала [4] может быть описана выражением:

$$u_{sf_n} = E\varepsilon_{g_n} \sin(\omega_v n T_d + \varphi_{v0}), \quad (1)$$

где  $E$  – амплитуда полезной составляющей принятого сейсмического сигнала;  $\varepsilon_{g_n}$  – уровень текущего отсчета огибающей сейсмического волнового пакета;  $\omega_v = 2\pi f_v$  – преобладающая циклическая частота полезной составляющей принятого сейсмического сигнала;  $\varphi_{v0}$  – начальная фаза полезной составляющей принятого сейсмического сигнала на преобладающей частоте;  $T_d = \frac{1}{f_d}$  – период дискретизации.

Опорный сигнал коррелятора описывается выражением:

$$u_{op_n} = \varepsilon_{g_n} \sin(\omega_{op} n T_d + \varphi_{op0}), \quad (2)$$

где  $\omega_{op} = 2\pi f_{op}$  – циклическая частота опорного сигнала;  $\varphi_{op0}$  – начальная фаза опорного сигнала.

По результатам экспериментальных и теоретических исследований [5, 6] будем полагать известными функции  $\varepsilon_{g_n}$ , описывающие законы изменения огибающих принятых и опорных сигналов во временной области для различных классов наземных объектов. Неизвестными параметрами будем считать задержку начала волновых пакетов относительно начала выборки  $\Delta t_d$  и временной интервал между волновыми пакетами  $\Delta t_p$  (рис. 2).

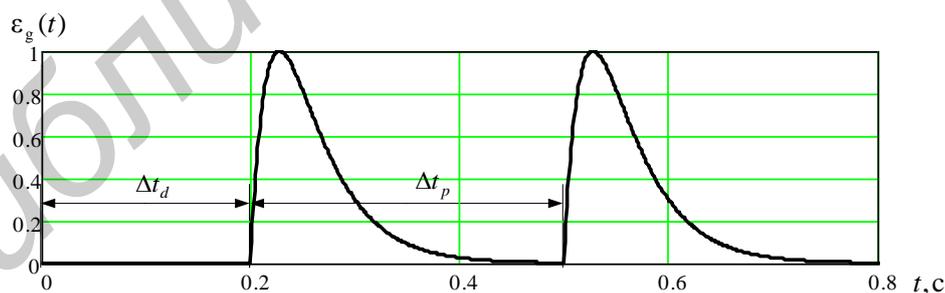


Рис. 2. Временные параметры опорного сигнала

Необходимо синтезировать структуру многоканального устройства корреляционной обработки принятого сейсмического сигнала, обосновать выбор опорных (эталонных) сигналов в каналах обработки устройства распознавания.

### Одноканальная корреляционная обработка

В одноканальном корреляторе обработка принятого сейсмического сигнала осуществляется согласно выражению

$$\begin{aligned}
u_n &= E\varepsilon_{g_n} \sin(2\pi f_v nT_d + \varphi_{v0}) \varepsilon_{g_n} \sin(2\pi f_{op} nT_d + \varphi_{op0}) = \\
&= \frac{E\varepsilon_{g_n}^2}{2} \left( \cos(2\pi nT_d (f_v - f_{op}) + \varphi_{v0} - \varphi_{op0}) - \cos(2\pi nT_d (f_v + f_{op}) + \varphi_{v0} + \varphi_{op0}) \right). \quad (3)
\end{aligned}$$

В работе [2] приведены схемы одноканального и двухканального квадратурного корреляционных обнаружителей, реализующих выражение (3). В качестве опорного сигнала в [4] предложено использовать экспоненциальную огибающую с заполнением колебаниями преобладающей частоты и без заполнения (рис. 3).

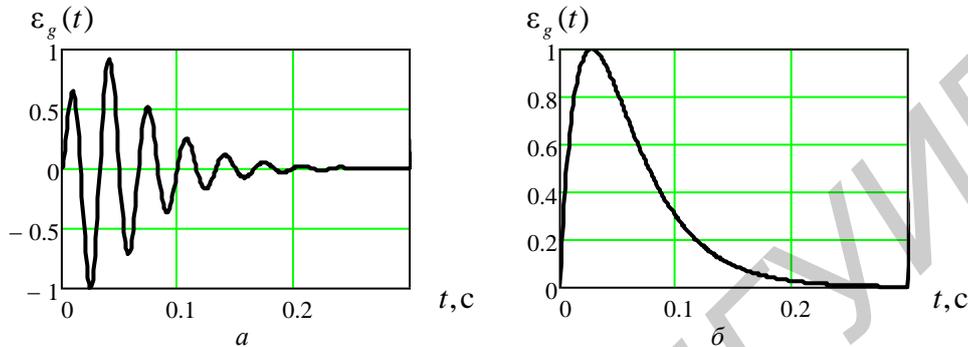


Рис. 3. Опорный сигнал: *a* – с заполнением; *б* – без заполнения

При совпадении частот и фаз принятого и опорного сигналов с заполнением отношение сигнал/фон увеличивается на 6–7 дБ, в том числе и за счет совпадения огибающих сигналов по временному положению. Рассогласование по частоте до  $\Delta f_v = \pm 5$  Гц или по фазе до  $\Delta \varphi_v = \pm \pi/4$  приводит к снижению выигрыша в отношении сигнал/шум до 3 дБ. Причем потери в отношении сигнал/фон возрастают с увеличением рассогласования.

### Многоканальная корреляционная обработка

При распространении сейсмических сигналов в грунте происходит изменение преобладающей частоты в зависимости от пройденного пути и условий распространения волны [5], что затрудняет использование опорного сигнала с известными и постоянными частотой заполнения и фазой. Реализация корреляционной схемы в условиях априорной неопределенности частоты и фазы принятого сигнала требует многоканальности структуры коррелятора по этим параметрам.

При использовании в качестве опорного сигнала огибающей волнового пакета человека или копытного животного без заполнения гармоническим колебанием в виде

$$\varepsilon_{g_n} = e^{-nT_d \tau} (1 - e^{-nT_d \tau}), \quad (4)$$

где  $\varepsilon_{g_n}$  – отсчет опорного сигнала в *n*-й момент времени из интервала наблюдения (0; *N*–1); *N* – длина выборки входного и опорного сигналов;  $T_d$  – период дискретизации;  $\tau$  – параметр длительности сигнала.

Отношение сигнал/фон увеличивается на 3–4 дБ, как показано в [4], за счет совпадения огибающих принятого и опорного сигналов по временному положению. Проигрыш в отношении сигнал/фон при использовании опорного сигнала без заполнения составляет 2–3 дБ. Снижение отношения сигнал/фон на эту величину приводит к незначительному уменьшению дальности обнаружения (распознавания) наземных объектов. Вместе с тем, существенно упрощается реализация алгоритма обработки в устройстве распознавания, так как требуется обеспечить многоканальность только по параметрам огибающей волнового пакета.

Алгоритм формирования опорного сигнала канала человека в виде последовательности из двух одинаковых экспоненциальных сигналов [6] и перебор с шагом  $\Delta$  смещения начального момента пары волновых пакетов от начала выборки, а также с шагом  $\delta$  допустимых значений интервала между одиночными сигналами описывается выражением:

$$\varepsilon_{g_{p,q,n}} = e^{-nT_{\Delta}p\delta\tau} \left( 1 - e^{-nT_{\Delta}p\delta\tau} \right) + \varepsilon_{g_{p,q,(n+q\Delta)}}, \quad (5)$$

где  $p, q$  – положительные целочисленные индексы, ограниченные длиной выборки и величиной шага  $\Delta$  и  $\delta$ .

Для сейсмического сигнала человека по данным экспериментальных исследований длительность  $\tau$  одного волнового пакета в среднем составляет 0,1–0,15 с, интервал между волновыми пакетами  $\Delta t_p = (0,3–0,6)$  с (рис. 4).

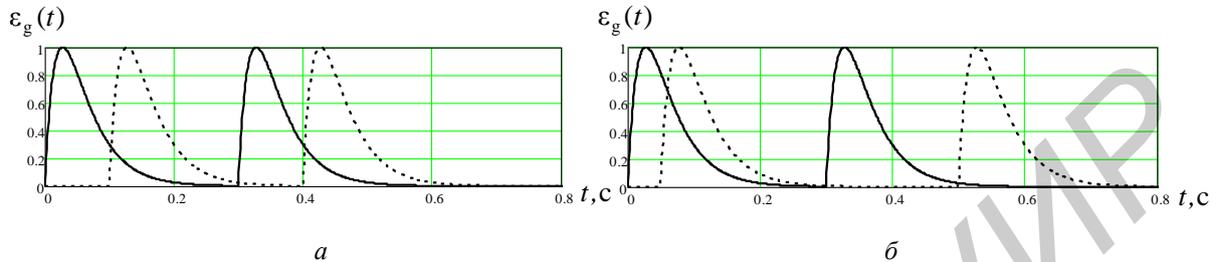


Рис. 4. Опорный сигнал канала распознавания человека с отличающимися параметрами смещения и интервала между волновыми пакетами: *a* – смещение 0,1 с, интервал 0,3 с; *б* – смещение 0,05 с, интервал 0,45 с

Для сигнала крупного копытного животного характерны длительность одиночного пакета  $\tau = (0,1–0,25)$  с, для мелкого копытного животного  $\tau = (0,05–0,15)$  с и интервал между пакетами  $\Delta t_p = (0,2–0,5)$  с, а также наличие пакетов от сдвоенных шагов передних и задних конечностей (рис. 5, 6).

$$\varepsilon_{g_{p,q,n}} = e^{-nT_{\Delta}p\delta\tau} \left( 1 - e^{-nT_{\Delta}p\delta\tau} \right) + \varepsilon_{g_{p,q,(n+q\Delta)}} + \varepsilon_{g_{p,q,(n+2q\Delta)}}. \quad (6)$$

При спокойном равномерном движении сигнал животного периодичен, как и человека. Однако, дикие животные часто движутся настороженно, делая несколько шагов и останавливаясь, поэтому при анализе целесообразно ограничиваться выборками длительностью 1–2 с.

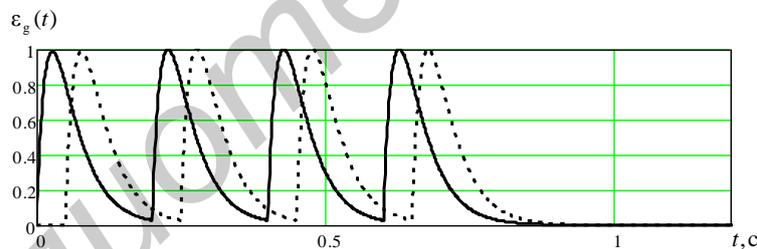


Рис. 5. Опорный сигнал канала распознавания животного со смещением 0,05 с и интервалом 0,2 с

Поскольку интервал между пакетами сигнала животного в среднем меньше, чем в сигнале человека, интервал в опорном сигнале канала животного выбирается примерно равным длительности волнового пакета.

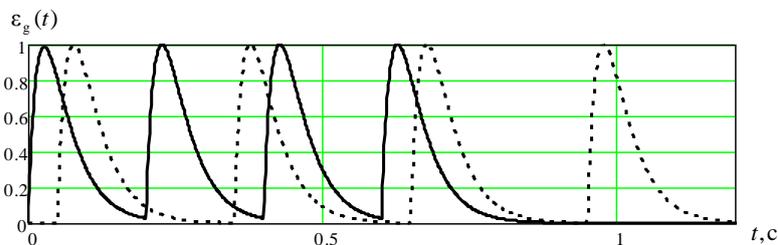


Рис. 6. Опорный сигнал канала распознавания животного со смещением 0,05 с и интервалом 0,3 с

Сейсмические сигналы транспортных средств характеризуются плавным нарастанием и спадом большого количества компонент различных частот. При движении транспортного средства по неровностям дороги сейсмический сигнал имеет существенно неравномерную

структуру, длительность нарастания и спада огибающей имеет порядок нескольких десятых секунды–единиц секунд. Для формирования опорного сигнала может быть применен единичный прямоугольный импульс вида

$$\varepsilon_{g_n}(\tau) = \begin{cases} 0, & n < \tau \\ 1, & n \geq \tau \end{cases} \quad (7)$$

однако при этом уровень первого бокового лепестка составляет -13 дБ, поэтому целесообразно использовать косинусно-квадратичное взвешивающее окно вида

$$\varepsilon_{g_n}(\tau) = \begin{cases} 0, & n < \tau \\ 1 - \cos^2 \frac{\pi(n-\tau)}{\tau}, & n \geq \tau \end{cases} \quad (8)$$

Длительность огибающей  $\tau$  выбирается существенно меньше интервала наблюдения и составляет 0,3–0,6 с (рис. 7).

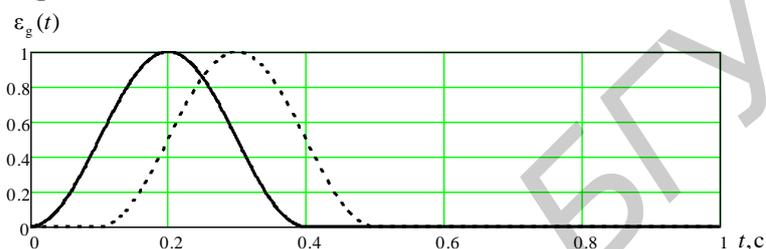


Рис. 7. Опорный сигнал транспортного средства с отличающимся параметром смещения

Эталонные сигналы в каналах распознавания рассчитываются в виде трехмерных матриц, содержащих векторы огибающих, отличающихся по строкам на величину шага смещения и по столбцам на величину шага интервала между волновыми пакетами (рис. 8).

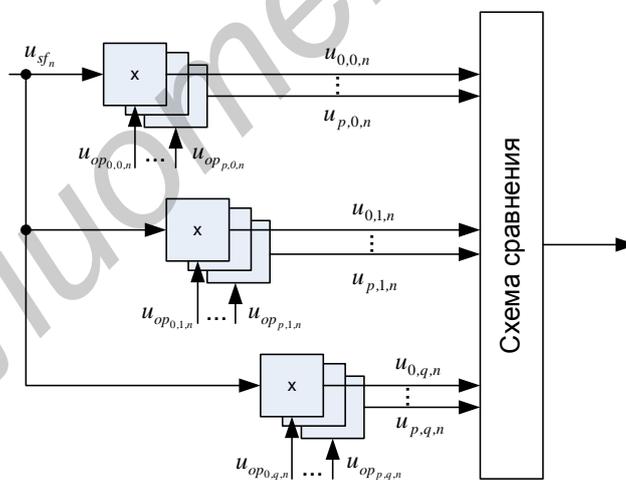


Рис. 8. Схема формирователя эталона в канале распознавания

Определение наиболее подходящего в интервале наблюдения эталона выполняется по максимальному значению его произведения на выборку входного сигнала путем последовательного перебора матрицы опорных сигналов по строкам и столбцам:

$$\text{opt}(u_{op}(p, q)) = \max \left( \sum_{n=1}^N |u_{sf_n} u_{op_n}(p, q)| \right), \quad (9)$$

где  $u_{op_n}(p, q) = \varepsilon_{g_{p,q,n}}$ .

Зафиксированные по условию (9) для каждого из классов векторы опорного сигнала используются в каналах устройства распознавания в качестве эталонов для текущей выборки принятого сигнала.

### **Заключение**

Таким образом, осуществлен синтез корреляционного устройства формирования эталонов для распознавания движущихся наземных объектов в классах человек, копытное животное, транспортное средство, на основе априорной, экспериментально полученной информации о формах и параметрах огибающих сейсмических сигналов. Устранение неопределенности времени задержки волновых пакетов относительно начала выборки  $\Delta t_d$  и интервала между волновыми пакетами  $\Delta t_p$  достигается многоканальностью схемы устройства распознавания по указанным параметрам.

## **FORMING OF THE MODEL SIGNAL IN DEVICE USED TO RECOGNITION OF GROUND MOVING OBJECTS**

V.V. SIUTSEVICH, A.E. VINOGRADOV

### **Abstract**

For detection and recognition of ground moving objects with seismic devices it's necessary to form the model of seismic signals, corresponding of each object class. Unknown moment of seismic wave incoming and it's time parameters demand to building of multichannel scheme etalon signals generator.

*Keywords:* correlation processing, seismic signal, model.

### **Список литературы**

1. *Звежинский С.С.* // Специальная техника. 2002. № 4. С. 36–41.
2. *Охрименко А.Е.* Основы радиолокации и радиоэлектронная борьба. Часть 1. Основы радиолокации. М., 1983.
3. *Ширман Я.Д.* Радиоэлектронные системы: основы построения и теория. Справочник. М., 1998.
4. *Кухальский Н.Е., Козека П.И.* // Докл. БГУИР. 2011. № 4 (58). С. 30–35.
5. *Варнавских В.А., Виноградов А.Е., Козека П.И. и др.* // Матер. III всеросс. научн. конф. ученых, специалистов и профессорско-преподавательского состава «Территориально распределенные системы охраны». Калининград, 2010. С. 58–66.
6. *Кухальский Н.Г., Виноградов А.Е.* Математическая модель движения человека // Докл. БГУИР. 2008. № 6. С. 25–31.

УДК 621.396.96

## ВЫБОР АЛГОРИТМА САМОНАСТРОЙКИ ДЛЯ АДАПТИВНОГО УСТРОЙСТВА КОГЕРЕНТНОГО НАКОПЛЕНИЯ ОТРАЖЕННОГО СИГНАЛА В ПРИЕМНОМ УСТРОЙСТВЕ РАДИОЛОКАТОРА ОБЗОРА

С.А. ГАБЕЦ, С.Ю. СЕДЫШЕВ

Военная академия Республики Беларусь  
Минск-57, 220057, Беларусь

Поступила в редакцию 16 ноября 2015

Представлены результаты анализа адаптивных алгоритмов различных классов для самонастройки адаптивного устройства когерентного накопления отраженного сигнала. Рассмотрены основные показатели их качества. Рассчитаны доверительные интервалы оценки коэффициента корреляции сигнала адаптивным решетчатым RLS-алгоритмом для различных длин выборки.

*Ключевые слова:* отраженный сигнал, адаптивный алгоритм, коэффициент корреляции, решетчатый фильтр.

### Введение

Корреляционные характеристики отраженного сигнала влияют на эффективность радиолокационного приемника на этапе междупериодной обработки [1, 2]. В существующих радиолокаторах применяются устройства когерентного и некогерентного накопления с фиксированными настройками, из-за чего, в общем случае, их потенциальная эффективность не достигается. Ухудшение эффективности накопителя с фиксированными параметрами связано с возможным различием корреляционных характеристик отраженного сигнала и настройками устройства, что, в свою очередь, приводит к уменьшению дальности обнаружения воздушного объекта до 25 % в зависимости от типа цели и погодных условий [2]. Задачу приближения показателей качества реального обнаружителя к потенциальным значениям возможно решить с помощью применения адаптивных к корреляционным свойствам сигнала алгоритмов обработки.

Решение задачи адаптивного накопления сигнала заключается в оценке его корреляционных свойств для вычисления оптимального времени когерентного накопления отраженного сигнала (КН ОС). Это позволяет управлять шириной полосы пропускания фильтра когерентного накопления (ФКН), максимизируя тем самым отношение сигнал/помеха (ОСП). Кроме того, адаптивный когерентный накопитель позволяет производить оценку частоты Доплера отраженного сигнала. Оставшееся время в рамках времени наблюдения отраженного сигнала (ОС) используется для его некогерентного накопления с целью оптимизации предпороговой статистики и получения наилучших характеристик обнаружения радиолокационного приемника [1, 2].

При выборе адаптивного алгоритма основным критерием является точность определения весовых коэффициентов фильтра когерентного накопления, так как ошибки самонастройки снижают эффективность радиолокационного обнаружителя в целом. Повысить точность адаптивных алгоритмов возможно за счет снижения скорости сходимости процесса адаптации [3, 4]. Вместе с этим снижение скорости сходимости процесса адаптации также приводит к снижению эффективности радиолокационного обнаружителя из-за ограниченности времени наблюдения цели.

Существуют разнообразные алгоритмы адаптации к корреляционным свойствам сигнала, что дает возможность разработчикам радиоэлектронной аппаратуры принимать компромиссные решения между вычислительной сложностью и эффективностью при их использовании. Необходимость адаптации следует из решения задачи оптимальной винеровской фильтрации, которая заключается в минимизации рабочей функции фильтра, реализованного с помощью линейного сумматора [3]. Это решение зависит от корреляционной матрицы вектора входных сигналов и вектора взаимной корреляции входного сигнала и требуемого отклика. На практике корреляционная матрица и вектор взаимной корреляции, как правило, неизвестны. Из вариантов их оценивания получают адаптивные алгоритмы.

Прообразами большинства адаптивных алгоритмов служат: алгоритм наискорейшего спуска, алгоритм Ньютона и алгоритм по критерию наименьших квадратов [3, 4]. По методу минимизации рабочей функции адаптивные алгоритмы можно разделить на три группы. Ярким представителем первой группы является алгоритм по критерию наименьшего среднего квадрата, или LMS-алгоритм (Least Mean Square), прообразом которого служит алгоритм наискорейшего спуска. Из второй группы (прообразы алгоритма Ньютона) выделяется нормализованный алгоритм по критерию наименьшего среднего квадрата, или NLMS-алгоритм (Normalized Least Mean Square). Алгоритм по критерию наименьшего среднего квадрата послужил началом развития рекурсивных адаптивных алгоритмов, одним из которых является рекурсивный алгоритм по критерию наименьших квадратов, основанный на минимизации среднеквадратического значения ошибок между полезным откликом и выходным сигналом адаптивного линейного сумматора – RLS-алгоритм (Recursive Least Square). Среди RLS-алгоритмов стоит выделить класс быстрых лестничных RLS-алгоритмов. Эти алгоритмы получили название лестничные (ladder) из-за структуры процедур вычисления ошибок линейного предсказания и моделирования обрабатываемых сигналов. Другое широко используемое название таких алгоритмов – это «решетчатые» (lattice). Так как существует огромное количество различных вариантов адаптивных алгоритмов и их модификаций, в данной статье рассматриваются по одному из основных представителей алгоритмов обобщенных групп.

### Основная часть

Процесс адаптации заключается в коррекции весовых коэффициентов адаптивного линейного сумматора, алгоритм работы которого в векторном виде описывается выражением (1). В качестве требуемого отклика адаптивного алгоритма используется наблюдаемый сигнал, а в качестве вектора входного сигнала – задержанные на период дискретизации (период повторения зондирующего сигнала  $T_n$ ) отсчеты наблюдаемого сигнала:

$$\varepsilon_k = x_k - y_k = x_k - \mathbf{w}_{k-1}^H \mathbf{x}_k, \quad (1)$$

где  $\varepsilon_k$  – разностный сигнал ошибки, используемый для настройки весовых коэффициентов;  $x_k$  – входной сигнал адаптивного устройства когерентного накопления (требуемый отклик адаптивного линейного сумматора);  $y_k$  – выходной сигнал адаптивного линейного сумматора;

$\mathbf{w}_k = [w_{1,k}, w_{2,k}, \dots, w_{N,k}]^T$  – вектор настраиваемых весовых коэффициентов;

$\mathbf{x}_k = [x_{k-1}, x_{k-2}, \dots, x_{k-N}]^T$  – вектор входного сигнала адаптивного линейного сумматора;  $H$  – знак операции эрмитового сопряжения;  $N$  – порядок адаптивного фильтра когерентного накопления;  $k$  – номер отсчета дискретного входного сигнала (номер периода зондирования), или номер итерации процесса адаптивной обработки сигнала.

Процесс коррекции весовых коэффициентов согласно LMS-алгоритму описывается выражением

$$\mathbf{w}_k = \mathbf{w}_{k-1} + \mu \mathbf{x}_k \varepsilon_k^*, \quad (2)$$

где  $\mu$  – параметр, определяющий устойчивость и скорость сходимости процесса адаптации, выбирается из условия

$$0 < \mu < \frac{1}{N\sigma_x^2}, \quad (3)$$

где  $\sigma_x^2$  – дисперсия вектора входного сигнала.

Коррекция весовых коэффициентов в NLMS-алгоритме представлена выражением

$$\mathbf{w}_k = \mathbf{w}_{k-1} + \frac{\hat{\mu}}{\mathbf{x}_k^H \mathbf{x}_k + \delta^2} \mathbf{x}_k \varepsilon_k^*, \quad (4)$$

где  $\hat{\mu}$  – нормализованный параметр, определяющий устойчивость и скорость сходимости процесса адаптации, определяется неравенством  $0 < \hat{\mu} < 1$ ;  $\delta^2 \geq 0,01\sigma_x^2$  – параметр регуляризации, предназначенный для улучшения обращения мгновенной оценки корреляционной матрицы вектора входного сигнала  $\mathbf{x}_k \mathbf{x}_k^H$  в случае ее плохой обусловленности.

Представленные выражениями (2) и (4) адаптивные алгоритмы относятся к простым градиентным алгоритмам, а RLS-алгоритм к сложным, и записываются следующими выражениями:

$$\mathbf{g}_k = \frac{\mathbf{R}_{Nk-1}^{-1} \mathbf{x}_k}{\lambda + \mathbf{x}_k^H \mathbf{R}_{Nk-1}^{-1} \mathbf{x}_k}, \quad (5)$$

$$\mathbf{R}_{Nk}^{-1} = \lambda \left[ \mathbf{R}_{Nk-1}^{-1} - \mathbf{g}_k \mathbf{x}_k^H \mathbf{R}_{Nk-1}^{-1} \right], \quad (6)$$

$$\mathbf{w}_k = \mathbf{w}_{k-1} + \mathbf{g}_k \varepsilon_k^*, \quad (7)$$

где  $\mathbf{g}_k$  – вектор коэффициентов Калмана;  $\mathbf{R}_{Nk}^{-1}$  – оценка обратной корреляционной матрицы вектора входного сигнала на  $k$ -й итерации обработки;  $\lambda$  – параметр экспоненциального взвешивания или параметр «забывания», определяется как  $(1 - 0,4/N) \leq \lambda \leq 1$ .

Современные решетчатые алгоритмы основываются на методе максимизации энтропии, предложенного Джоном Бергом в 1967 году для получения спектральных оценок. Процедура оценивания, основанная на этом методе, дает более высокую разрешающую способность при ограниченной априорной информации о сигнале. Высокая разрешающая способность достигается за счет продолжения корреляционной функции за пределы интервала, на котором она известна [5].

Разностный сигнал ошибки решетчатого RLS-алгоритма можно представить в векторном виде [5]:

$$\varepsilon_N = \mathbf{a}_N^T \mathbf{x}_N, \quad (8)$$

где  $\mathbf{a}_N = [1, a_{N,1}, a_{N,2}, \dots, a_{N,N}]^T$  – коэффициенты отражения решетчатого фильтра порядка  $N$  связаны обратной корреляционной матрицей входного сигнала с помощью выражения [5]

$$\mathbf{a}_N = \mathbf{R}_N^{-1} \begin{bmatrix} P_N \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (9)$$

где  $P_N = E[\varepsilon_N^2]$  – мощность разностного сигнала ошибки,  $E[\bullet]$  – математическое ожидание.

Если обратную корреляционную матрицу входного сигнала представить как

$$\mathbf{R}_N^{-1} = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{21} & \cdots & z_{1N} \\ z_{21} & z_{22} & \cdots & z_{2N} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ z_{N1} & z_{N2} & \cdots & z_{NN} \end{bmatrix}, \quad (10)$$

то коэффициенты отражения решетчатого фильтра можно записать в виде:

$$\mathbf{a}_N = \left[ 1, \frac{z_{21}}{z_{11}}, \frac{z_{31}}{z_{11}}, \dots, \frac{z_{N1}}{z_{11}} \right]. \quad (11)$$

Способы нахождения коэффициентов отражения  $\mathbf{a}_N$  определяют вид решетчатого фильтра [4]. Решетчатый RLS-алгоритм, представленный в [4], не имеет векторных вычислений, из-за чего, на первый взгляд, имеет большую арифметическую сложность [4], но вычислительная сложность этого алгоритма ниже, чем у RLS-алгоритма, описанного выражениями (5)–(7).

При решении задачи накопления сигнала скорость сходимости и точность представленных выше адаптивных алгоритмов возможно оценить с помощью моделирования процесса оценки корреляционных характеристик сигнала. При междупериодном накоплении сигнала с адаптивным перераспределением времен когерентного и некогерентного накопления, как показано в [1, 2], достаточной является оценка коэффициента междупериодной корреляции сигнала. По этой оценке будет происходить сравнение адаптивных алгоритмов. Модель входного сигнала можно представить в виде междупериодных отсчетов комплексного коррелированного стационарного случайного процесса с экспоненциальной корреляционной функцией [1, 2, 6]. Входной сигнал и его характеристики представлены на рис. 1.

Задаваемые параметры входного сигнала: аппроксимация корреляционной функции – экспоненциальная (рис. 1, б); период повторения  $T_{\Pi} = 2$  мс; частота Доплера  $F_{Дс} = 250$  Гц; число отсчетов сигнала  $L = 200$ ; коэффициент междупериодной корреляции  $r_c = 0,95$ ; время междупериодной корреляции  $\tau_c = 0,039$  с; ширина спектра междупериодных флуктуаций  $\Delta F_c = 12,8$  Гц; амплитуда сигнала 0,707, что соответствует СКО гауссовского закона распределения ( $\sigma_x = 0,707$ ), показанного на рис. 1, г.

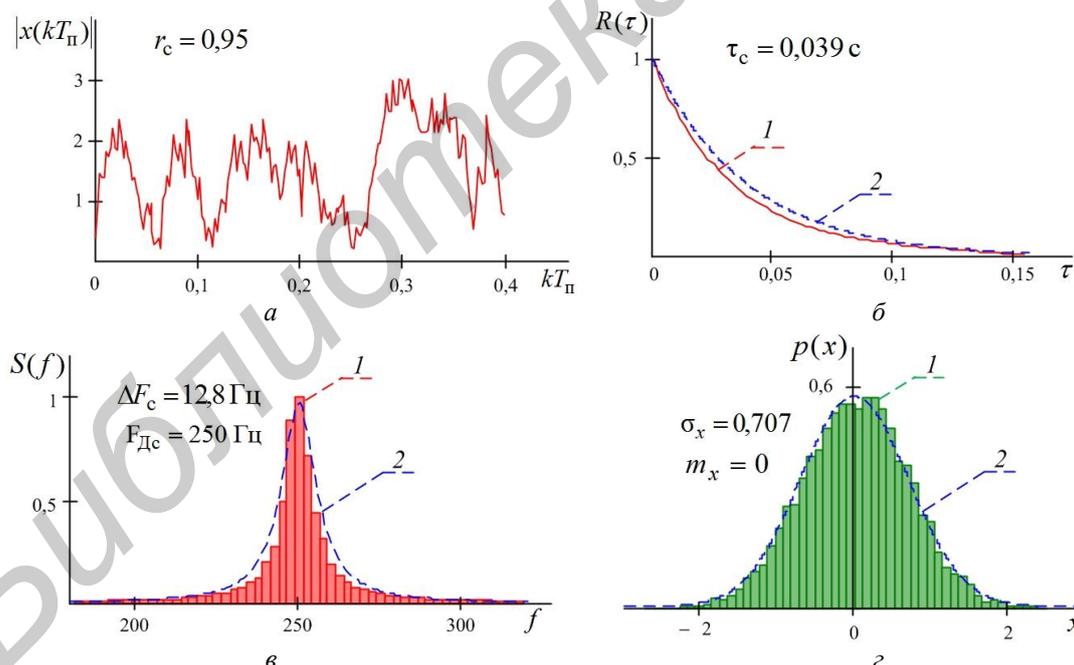


Рис. 1. Входной сигнал и его статические характеристики: модуль комплексного стационарного коррелированного процесса (а); нормированная корреляционная функция (б); нормированный энергетический спектр (в); закон распределения (г): 1 – найденная характеристика сигнала; 2 – задаваемая характеристика сигнала

Результаты оценки коэффициента междупериодной корреляции сигнала ( $\hat{r}_c$ ) при моделировании процесса адаптивной фильтрации входного воздействия (рис. 1, а) представленными выше алгоритмами показаны на рис. 2.

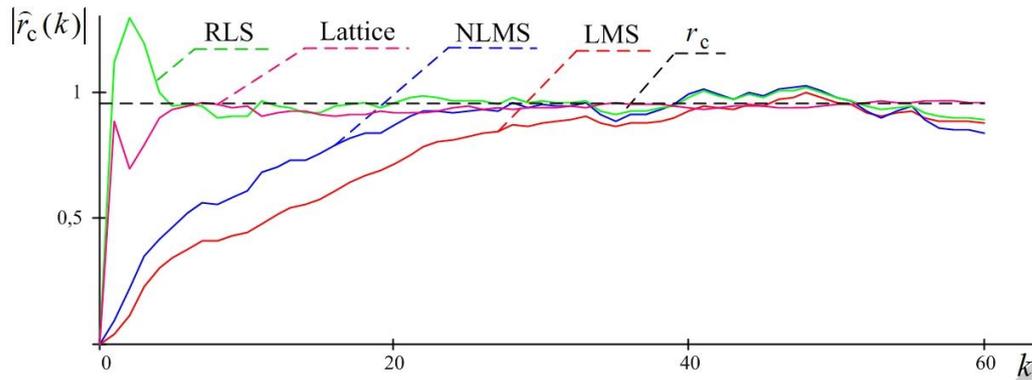


Рис. 2. Оценочное значение коэффициента междупериодной корреляции

Из рис. 2 видно, что скорость сходимости процесса адаптации рекурсивных алгоритмов выше чем нерекурсивных, что подтверждает [2, 3]. Показатели скорости сходимости процесса адаптации представлены в табл. 1. Параметры адаптивных алгоритмов выбирались из соображений минимизации ошибки оценки коэффициента междупериодной корреляции с максимально возможной скоростью сходимости.

Таблица 1. Показатели скорости сходимости процесса адаптации

Алгоритм	LMS	NLMS	RLS	Lattice
Количество итераций	30	20	5	5

Кроме того, из полученных результатов моделирования возможно узнать точность оценки коэффициента междупериодной корреляции. Оценка ошибок производилась по методике, представленной в [7], результаты расчета ошибок, с учетом исключения переходных процессов, представлены в табл. 2. Нормированная стандартная ошибка ( $\varepsilon_r$ ), ошибка смещения ( $\varepsilon_b$ ) и среднеквадратическая ошибка ( $\varepsilon$ ) рассчитывались с помощью выражений [6]:

$$\varepsilon_r = \frac{\sqrt{E[\hat{r}_c^2] - E^2[\hat{r}_c]}}{r_c}, \quad (12)$$

$$\varepsilon_b = \frac{E[\hat{r}_c]}{r_c} - 1, \quad (13)$$

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{E[(\hat{r}_c - r_c)^2]}}{r_c}. \quad (14)$$

Таблица 2. Ошибки оценки коэффициента междупериодной корреляции

Алгоритм	LMS	NLMS	RLS	Lattice
Математическое ожидание ( $E[\hat{r}_c]$ )	0,907	0,91	0,938	0,949
Стандартная ошибка ( $\varepsilon_r$ )	0,048	0,07	0,035	0,014
Ошибка смещения ( $\varepsilon_b$ )	-0,036	-0,032	-0,003	-0,0005
Среднеквадратическая ошибка ( $\varepsilon$ )	0,06	0,077	0,035	0,015

Из табл. 2 видно, что решетчатый (Lattice) алгоритм обладает лучшей точностью и высокой скоростью сходимости процесса адаптации (см. табл. 1), чем рассмотренные алгоритмы. Кроме того, решетчатый RLS-алгоритм, благодаря ортогональности вычислений ошибок предсказания и моделирования, имеет и высокую устойчивость [4].

Рассмотрим точность оценки коэффициента корреляции решетчатым RLS-алгоритмом. Для расчета доверительных интервалов оценки коэффициента междупериодной корреляции строился закон распределения оценочного значения коэффициента междупериодной корреляции с помощью гистограммы. При построении гистограммы размер выборки ( $x(k)$ ) равен 1000, нормированная гистограмма представлена на рис. 3.

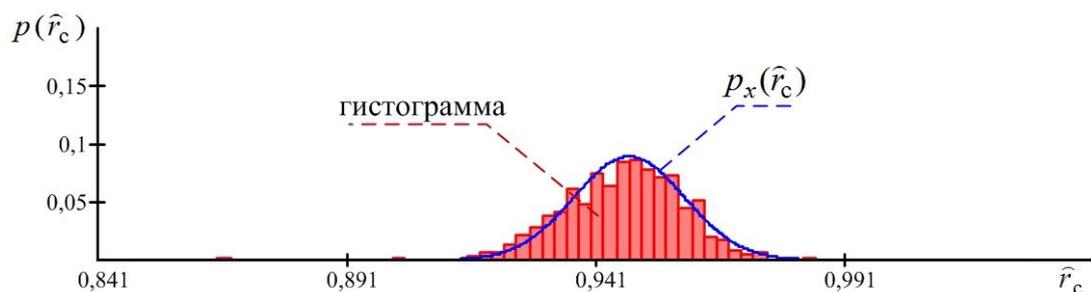


Рис. 3. Нормированная гистограмма оценки коэффициента междупериодной корреляции

Огибающая  $p_x(\hat{r}_c)$  представляет собой гауссовский закон распределения [7, 8], так как ошибка смещения пренебрежительно мала  $\varepsilon_b = -0,00067$ , а среднеквадратическая ошибка  $\varepsilon = 0,012 < 0,2$  [7]:

$$p_x(\hat{r}_c) = \frac{1}{\varepsilon r_c \sqrt{2\pi}} \exp\left(\frac{-(\hat{r}_c - r_c)^2}{2(\varepsilon r_c)^2}\right). \quad (15)$$

Из рис. 3 видно, что закон распределения ошибки оценивания коэффициента междупериодной корреляции возможно считать гауссовским, что позволяет использовать выражения (16) для расчета доверительных интервалов с заданной доверительной вероятностью 0,95 [7]:

$$\frac{\hat{r}_c}{1+2\varepsilon} \leq r_c \leq \frac{\hat{r}_c}{1-2\varepsilon}. \quad (16)$$

Практический интерес вызывает зависимость ширины доверительного интервала и ошибок оценивания коэффициента междупериодной корреляции от длины выборки (числа отраженных сигналов за время наблюдения). Результаты расчета точностных характеристик адаптивного решетчатого RLS-алгоритма при  $r_c = 0,95$  представлены в табл. 3.

Таблица 3. Точностные характеристики адаптивного решетчатого RLS-алгоритма

Длина выборки ( $L$ )	Математическое ожидание	Среднеквадратическая ошибка	Доверительный интервал
15	0,919	0,038	$0,854 \leq r_c \leq 0,993$
20	0,946	0,025	$0,901 \leq r_c \leq 0,996$
30	0,953	0,021	$0,915 \leq r_c \leq 0,996$
40	0,953	0,018	$0,92 \leq r_c \leq 0,989$
60	0,955	0,016	$0,926 \leq r_c \leq 0,987$
100	0,959	0,015	$0,932 \leq r_c \leq 0,989$
150	0,954	0,015	$0,926 \leq r_c \leq 0,983$
200	0,949	0,015	$0,921 \leq r_c \leq 0,979$
500	0,949	0,012	$0,926 \leq r_c \leq 0,973$
1000	0,949	0,012	$0,927 \leq r_c \leq 0,972$

Из табл. 3 видно, что при увеличении длины выборки  $L$  среднеквадратическая ошибка  $\varepsilon$  уменьшается, что приводит к сужению доверительного интервала. Среднеквадратическая ошибка составляет сотые доли истинного коэффициента корреляции и математическое ожидание оценочного коэффициента корреляции приближается к истинному при короткой длине выборки  $L \geq 20$ . Это значит, что наиболее эффективным будет применение адаптивного устройства когерентного накопления отраженного сигнала в приемном устройстве радиолокатора с временем наблюдения цели более 20 периодов зондирования.

## Заключение

При выборе адаптивного алгоритма самонастройки устройств когерентного и некогерентного накопления наиболее важным параметром является точность оценки коэффициента междупериодной корреляции отраженного сигнала. Высокую точность имеют рекурсивные адаптивные алгоритмы с решетчатой структурой вычислений (адаптивные решетчатые RLS-алгоритмы), что видно из табл. 2 и 3.

Адаптивные RLS-алгоритмы относятся к классу быстрых, благодаря относительно невысокой вычислительной сложности. Высокая устойчивость таких алгоритмов обеспечивается ортогональностью процедур вычисления ошибок линейного предсказания и моделирования. При высокой точности адаптивные рекурсивные алгоритмы имеют высокую скорость сходимости процесса адаптации, что видно из рис. 1 и табл. 3.

Ошибка оценки коэффициента междупериодной корреляции адаптивным алгоритмом имеет гауссовское распределение (рис. 2), что упрощает процесс расчета доверительных интервалов оценки. Среднеквадратические ошибки и доверительные интервалы с вероятностью 0,95 приведены в табл. 3. Из таблицы видно, что если в радиолокаторе число отраженных сигналов за время наблюдения цели не менее 20, то применение адаптивных алгоритмов на этапе междупериодной обработки позволяет увеличить эффективность радиолокационного приемника.

Полученные результаты позволяют применять адаптивный решетчатый алгоритм в качестве алгоритма самонастройки адаптивного устройства когерентного накопления отраженного сигнала в приемном устройстве радиолокатора обзора. Впервые предложен адаптивный решетчатый алгоритм для организации этапа адаптивного когерентного накопления в радиолокационном тракте междупериодной обработки сигнала.

## CHOICE OF SELF-ADJUSTMENT ALGORITHM FOR THE ADAPTIVE DEVICE OF COHERENT ACCUMULATION OF THE REFLECTED SIGNAL IN THE RADAR INTAKE

S.A. GABETS, S.U. SEDYSHEV

### Abstract

The results of the analysis of various classes adaptive algorithms for self-adjustment of adaptive device of reflected signal coherent accumulation are presented. The basic indicators of their quality are considered. Confidential intervals of an estimation of signal's correlation factor by adaptive trellised RLS-algorithm for various sample's lengths are calculated.

*Keywords:* reflected signal, adaptive algorithm, correlation coefficient, lattice filter.

### Список литературы

1. Охрименко А. Е. Основы радиолокации и РЭБ. Ч. 1. Основы радиолокации. М., 1983.
2. Габец С. А., Седышев С. Ю. // Вестн. Воен. акад. Респ. Беларусь. 2014. № 1 (42). С. 81–87.
3. Видроу Б., Стирнз С. Адаптивная обработка сигналов. Пер. с англ. М., 1989.
4. Джиган В. И. Адаптивная фильтрация сигналов: теория и практика. М., 2013.
5. Монзинго Р. А., Миллер Т. А. Адаптивные антенные решетки: Введение в теорию. М., 1986.
6. Быков В. В. Цифровое моделирование в статистической радиотехнике. М., 2012.
7. Бендат Дж., Пирсон А. Прикладной анализ случайных данных. Пер. с англ. М., 1989.
8. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. М., 2005.

УДК 537.868.3

## КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ТЕХНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА И ГИДРОГЕЛЯ ДЛЯ СКРЫТИЯ ОБЪЕКТОВ ОТ СРЕДСТВ ТЕХНИЧЕСКОЙ РАЗВЕДКИ

Е.С. БЕЛОУСОВА, А.М.А. МОХАМЕД, С.Н. КАСАНИН

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь*

*Поступила в редакцию 4 декабря 2015*

Приведены результаты исследований коэффициентов отражения и передачи электромагнитного излучения гибких композиционных материалов на основе технического углерода и гидрогеля в диапазоне частот 8...12 ГГц. Проанализированы спектрально-поляризационные свойства углеродосодержащих материалов в видимом диапазоне длин волн (450...940 нм). Представлены рекомендации использования данных материалов для скрытия объектов на фоне различных типов местности.

*Ключевые слова:* технический углерод, гидрогель, электромагнитное излучение, коэффициент спектральной яркости, степень поляризации.

### Введение

Многие годы ведутся исследования в области создания средств скрытия расположения, состава и состояния военных объектов. Мероприятие по скрытию объектов называется маскировкой, которая заключается в недопущении появления или в устранении демаскирующих признаков войск и объектов.

Возможность скрытого получения информации о защищаемых объектах пассивными методами на значительных расстояниях связана с наличием визуально-оптических каналов утечки информации, которые могут использоваться как в военное, так и в мирное время. Эффективным методом снижения уровня информационных сигналов в видимой и ближней ИК-области является снижение контрастов объектов с окружающими фонами местности. Для данных целей используются различные композиционные материалы на основе природных компонентов, которые должны уменьшать различия между коэффициентами яркости поверхностей объектов и естественных фонов, экранировать объекты от электромагнитного излучения (ЭМИ), а также обладать низкими массогабаритными характеристиками.

В данной работе в качестве природного материала для создания средства маскировки объектов предложено использовать технический углерод. Ранее проведенные исследования [1, 2] показали, что углеродосодержащие материалы, например, шунгит, можно рекомендовать для скрытия конструктивных особенностей объектов на фоне черноземных и супесчаных почв.

Порошкообразный технический углерод представляет собой набор частиц размером  $10^{-5} \dots 10^{-6}$  см. К основным характеристикам технического углерода относятся [4]: удельная поверхность – 12...350 м<sup>2</sup>/г; размер частиц – 9...600 нм; средний размер частиц – 10...120 нм; плотность – 180...350 кг/м<sup>3</sup>.

Цель данных исследований заключалась в исследовании спектрально-поляризационных свойств композиционных материалов на основе технического углерода для применения с целью маскировки объектов в спектральной области 0,4...2,5 мкм.

## Методика эксперимента

Для проведения исследований спектрально-поляризационных свойств композиционных материалов изготавливались образцы на основе порошкообразного технического углерода. Для фиксации частиц порошка углерода предложено использовать полиэлектролитный гидрогель на основе водорастворимого сополимера акриламида и натриевой соли акриловой кислоты. Данный полимер обладает свойствами супервлагоабсорбента, а также способен формировать протяженную пространственную матрицу с высокой адгезией к частицам порошка и металлическим поверхностям.

Образцы изготавливались последовательным добавлением порошка технического углерода в гидрогель. Смесь тщательно размешивалась и заливалась в прямоугольную форму, проводились измерения массы образцов. Подробное содержание образцов представлено в табл. 1. За счет жидкой фазы гидрогеля смесь способна принимать любую форму. Толщина образца составила 2,5–3 мм. Образцы помещались в специальный контейнер для защиты от света и влаги на 48 ч до высыхания. Необходимо отметить, что данные образцы обладают свойством гибкости.

Далее проводились измерения массы образцов. На основе данных измерений рассчитывалась массовая доля воды ( $\omega_{\text{H}_2\text{O}}$ ) в образцах до и после высыхания по формуле

$$\omega_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{m_{\text{H}_2\text{O}}}{M} \cdot 100 \%, \quad (1)$$

где  $m_{\text{H}_2\text{O}}$  – масса воды в смеси, г;  $M$  – общая масса образца, г.

Таблица 1. Процентное содержание композиционных материалов на основе технического углерода и гидрогеля

Номер образца	Массовая доля, %		Об. %	
	Гидрогель	Технический углерод	Гидрогель	Технический углерод
№1	90	10	83,8	16,2
№2	80	20	73,9	26,1
№3	60	40	50,8	49,2
№4	50	50	46,4	53,6
№5	40	60	37,9	62,2

Масса воды в смеси ( $m_{\text{H}_2\text{O}}$ ) определялась как

$$m_{\text{H}_2\text{O}} = m_p - m_{\text{сухр}}, \quad (2)$$

где  $m_p$  – масса раствора гидрогеля, г;  $m_{\text{сухр}}$  – масса сухого вещества в гидрогеле, г, т. к. в растворе гидрогеля 13 масс. % сухого вещества, то  $m_{\text{сухр}} = 0,13 \cdot m_p = 0,13 \cdot (M - m_{\text{ш}})$ , при этом данные для расчета берутся до высыхания образцов.

Масса раствора в композите ( $m_p$ ) определялась как

$$m_p = M - m_{\text{ш}}, \quad (3)$$

где  $m_{\text{ш}}$  – масса шунгита, г.

Для исследования коэффициента отражения и передачи электромагнитного излучения в диапазоне 8–12 ГГц использовался панорамный измеритель ослабления и КСВН Я2Р–67 с ГКЧ–61 и волноводным трактом, который обеспечивает выделение и детектирование уровней падающей и отраженной (или прошедшей) волн электромагнитного излучения. Калибровка оборудования перед началом измерений, процесс измерения производились по стандартной методике [5].

Для исследования спектрально-поляризационных свойств изготовленных образцов в видимом диапазоне длин волн (450... 940 нм) использовались гониометрическая установка и спектро радиометр ПСР–02, позволяющий регистрировать спектральную плотность энергетической яркости (СПЭЯ) образцов при различных положениях оси поляроида.

Спектрорадиометр ПСР–02 предназначен для проведения измерения в лабораторных и полевых условиях СПЭЯ, а также поляризационных характеристик отраженного растительными элементами или другими объектами излучения в диапазоне длин волн от 0,35 до 2,5 мкм [2]. Для проведения микроскопического анализа изготовленных образцов использовался микроскоп МЕТАМ-Р1.

### Результаты и их обсуждение

По результатам расчета влагосодержания в образцах до высыхания и после обнаружено, что при концентрации гидрогеля 40 масс. % и менее в смеси происходит практически полное испарение воды из водного раствора полимера и полученный композиционный материал представляет собой порошок технического углерода, распределенный в полимерной матрице (массовая доля воды менее 20 %). В табл. 2 представлены значения параметров, использованных для расчета влагосодержания по формулам 1–3 композиционных материалов на основе технического углерода и гидрогеля, в табл. 3 – полученные в результате такого расчета величины влагосодержания

Таблица 2. Значения параметров, использованных для расчета влагосодержания композиционных материалов на основе технического углерода и гидрогеля

№ образца	Масса, г							
	до высыхания				после высыхания			
	раствора гидрогеля	порошка гидрогеля в растворе	воды	общая	раствора гидрогеля	порошка гидрогеля в растворе	воды	общая
1	27	3,6	23,4	30	19	3,6	15,4	22
2	24	3,2	20,8	30	11	3,2	7,8	17
3	18	2,4	15,6	30	8	2,4	5,6	20
4	15	2,1	12,9	30	4	2,1	1,9	19
5	12	1,6	10,4	30	2	1,6	0,4	20

Таблица 3. Величины влагосодержания композиционных материалов на основе технического углерода и гидрогеля

№ образца	Влагосодержание, масс. %	
	до высыхания	после высыхания
1	0,86	0,81
2	0,86	0,71
3	0,86	0,70
4	0,86	0,49
5	0,86	0,19

В результате микроскопического анализа получены цифровые фотографии для обратной и рабочей поверхности всех образцов. Для углеродосодержащего композита образца № 1 при процентном соотношении технического углерода (10 масс. %) и гидрогеля (90 масс. %), было выявлено, что рабочая поверхность (рис. 1, а) представляет собой технический углерод, распределенный в матрице гидрогеля, обратная сторона (рис. 1, б) содержит только гидрогель. На рис. 1, б стрелками показаны частицы углерода.

Сделав поперечный срез образцов № 1, № 3 и № 5, наблюдаем, что в образце № 1 (10 масс. % технического углерода) (рис. 3, а) структура углеродосодержащего материала по всему срезу содержит полимер гидрогеля. В образце № 3 (40 масс. % технического углерода) рабочая поверхность полностью состоит из технического углерода, а середина и обратная сторона содержит гидрогель в небольшом количестве (рис. 3, б). В образце № 5 (60 масс. % технического углерода) гидрогель скапливается в середине образца (рис. 3, в).

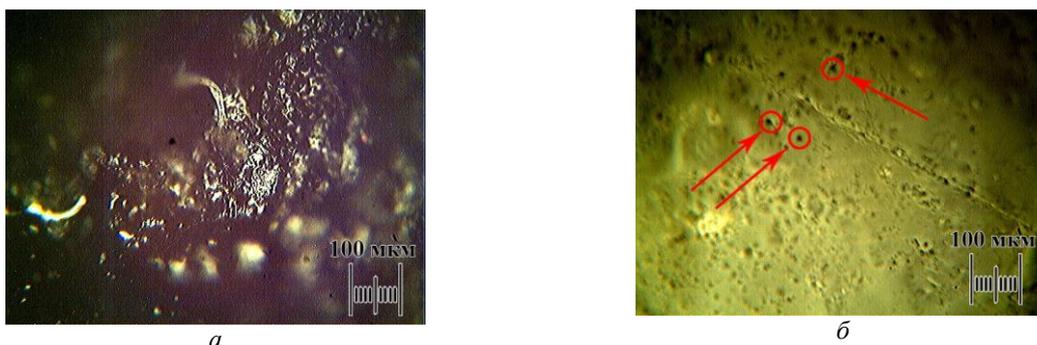


Рис. 1. Электронно-микроскопический снимок рабочей (а) и обратной (б) поверхности композита на основе технического углерода (10 масс. %) и гидрогеля (90 масс. %)

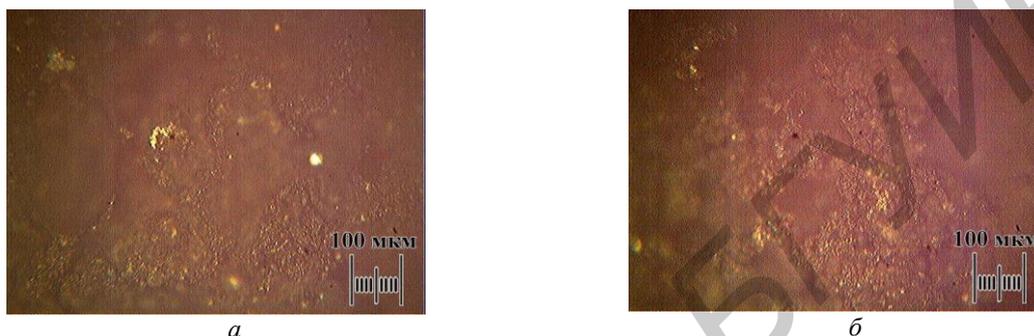


Рис. 2. Электронно-микроскопический снимок рабочей (а) и обратной (б) поверхности композита на основе технического углерода (60 %) и гидрогеля (40 %)

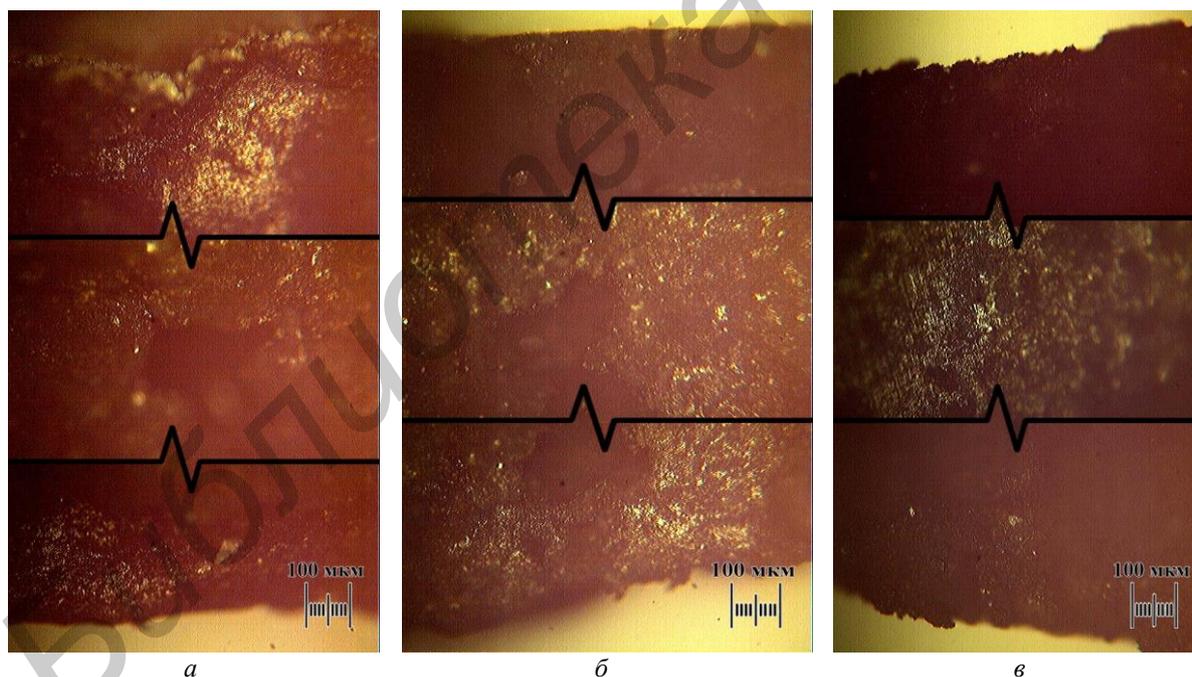


Рис. 3. Электронно-микроскопический снимок поперечного среза композита образца № 1 (а), № 3 (б), № 5 (в) на основе технического углерода и гидрогеля

В процессе формирования материала под действием силы тяжести гидрогель опускается на дно формы, образуя гладкую поверхность с высоким содержанием полимера, а верхняя (рабочая) поверхность имеет шероховатую структуру, образованную частицами технического углерода с небольшими прослойками связующего полимера. В результате получается градиент концентрации компонентов по толщине образца.

На основании измерений ослабления и КСВН были построены и проанализированы частотные зависимости коэффициента передачи и отражения ЭМИ (рис. 4, 5). Исходя из частотной зависимости коэффициента передачи композитных материалов на основе

технического углерода и гидрогеля в диапазоне частот 8...12 ГГц (рис. 4), можно заключить, что для образца № 2 (20 масс. % технического углерода) коэффициент передачи составляет -16...-20 дБ. При увеличении концентрации в составе композита до 50 масс. % технического углерода (образец № 4) коэффициент передачи уменьшается до значений -25...-26 дБ. Для образца № 5 (60 масс. % технического углерода) коэффициент передачи составляет -24,9...-25,3 дБ. Наименьшим коэффициентом передачи (-40 дБ) обладает технический углерод, не имея в своем составе гидрогель.

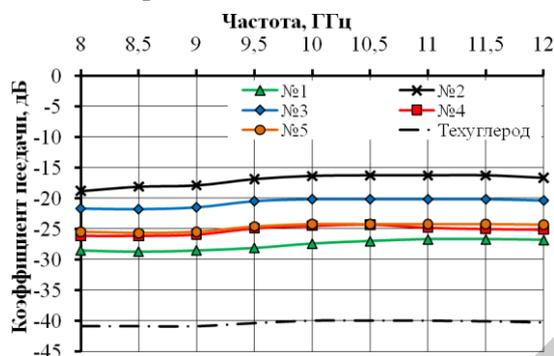


Рис. 4. Частотные зависимости коэффициента передачи композитных материалов на основе технического углерода и гидрогеля в диапазоне частот 8...12 ГГц

Исследовав частотные зависимости коэффициента отражения, измеренного с металлическим отражателем, при расположении композита на основе технического углерода и гидрогеля рабочей поверхностью (рис. 5, а) в диапазоне частот 8–12 ГГц, можно сделать вывод, что самым большим значением коэффициента отражения (-2,1...-2,2 дБ) обладают образец № 2 (20 масс. % технического углерода) и технический углерод. Наименьшими значениями коэффициента отражения (-4,6...-5 дБ) обладает образец № 1 (10% технического углерода) и образец № 4 (50 масс. % технического углерода). На основе результатов анализа частотных зависимостей коэффициента отражения, измеренного с металлическим отражателем при расположении композита на основе гидрогеля и технического углерода обратной стороной к излучателю (рис. 5, б) в диапазоне частот 8–12 ГГц, выявлено, что самыми большим значением (-2,1 дБ) обладают образцы № 2 (20 масс. % технического углерода) и технический углерод. Наименьшим значением коэффициента отражения (-4,6...-5 дБ) обладает образец № 4 (50 масс. % технического углерода). Этот образец обладает практически одинаковыми значениями коэффициентов отражения относительно рабочей и обратной стороны.

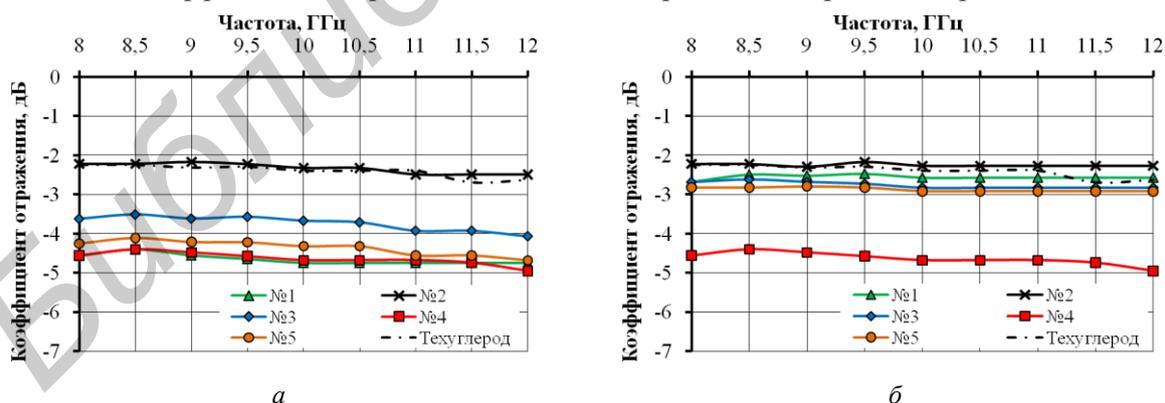


Рис. 5. Частотные зависимости коэффициента отражения, измеренного с металлическим отражателем при расположении композита на основе гидрогеля и технического углерода рабочей поверхностью (а) и обратной поверхностью к излучателю (б) в диапазоне частот 8...12 ГГц

Результаты исследования КСЯ и степени поляризации СП композиционных материалов на основе технического углерода и гидрогеля в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне длин волн (450...940 нм) представлены на табл. 4 и рис. 6. Измерения КСЯ и СП проводилось для рабочей и обратной поверхностей композиционных материалов на основе технического углерода и гидрогеля.

Таблица 4. Сравнительная характеристика КСЯ композиционного углеродосодержащего материала и различных типов почв для угла наблюдения 45°

№ образца	Содержание углерода, масс. %	КСЯ, отн. ед		Тип почвы, соответствующий рабочей поверхности композита		Тип почвы, соответствующий обратной поверхности композита	
		Рабочая поверхность	Обратная поверхность	Название	КСЯ, отн. ед.	Название	КСЯ, отн. ед.
2	20	0,099...0,1	0,13...0,14	Суглинистая	0,85...0,12	Влажная черноземная	0,1...0,15
3	40	0,027...0,033	0,12...0,13	Торф сфагновый	0,01...0,04	Подзолистая	0,12...0,15
5	60	0,021...0,024	0,12...0,14	Торфяная низинная	0,01...0,04	Дерново-подзолистая	0,12...0,15

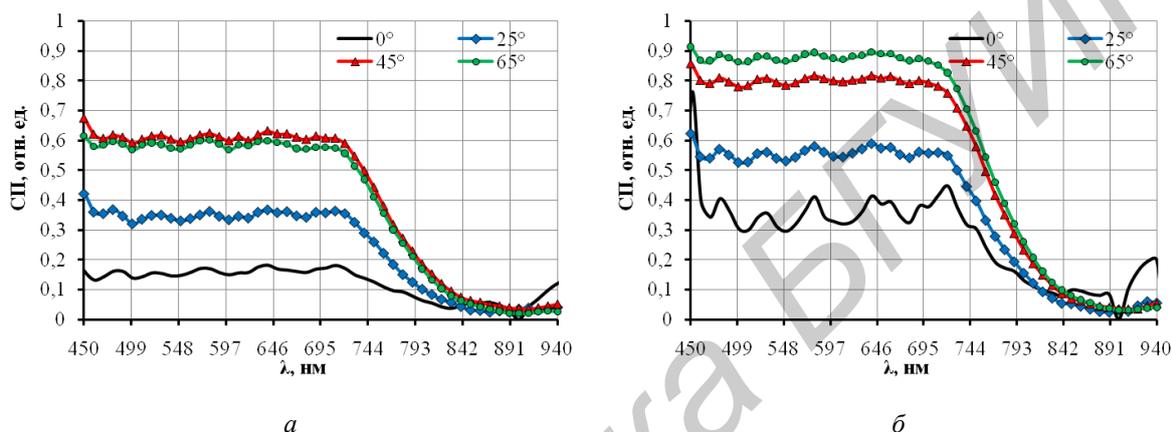


Рис. 6. Зависимость степени поляризации от длины волны в видимом диапазоне для угла падения света 45° при углах наблюдения 0°, 25°, 45° и 65° для рабочей (а) и обратной поверхности (б) композита на основе порошка технического углерода (20 %) и гидрогеля

Значение КСЯ для рабочей поверхности композиционного материала с содержанием технического углерода 20 масс. % при угле наблюдения 45° составляет  $\approx 0,1$  отн. ед, при угле наблюдения 65° значение КСЯ составляет 0,08 отн. ед, при угле наблюдения 25° – 0,04 отн. ед., при угле наблюдения 0° – 0,03 отн. ед. Данные значения соответствуют влажной суглинистой почве, серовато-бурого цвета. Для обратной стороны композиционного материала с 20 % углерода значение КСЯ при угле наблюдения 45° составляет  $\approx 0,14$  отн. ед., при угле наблюдения 65° –  $\approx 0,11$  отн. ед., при угле наблюдения 25° – 0,06 отн. ед., при угле наблюдения 0° – 0,03 отн. ед. Значения КСЯ обратной поверхности образца соответствуют значениям КСЯ влажных черноземных почв. Для композиционного материала на основе технического углерода (40 %) и гидрогеля (60 %) значения КСЯ увеличиваются, и для угла наблюдения 45° КСЯ для рабочей поверхности составляет 0,027...0,03 отн. ед. Для обратной стороны композиционного материала на основе технического углерода (40 %) и гидрогеля (60 %) значения КСЯ уменьшаются и составляют для угла наблюдения 45° 0,12 отн. ед.

Использование данного композиционного материала на поверхности объектов специального назначения позволяет скрыть их на фоне торфяных сфагновых почв (при расположении рабочей поверхностью композиционного материала вверх) или на фоне подзолистых почв (при расположении обратной поверхностью композиционного материала вверх). Значения КСЯ для композиционных материалов с содержанием технического углерода (60 %) для рабочей поверхности и углов наблюдения 0°, 25° 45° составляют 0,021... 0,23 отн. ед. Данные значения КСЯ соответствуют значениям КСЯ торфяных низинных почв. Значения КСЯ для композиционного материала с содержанием технического углерода (60 %), для обратной поверхности – 0,12... 0,14 отн. ед. для угла наблюдения 45°. Данные значения КСЯ коррелируют со значениями КСЯ дерновоподзолистых почв.

Степень поляризации рабочей поверхности для композиционного материала с содержанием технического углерода (20 %) составляет 0,6 отн. ед. для углов наблюдения

45° и 65° (рис. 6, а). Для обратной поверхности образца СП увеличивается и для угла наблюдения 65° составляет 0,04... 0,9 отн. ед (рис. 6, б). Такое изменение значений СП для рабочей и обратной поверхности образца объясняется скоплением большого количества гидрогеля у обратной поверхности образца. Гидрогель за счет высокого влагосодержания имеет высокое значение СП.

Степень поляризации для композита с содержанием технического углерода порядка 40 % для рабочей поверхности при угле наблюдения 65° имеет значения от 0,03... 1 отн. ед. Для обратной поверхности композита с содержанием технического углерода 40 % СП для углов наблюдения 65°, 45° и 25° составляет 0,05... 1 отн. ед., что объясняется равномерным распределением гидрогеля по толщине образца. Для рабочей поверхности композита на основе гидрогеля (40 %) и технического углерода (60 %) значение СП для угла наблюдения 45° и 65° составляет 0,05... 1 отн. ед. Для обратной поверхности композита на основе гидрогеля (40 %) и технического углерода (60 %) значение СП для угла наблюдения 65° составляет 0,07... 1 отн. ед. Такое изменение СП характерно для углеродосодержащих материалов.

### Заключение

На основе представленных исследований предложено изготавливать экраны электромагнитного излучения, которые представляют собой скрепленные внахлест образцы композита из гидрогеля с добавлением технического углерода (50 масс. %). Данные экраны ЭМИ обладают коэффициентом отражения  $-4,6...-5$  дБ и коэффициентом передачи  $-26$  дБ. На основе спектрально-поляризационных исследований данные экраны можно рекомендовать для скрытия объектов на фоне торфяных почв (при расположении рабочей поверхностью вверх) или на фоне подзолистых почв (при расположении обратной поверхностью вверх). Водосодержащие экраны электромагнитного излучения на основе углеродосодержащего композита могут применяться и в других отраслях для защиты электронных приборов от побочных электромагнитных излучений, для защиты обслуживающего персонала от воздействия ЭМИ радиочастотного диапазона.

## COMPOSITE MATERIALS BASED ON CARBON BLACK AND HYDROGELS USED FOR HIDDEN OBJECTS FROM TECHNICAL INTELLIGENCE SERVICE

E.S. BELOUSOVA, A.M.A. MOHAMED, S.N. KASANIN

### Abstract

The research results of reflection and transmission coefficients of flexible composite materials based on carbon black and hydrogels in the range 8...12 GHz are presented. Spectral and polarization properties of carbon materials in the visible wavelength range (450 ... 940 nm) were analyzed. Recommendations for using composite materials based on carbon black and hydrogels for hiding objects on different background were formed.

*Keywords:* carbon black, hydrogel, electromagnetic radiation transmission and reflection coefficients, spectral brightness coefficient, polarization degree.

### Список литературы

1. Белоусова Е.С. Наноструктурированные экраны электромагнитного излучения на основе шунгита: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Минск, 2015.
2. Белоусова Е.С., Лыньков Л.М. // Труды МАИ. 2014. № 76. С. 1–16.
3. Гюльмисарян Т.Г., Левенберг И.П. // Мир нефтепродуктов. 2008. №7. С. 6–10.
4. Суrowsикин В.Ф. // Журн. Рос. хим. общества им. Д.И. Менделеева. 2007. № 4. С. 92–97.
5. ГОСТ 20271.1–91. Изделия электронные СВЧ. Методы измерения электрических параметров.

УДК 621.3.011.22

## ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРА ФРАКЦИЙ ВЛАГОСОДЕРЖАЩЕГО ПОРОШКООБРАЗНОГО ПЕРЛИТА НА ЕГО ЗНАЧЕНИЯ ПРОВОДИМОСТИ

О.В. БОЙПРАВ, Т.В. БОРБОТЬКО

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь

Поступила в редакцию 11 декабря 2015

Представлены результаты исследования влияния размера фракций порошкообразного перлита, в поры которого методом пропитки инкорпорирован водный раствор хлорида кальция с концентрацией 10...40 масс. %, на значения проводимости такого материала. Проанализированы его характеристики отражения и передачи электромагнитного излучения в диапазоне частот 0,7...17 ГГц.

*Ключевые слова:* коэффициенты отражения и передачи, электромагнитное излучение, перлит, проводимость, размер фракций.

### Введение

Исследование закономерностей взаимодействия электромагнитного излучения (ЭМИ) с различными материалами является одной из важных задач, решаемых в целях разработки новых и повышения эффективности существующих конструкций электромагнитных экранов. Эти закономерности определяются электродинамическими и физическими параметрами материалов и влияют на значения их коэффициентов отражения ( $S_{11}$ ) и передачи ( $S_{21}$ ) ЭМИ в рабочем диапазоне частот.

К основным электродинамическим параметрам материалов относятся следующие: относительная диэлектрическая проницаемость ( $\epsilon$ ); относительная магнитная проницаемость ( $\mu$ ); проводимость ( $G$ ). В [1] доказано, что чем выше величины  $\epsilon$  и  $\mu$  для магнитных или  $\epsilon$  и  $G$  для проводящих материалов, тем выше значения их коэффициента отражения и ниже значения коэффициента передачи ЭМИ. К основным физическим параметрам материалов относятся следующие: толщина; высота геометрических неоднородностей поверхности (при их наличии); размер фракций (в случае, если этот материал либо один из его компонентов является порошкообразным). Согласно [2], чем больше толщина магнитного или проводящего материала, тем выше значения его коэффициента отражения ЭМИ (при условии, что этот параметр значительно меньше глубины проникновения излучения в материал) и ниже значения его коэффициента передачи ЭМИ. В [3] показано, что снижение значений коэффициента отражения ЭМИ материала возможно путем формирования на его поверхности геометрических неоднородностей. Геометрические неоднородности поверхности материалов обуславливают то, что поляризация падающей на них электромагнитной волны не совпадает с поляризацией отраженной волны. Происходит рассеяние отраженной волны, что обуславливает снижение значений коэффициента отражения ЭМИ материала [4]. Если материал является порошкообразным, то процесс взаимодействия с ним ЭМИ аналогичен дифракции этого излучения на мелкой решетке (при условии, что размер его фракций меньше длины электромагнитной волны). При этом на значения коэффициента отражения ЭМИ такого материала оказывают влияние как его электродинамические характеристики, так и размер его фракций. Для ряда порошкообразных материалов наблюдается также зависимость их электродинамических характеристик от размера фракций [3].

Цель настоящей работы заключалась в исследовании влияния размера фракций влагосодержащего порошкообразного перлита на значения его электропроводности, которая, в конечном итоге, обуславливает характеристики передачи и отражения ЭМИ такого материала.

### Методика проведения эксперимента

Для проведения исследований использовался перлит трех типов. Перлит типа 1 характеризовался размером фракций  $0,5 \pm 0,2$  мм (далее по тексту – 0,5 мм), типов 2 и 3 – 1...3 мм и  $3 \pm 0,5$  мм (далее по тексту – 3 мм) соответственно [5]. Для получения образцов исследованного влагосодержащего порошкообразного перлита выполнялось следующее.

1. Инкорпорирование методом пропитки в поры порошкообразного перлита водного раствора хлорида кальция, концентрация которого составляла 10, 20, 30 или 40 масс. %. Соотношение масс порошкообразного перлита и водного раствора хлорида кальция – 1:4, что обусловлено максимальным значением массы жидкости, которую может впитать порошкообразный перлит с размером фракций 0,5...3 мм [6].

2. Стабилизация влагосодержания порошкообразного перлита путем его сушки при стандартных условиях [7]. Длительность процесса стабилизации влагосодержания порошкообразного перлита составила 3...9 суток в зависимости от типа порошкообразного перлита и концентрации инкорпорированного в его поры водного раствора хлорида кальция. Контроль влагосодержания порошкообразного перлита выполнялся гравиметрическим методом с использованием весов лабораторных класса точности 2 [8].

В табл. 1 представлены значения стабильного влагосодержания порошкообразного перлита ( $V$ , об. %) в зависимости от концентрации водного раствора хлорида кальция ( $C$ , масс. %).

Таблица 1. Значения стабильного влагосодержания порошкообразного перлита в зависимости от концентрации водного раствора хлорида кальция

Тип порошкообразного перлита	$C$ , масс. %	$V$ , об. %
1	10	14
1	20	24
1	30	29
1	40	47
2	10	7
2	20	14
2	30	22
2	40	26
3	10	4
3	20	8
3	30	14
3	40	15

Установлено, что увеличение с 10 до 40 масс. % концентрации водного раствора хлорида кальция, инкорпорированного методом пропитки в поры порошкообразного перлита типа 1, приводит к увеличению с 14 до 47 об. % значения его стабильного влагосодержания. Для перлита типов 2 и 3 при этом обеспечивается увеличение указанного параметра соответственно с 7 до 26 об. % и с 4 до 15 об. %. Порошкообразный перлит типа 1, в поры которого методом пропитки инкорпорирован водный раствор хлорида кальция с концентрацией 10...40 масс. %, по сравнению с перлитом типов 2 и 3 характеризуется большими значениями стабильного влагосодержания ввиду большей пористости [9].

Проводимость порошкообразного перлита определялась расчетным путем на основе формулы вида

$$G = \frac{1}{R}, \quad (1)$$

где  $R$ , [Ом] – величина сопротивления влагосодержащего порошкообразного перлита.

Для проведения измерений сопротивления влагосодержащего порошкообразного перлита использовалась измерительная система, включающая в себя следующие элементы:

– измерительная ячейка в виде параллелепипеда с размерами сторон  $5 \times 50 \times 5$  мм;

- электроды, площадь которых равна площади меньших торцов измерительной ячейки;
- омметр и источник переменного тока.

На рис. 1 представлена схема соединения указанных элементов использованной измерительной системы.

Измерения сопротивления влагосодержащего порошкообразного перлита выполнялись в соответствии со следующими этапами.

1. Соединение элементов измерительной системы (в соответствии с рис. 1).
2. Заполнение порошкообразным перлитом измерительной ячейки таким образом, чтобы ее торцы полностью контактировали с его частицами.
3. Включение источника переменного тока.
4. Измерение значения сопротивления влагосодержащего порошкообразного перлита с помощью омметра [10].

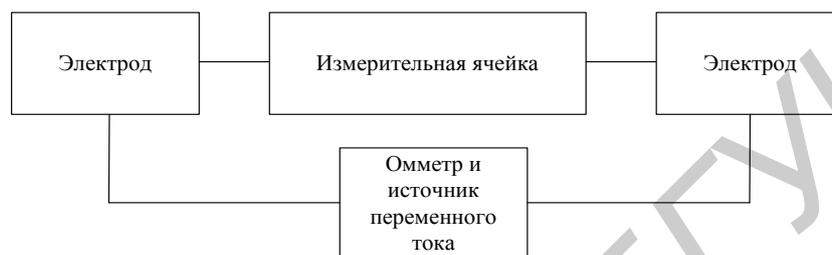


Рис. 1. Схема соединения элементов измерительной системы при измерении сопротивления влагосодержащего порошкообразного перлита

Для измерения значений коэффициентов передачи и отражения ЭМИ в диапазоне частот 0,7...17 ГГц влагосодержащего порошкообразного перлита выполнялось заполнение им емкостей, изготовленных из радиопрозрачного материала. Расстояние между большими торцами этих емкостей составляло 10 мм. Измерения значений коэффициентов передачи и отражения ЭМИ в диапазоне частот 0,7...17 ГГц выполнялись согласно методике, представленной в [11].

### Результаты и их обсуждение

В табл. 2 представлены полученные на основе результатов измерений и расчетов (1) значения проводимости порошкообразного перлита различного типа.

Таблица 2. Значения проводимости порошкообразного перлита различного типа

Тип порошкообразного перлита	1	2	3
Значение проводимости порошкообразного перлита, $\times 10^9$ См	9	13	17

Показано, что увеличение с 0,5 до 3 мм размера фракций порошкообразного перлита приводит к увеличению с  $9 \cdot 10^{-9}$  до  $17 \cdot 10^{-9}$  См проводимости такого материала. Это может быть обусловлено тем, что в перлите типа 3 содержится больший объем связанной воды по сравнению с перлитом типов 1 и 2, ввиду того, что процесс получения перлита типа 3 по сравнению с процессами получения перлита типов 1 и 2 характеризуется менее длительным выдерживанием влагосодержащей перлитовой породы в шахтной печи [12]. На рис. 2 представлены зависимости проводимости влагосодержащего порошкообразного перлита типов 1, 2 и 3 от концентрации водного раствора хлорида кальция, инкорпорированного методом пропитки в поры такого материала. Показано, что увеличение с 0,5 до 3 мм размера фракций порошкообразного перлита, в поры которого методом пропитки инкорпорирован водный раствор хлорида кальция с концентрацией 10 масс. %, приводит к снижению с  $17 \cdot 10^{-6}$  до  $6 \cdot 10^{-6}$  См проводимости такого материала, что обусловлено уменьшением величины его стабильного влагосодержания (табл. 1). Увеличение с 10 до 40 масс. % концентрации указанного раствора, вводимого в порошкообразный перлит, не приводит к существенному изменению его проводимости. Проводимость материала, содержащего жидкие среды, возрастает при увеличении объема и/или проводимости указанных сред. Увеличение концентрации водного раствора хлорида кальция приводит к снижению его проводимости [13].

При этом влагосодержание порошкообразного перлита, в поры которого инкорпорирован указанный раствор, возрастает. Указанные явления могут обуславливать незначительное изменение проводимости порошкообразного перлита при увеличении концентрации вводимого в него водного раствора хлорида кальция.

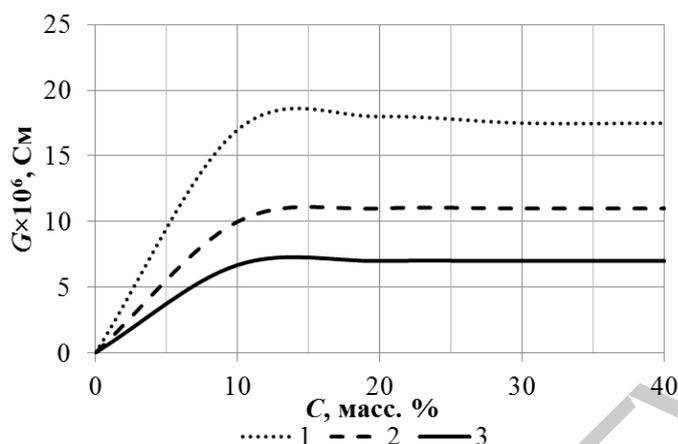


Рис. 2. Зависимости проводимости влагосодержащего порошкообразного перлита типов 1 (кривая 1), 2 (кривая 2) и 3 (кривая 3) от концентрации водного раствора хлорида кальция, инкорпорированного методом пропитки в поры такого материала

На рис. 3 представлены полученные в результате проведенных измерений частотные зависимости коэффициента передачи ЭМИ в диапазоне частот 0,7...17 ГГц порошкообразного перлита типов 1, 2 и 3, пропитанного 10%-м водным раствором хлорида кальция.

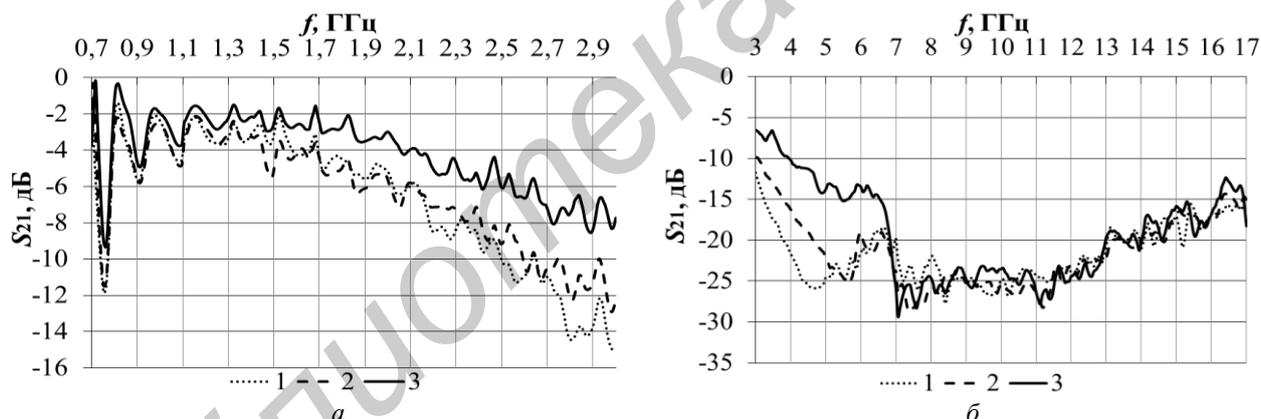


Рис. 3. Зависимости коэффициента передачи ЭМИ в диапазонах 0,7...3 ГГц (а) и 3...17 ГГц (б) порошкообразного перлита, типов 1 (кривая 1), 2 (кривая 2) и 3 (кривая 3), пропитанного 10%-м водным раствором хлорида кальция

Показано, что порошкообразный перлит с размером фракций 0,5 мм, в поры которого методом пропитки инкорпорирован водный раствор хлорида кальция с концентрацией 10 масс. %, характеризуется значениями коэффициента передачи ЭМИ в диапазонах частот 0,7...3 ГГц и 3...17 ГГц, составляющими соответственно  $-2...-15$  дБ и  $-15...-30$  дБ. Увеличение с 0,5 до 3 мм размера фракций такого порошкообразного материала перлита приводит к увеличению до  $-2...-8$  дБ и  $-8...-25$  дБ значений его коэффициента передачи ЭМИ в диапазонах частот 0,7...3 ГГц и 3...7 ГГц. Это связано с уменьшением проводимости такого порошкообразного материала [2]. Установлено, что увеличение с 10 до 40 масс. % концентрации водного раствора хлорида кальция, инкорпорированного методом пропитки в поры порошкообразного перлита, не приводит к существенному изменению значений его коэффициента передачи ЭМИ в диапазоне частот 0,7...17 ГГц. Это обусловлено тем, что проводимость указанного порошкообразного материала при этом остается практически неизменной. Установлено, что значения коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне частот 0,7...17 ГГц исследованного

влажностоудержающего порошкообразного перлита типа 1 составляют –6...–10 дБ. Увеличение с 0,5 до 3 мм размера его фракций приводит к снижению до –6...–15 дБ значений его коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне частот 0,7...17 ГГц.

### Заклучение

Показано, что увеличение с 0,5 до 3 мм размера фракций порошкообразного перлита, в поры которого методом пропитки инкорпорирован водный раствор хлорида кальция с концентрацией 10 масс. %, приводит к снижению с  $17 \cdot 10^{-6}$  до  $6 \cdot 10^{-6}$  См значений проводимости такого материала, что обусловлено уменьшением значений его стабильного влагосодержания. Установлено, что увеличение с 10 до 40 масс. % концентрации водного раствора хлорида кальция, инкорпорированного методом пропитки в поры порошкообразного перлита с размером фракций 0,5...3 мм, не приводит к существенному изменению его проводимости и в связи с этим не оказывает существенного влияния на значения его коэффициента ЭМИ в диапазоне частот 0,7...17 ГГц. С использованием полученных результатов можно сделать вывод о том, что для снижения значений коэффициента передачи ЭМИ в диапазоне частот 0,7...17 ГГц конструкций электромагнитных экранов на основе порошкообразного перлита наиболее оптимальным представляется применение водного раствора хлорида кальция с концентрацией 10 масс. %. В [14] показано, что с использованием влагосодержающего порошкообразного перлита могут быть получены конструкции электромагнитных экранов, характеризующиеся низкими значениями коэффициента передачи ЭМИ в диапазоне частот от сотен мегагерц до десятков гигагерц и пониженной массой по сравнению с аналогами.

## INFLUENCE OF WATER-CONTAINING POWDERED PERLITE FRACTIONS SIZE ON IT'S CONDUCTIVITY VALUES

O.V. VOIPRAV, T.V. BORBOTKO

### Abstract

Research results of fractions size powdered perlite's, in the pores of which water solution of calcium chloride with a concentration of 10...40 wt. % is incorporated by impregnation method, on it's conductivity values are presented. Electromagnetic radiation reflection and transmission characteristics in frequency range 0.7...17 GHz of such material are analyzed.

*Keywords:* reflection and transmission coefficients, electromagnetic radiation perlite, conductivity, fraction size.

### Список литературы

1. Шаниро Д.Н. Электромагнитное экранирование. Долгопрудный, 2010.
2. Родос Л.Я. Электродинамика и распространение радиоволн. СПб, 2007.
3. Алексеев А.Г., Штагер Е.А., Козырев С.В. Физические основы технологии Stealth. СПб, 2007.
4. Уфимцев П.Я. Метод краевых волн в физической теории дифракции. М., 1962.
5. ГОСТ 10832-91. Песок и щебень перлитовые вспученные. Технические условия.
6. Водопоглощение и гигроскопичность. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://confog.org.ua/vodopogloshhenie-i-gigroskopichnost/>. – Дата доступа: 10.12.2015.
7. McNaught A.D., Wilkinson A. Standard conditions for gases. IUPAC. Compendium of Chemical Terminology. Oxford, 1997.
8. ГОСТ 24104-2001. Весы лабораторные. Общие технические требования.
9. Адрианов Р.А., Пономарев Ю.Е. Пенопласты на основе фенолформальдегидных полимеров. Ростов, 1987.
10. Афанасьев Р.А., Аканов Э.Н., Сычев В.Г. и др. Способ определения удельной электропроводности почвы / Патент РФ № 2331070.
11. Радиозащищающие модульные конструкции на основе порошкообразных материалов / Под ред. Л.М. Лынькова. Минск, 2013.
12. Сергеев Е.М. Грунтоведение. М., 1983.
13. Горонковский И.Т., Назаренко Ю.П., Некряч Е.Ф. Краткий справочник по химии. Киев, 1987.
14. Бойправ О.В., Борботько Т.В., Лыньков Л.М. // Изв. НАН Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. 2014. № 4. С. 9–13.

УДК 57.087+159.9:62

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ ВОДИТЕЛЕЙ АВТОТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ ПРИ СТРЕССЕ

О.В. ПАВЛОВСКАЯ, А.Г. ДАВЫДОВСКИЙ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь*

*Поступила в редакцию 17 декабря 2015*

Предложена концептуальная модель информационной системы оценки надежности водителей автотранспортных средств в условиях психологического стресса. Модель информационной системы включает 10 структурно-функциональных модулей и может рассматриваться как основа для разработки информационной технологии мониторинга, комплексной диагностики и прогнозирования функциональной надежности операторов автотранспортных и других человеко-машинных систем в различных сферах профессиональной деятельности.

*Ключевые слова:* надежность водителей, стресс, психофизиологические характеристики, интегральная оценка, информационная система, моделирование.

### Введение

В условиях интенсивного транспортного потока водитель подвергается значительному числу зрительных и слуховых воздействий, частота которых существенно возрастает при ситуациях, способных вызвать инциденты дорожно-транспортных происшествий (ДТП). Водитель осуществляет большое число действий по управлению автомобилем в условиях значительной информационной неопределенности и риска. Водитель является оператором системы «водитель–автомобиль–дорога–среда» (ВАДС), трудовые процессы преимущественно сводятся к операциям по приему и переработке оперативной информации, принятию решений, управляющих действий и контролю за их исполнением. Дефицит времени и необходимой информации, интенсивные и неравномерные информационные нагрузки во время управления автотранспортным средством способствуют развитию психологического стресса у водителя. При этом существенно ухудшаются важнейшие психофизиологические характеристики (ПФХ) водителя, такие как сложная двигательная реакция (СДР), характеризуемая средней продолжительностью времени реагирования (ВР), эмоциональная устойчивость (ЭУ) и устойчивость внимания (УВ) [1]. К факторам, обуславливающим возможность ДТП, наряду с другими, относятся уровень квалификации водителя, его физические и психофизиологические характеристики. При этом исключительно важное значение имеет время реакции водителя, являющееся интегральным показателем состояния зрительно-моторной системы. Большое время реакции увеличивает риск возникновения ДТП, что может повлечь за собой как экономические потери, так и человеческие жертвы [2]. В настоящее время отсутствуют исследования взаимосвязи основных характеристик психофизиологического состояния операторов транспортных средств при реализации деятельности в условиях стресса.

Целью исследования является обоснование концептуальной модели информационной системы оценки надежности (ИСОН) водителей автотранспортных средств в условиях психологического стресса на основе анализа результатов исследования комплекса психофизиологических характеристик.

## Методика эксперимента

Объектами исследования были 20 человек в возрасте от 18 до 57 лет. Все участники были заранее проинформированы о цели и содержании исследования. Для исследования психофизиологических характеристик ВР, ЭУ и УВ был использован аппаратно-программный комплекс (универсальный психодиагностический комплекс (АПК УПДК), производства ЗАО «Нейроком» (РФ). В настоящее время УПДК широко применяется для психофизиологического тестирования курсантов автошкол, а также оценки профессиональной надежности водителей автотранспортных средств [3].

При мониторинге психофизиологических характеристик на данном комплексе для измерения сложной двигательной реакции, представленной в виде среднего времени реагирования, были использованы оценки временных интервалов от момента предъявления одинаковых геометрических фигур до нажатия на кнопку, а также продолжительность реагирования от момента предъявления совпадающих слуховых стимулов до нажатия на кнопку.

Уровень распределения внимания был оценен с помощью предъявления стимульных полей на экране компьютера с последующим определением реагирования на стимульное поле заданного типа.

Эмоциональная устойчивость была оценена на основе предъявления зрительных стимулов и искусственно созданных слуховых помех, после чего осуществлялась регистрация времени реагирования на зрительный стимул и число ошибок его распознавания.

Результаты исследования были обработаны статистически с использованием коэффициента ранговой корреляции Спирмена с помощью электронного процессора MS Excel 2010. Корреляционный анализ, проведенный на основании настоящего исследования, позволил определить влияние некоторых психофизиологических показателей на сложную двигательную реакцию управляющего транспортным средством [4].

Время реакции (ВР) – интервал времени между моментом появления сигнала и окончанием ответного действия. Оно включает промежуток времени, необходимый водителю для приема, переработки информации и ответного действия, поэтому, зная его, можно оценить основные психофизиологические качества водителя. ВР может изменяться по мере приобретения профессионального опыта в процессе тренировки. Оно состоит из двух периодов: латентного (скрытого), который затрачивается на восприятие сигнала и принятие решения и двигательного компонента, измеряемого временем движения. Среднее время латентного периода простой реакции на свет составляет 0,2 с, на звук 0,14 с. Среднее время двигательного периода простой реакции колеблется в зависимости от возраста, физического состояния и колеблется от 0,5 до 2,0 с, сложной – от 1,0 до 2,6 с. Время латентного периода сложной реакции изменяется в широких пределах и зависит от множества факторов, в том числе от индивидуальных психофизиологических свойств, опыта водителя и характера ДТС. Для одного и того же водителя время латентного периода на один и тот же сигнал изменяется в зависимости от степени неожиданности сигнала. Время моторного периода зависит от сложности выполняемого действия, возраста водителя, а также от степени неожиданности сигнала. Так, среднее время моторного периода простой реакции на красный сигнал в возрасте от 18 до 22 лет более, чем в два раза выше, чем в возрасте 45–60 лет [5].

Важнейшими качествами внимания, необходимыми водителю автомобиля, являются устойчивость, концентрация, объем, распределение и переключение. Устойчивость внимания (УВ) — это способность сосредоточиться в процессе работы в течение длительного времени. УВ определяется временем, в течение которого его интенсивность (напряженность) остается неизменной [6]. С УВ тесно связано такое его качество, как концентрация – сосредоточение внимания на одном только объекте с одновременным отвлечением от всего остального. У водителя автомобиля такая концентрация внимания может быть в течение незначительных промежутков времени, например, при проезде пешеходных переходов, остановок общественного транспорта, железнодорожных переездов, при встречном разъезде, на мостах, в тоннелях и пр. [7].

Устойчивость внимания сочетается и с такой динамической особенностью, как переключение внимания, которое характеризуется объемом работы в единицу времени;

точностью работы (ее безошибочность или наличие ошибок переключения), в которой проявляется тормозящее влияние предыдущей деятельности [8]. В свою очередь, переключение внимания характеризуется уровнем распределения внимания, свойством, обуславливающим успешность одновременного выполнения двух или более видов деятельности [9].

### Результаты и их обсуждение

Увеличение количества ситуаций в транспортном потоке, требующих использования сложных двигательных реакций (СДР) и моторных стереотипов, неизбежно сопровождается увеличением частоты ошибочных действий и снижением надежности профессиональной деятельности водителя. Сложная двигательная реакция водителя имеет сильное прямое влияние на количество правильных реагирований при отсутствии сигнала (распределение внимания водителя) ( $r = 0,68$  при  $p \leq 0,05$ ), т.е. чем большее количество ошибок склонен совершать водитель при СДР, тем эффективнее его реакция в отсутствие зрительного сигнала в ситуации, требующей высокого распределения внимания. Установлено, что СДР, представленная в виде среднего времени реагирования при усложнении деятельности, выражается в увеличении количества ошибочных моторных реакций, а также продолжительности принятия управленческих решений.

В исследовании показано, что количество ошибок при усложнении двигательной реакции, допущенных испытуемыми при выполнении заданий, обратно пропорционально количеству правильных реагирований на зрительный стимул при распределении внимания ( $r = -0,63$  при  $p \leq 0,05$ ). Это указывает на возможность увеличения правильных действий в условиях СДР при отсутствии визуальных и аудиальных стимулов, что является фактором повышения надежности деятельности водителя в транспортном потоке.

Вместе с тем, увеличение среднего времени реагирования водителя автотранспортного средства в СДР сопровождается возрастанием показателя распределения внимания водителя при усложнении деятельности ( $r = 0,62$  при  $p \leq 0,05$ ). Это позволяет предположить, что на основе анализа динамики среднего времени реагирования в СДР можно прогнозировать надежность деятельности водителя автотранспортного средства в сложных дорожных ситуациях, сопровождающихся развитием состояния психологического стресса. ВР и количество ошибочных действий являются количественными критериями для оценки надежности деятельности водителя в условиях психологического стресса в сложных транспортных ситуациях.

Показана корреляционная связь ( $r = 0,75$  при  $p \leq 0,05$ ) между временем выбора в сложной двигательной реакции и показателем уровня эмоциональной устойчивости – среднеарифметическим временем реагирования без помехи. В отсутствие помех возрастает уровень ЭУ при закономерном уменьшении времени выбора СДР.

Это позволяет предположить, что на основе анализа времени, необходимого для совершения перехода от простой к более сложной моторной деятельности, можно оценить продолжительность адаптации к дорожной ситуации и уровень достижения состояния ЭУ при воздействии факторов, вызывающих развитие психологического стресса и требующих быстрой моторной реакции.

Таким образом, полученные результаты исследования свидетельствуют о целесообразности исследования избранных психофизиологических характеристик сложной двигательной реакции, представленной в виде среднего времени реагирования (ВР), УВ и ЭУ для оценки надежности водителя автотранспортного средства в условиях стресса. Параметры ВР, УВ и ЭУ являются эффективными количественными критериями для использования в информационной системе оценки и прогнозирования надежности деятельности водителя в ситуациях управления автотранспортным средством в условиях психологического стресса.

## Концептуальная модель информационной системы оценки надежности водителей автотранспортных средств

На основе результатов эмпирических исследований ПФХ водителей автотранспортных средств были выделены важнейшие количественные критерии для оценки функциональной и профессиональной надежности водителей, а также предложена концептуальная модель управления надежностью водителей, включающая интегрированную систему параметров психофизиологического состояния человека в системе ВАДС:

$$P_{\text{ВАДС}} = \{ \text{ЭУ, УВ, ВР, А, Д, С, } t, m \}, \quad (1)$$

где УВ – устойчивость внимания, ЭУ – эмоциональная устойчивость, ВР – время реакции, А – множество технических характеристик автомобиля, оказывающих влияние на психофизиологическое состояние водителя, Д – характеристики дорожного движения (плотность и интенсивность транспортного потока, частота остановок, средняя скорость движения), С – состояние среды (климатические характеристики, время суток),  $t$  – профессиональный стаж водителя,  $m$  – множество каналов идентификации психофизиологического состояния водителя.

Как свидетельствует анализ литературных и экспериментальных данных, показатели УВ, ЭУ и ВР относятся к числу универсальных ПФХ, на основе которых может быть осуществлена текущая и прогностическая оценка функциональной и профессиональной надежности водителей автотранспортных средств. На основе комплекса выше названных показателей предложена концептуальная схема информационной системы оценки надежности (ИСОИ) водителей, включающая ряд нижеследующих модулей.

1. Модуль многоканального сбора данных о текущем психофизиологическом состоянии водителей, проходящих профессиональный отбор с помощью АПК УПДК.

2. Модуль дифференциальной обработки и хранения промежуточных результатов психофизиологического исследования в «базе данных текущего мониторинга» (БДТМ), содержащей результаты мониторинга текущего психофизиологического состояния исследуемых водителей (например, при профотборе или контроле перед выездом на маршрут), а также в «референтной базе данных» (РБД), содержащей ПФП водителей со значительным профессиональным стажем и высокими показателями функциональной и профессиональной надежности, принятыми в качестве эталона сравнения.

3. Модуль сравнительного мультипараметрического анализа текущего состояния исследуемых водителей из БДТМ в сравнении с РБД.

4. Модуль расчета дискриминантов  $D_i$  количественной оценки вероятности изменения функционального состояния для каждого  $i$ -го ПФП ( $x_i$ ) по формуле:

$$D_i = \frac{(x_i - x_{\min})(x_i - x_{\max})}{x_{\min} x_{\max}}, \quad (2)$$

где  $D_i$  позволяет соотнести изменения каждого из количественно измеряемых показателей ПФХ  $x_i$  по отношению к минимальному ( $x_{\min}$ ) и максимальному ( $x_{\max}$ ) значениям диапазона соответствующего показателя из РБД. При этом  $D_i$  является удобным маркером для оценки риска снижения функциональной надежности водителей. Если ПФХ находится в пределах нормы ( $x_{\min} < x_i < x_{\max}$ ), то  $D_i < 0$  и вероятность функциональной надежности довольно высока. Если величина ПФП выходит за пределы нормы ( $x_i < x_{\min}$ , или  $x_i > x_{\max}$ ), то  $D_i \gg 0$  и функциональная надежность водителя нелинейно снижается по мере увеличения  $D_i(x_i)$ .

5. Модуль анализа функциональной надежности ( $FR$  – functional reliability) водителя относительно параметров  $D_i$  на основе модели, представленной уравнениями:

$$\frac{dFR(D_i)}{dD_i} = FR(D_i)[1 - FR(D_i)], \quad (3)$$

а после интегрирования:

$$FR(D_i) = \frac{\exp(D_i)}{1 + \exp(D_i)}. \quad (4)$$

6. Модуль интегральной оценки функциональной надежности (ИОФН) водителей на основе «векторной модели», рассматривающей надежность как вектор в гиперпространстве многих параметров:

$$\text{ИОФН} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i \sqrt{\prod_{i=1}^n (Z_i - Y_i)^{m_i}}}{\sum_{i=1}^n m_i \sqrt{\prod_{i=1}^n (Y_i^2)^{m_i}}}, \quad (5)$$

где  $Z_i$  –  $i$ -й ПФП из БДТМ,  $Y_i$  –  $i$ -й ПФХ из РБД,  $m_i$  – удельно-весовой коэффициент  $i$ -го показателя.

7. Модуль интегральной оценки функциональной надежности на основе модифицированной шкалы «функции желательности» Харрингтона, задаваемая уравнением:

$$FR = \exp(-\exp(-X)), \quad (6)$$

где  $X = \sqrt{\sum_{i=1}^n (Z_i - Y_i)^2}$ . При этом  $[-2 \leq X \leq 5]$ , а шкала желательности рассматривается в диапазоне (0; 1) и содержит пять интервалов функциональной надежности водителей: (0; 0,2) – «очень низкая», (0,2; 0,37) – «низкая», (0,37; 0,63) – «средняя», (0,63; 0,8) – «высокая», (0,8; 1) – «очень высокая». Причем точка 0,37 на шкале Харрингтона является точкой «перехода» из зоны средней функциональной надежности в зону низкой надежности и высокой вероятности совершения ДТП [10].

Конкретные параметры функциональной надежности водителя определяются в масштабе, задаваемом требованиями нормировки, на участке эффективных значений показателей. Полученное значение для каждого  $i$ -го параметра функционального состояния водителя пересчитывается в обобщенный коэффициент желательности функциональной надежности

$$K_{FR} = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n Y_i}, \quad (7)$$

где  $n$  – количество используемых показателей параметров сравнения для оценки  $FR$ .

8. Модуль прогнозирования динамики индивидуальной функциональной надежности каждого водителя на основе сценарного подхода, включающего формирование и анализ трех сценариев с помощью уравнений (1)–(7):

- пессимистического (функциональная надежность в диапазоне  $0,0 \leq FR < 0,37$ ),
- базового ( $0,37 \leq FR < 0,63$ ) и
- оптимистического ( $0,63 \leq FR < 1,0$ ).

9. Модуль формирования рекомендаций по индивидуальной оптимизации функциональной надежности водителей на основе анализа БДТМ и РБД.

10. Модуль «тренирующего обучения» для повышения функциональной надежности водителей автотранспортных средств на основе инструментального средства УПДК.

### Заключение

Анализ полученных результатов позволил предложить и обосновать концептуальную модель ИСОН водителей автотранспортных средств в условиях психологического стресса, включающую 10 структурно-функциональных модулей и обеспечивающую повышение эффективности оценки результатов объективного исследования испытуемых с помощью АПК УПДК. При этом возможно существенное сокращение времени тестирования при исключении утомления испытуемого. В дальнейшем на основе предложенной модели ИСОН может быть разработана высокоэффективная информационная технология мониторинга, комплексной диагностики и прогнозирования функциональной надежности операторов автотранспортных и других человеко-машинных систем в различных сферах профессиональной деятельности.

# THE MODELING OF INFORMATION SYSTEM FOR RELIABILITY ASSESSMENT OF MOTOR VEHICLES DRIVERS UNDER STRESS

O.V. PAVLOVSKAYA, A.G. DAVIDOVSKIJ

## Abstract

A conceptual model of the information system reliability assessment of motor vehicle drivers under conditions of psychological stress is proposed. The model of the information system includes 10 structural-functional modules and can be considered as the basis for the development of information technology monitoring, comprehensive diagnostics and prediction of functional reliability of operators, vehicles and other man-machine systems in various fields of professional activity.

*Keywords:* assessment of drivers, stress, physiological characteristics, integrated assessment, information system, modeling.

## Список литературы

1. *Котик М.А.* Психология и безопасность: учеб. для вузов. СПб, 1998.
2. *Ермаков Ф.Х.* Технические особенности расследования и установления причин ДТП. Казань, 2007.
3. *Пейсахов Н.М., Кашин А.П., Баранов Г.Г. и др.* Методы и портативная аппаратура для исследования индивидуально-психологических различий человека. Казань, 1976.
4. *Сидоренко Е.В.* Методы математической обработки в психологии: учеб. пособие. СПб, 2007.
5. *Макланов А.Г.* Общая психология: учеб. пособие. СПб, 2002.
6. *Давыдов В.В., А.В. Запорожец А.В., Ломов Б.Ф. и др.* Психологический словарь. М., 1983.
7. *Титченер Э.* Хрестоматия по вниманию. М., 1976.
8. *Страхов И.В.* Внимание и структура личности. Саратов, 1969.
9. *Клебельсберг Д.* Транспортная психология. М., 1989.
10. *Пичкалев А.В.* Применение кривой желательности Харрингтона для сравнительного анализа автоматизированных систем контроля // Вестник КГТУ. 1997. С. 128–132.

УДК 621.315.592; 544.653

## ФОРМИРОВАНИЕ НАНОКОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ И ОКСИДА ЦИНКА ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

А.И. ШЕРСТНЁВ, Е.Б. ЧУБЕНКО, С.В. РЕДЬКО, В.А. ПЕТРОВИЧ,  
В.А. ПИЛИПЕНКО\*, В.П. БОНДАРЕНКО

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь*

*\*НПЦ «Белмикросистемы» ОАО «Интеграл»  
Корженевского, 12, Минск, 220108, Беларусь*

*Поступила в редакцию 16 ноября 2015*

Приведены результаты исследований процесса электрохимического осаждения оксида цинка в упорядоченные матрицы пористого кремния, сформированные в импульсном гальваностатическом режиме. Установлены закономерности роста нанокристаллов оксида цинка в зависимости от параметров электрохимического осаждения: плотности катодного тока, состава электролита, продолжительности процесса. Исследованы структурные и оптические свойства полученных нанокомпозитов пористый кремний/оксид цинка.

*Ключевые слова:* пористый кремний, оксид цинка, нанокомпозитный материал, электрохимическое осаждение, фотолюминесценция.

### Введение

Оксид цинка (ZnO) представляет собой широкозонный полупроводниковый материал, имеющий при комнатной температуре ширину запрещенной зоны 3,37 эВ [1]. В настоящее время проводятся активные исследования наноразмерных структур из ZnO – наночастиц, нанонитей, нанолент [2]. Прямозонная структура энергетических зон и устойчивая люминесценция наноструктур из ZnO при комнатной температуре позволяют использовать данный материал в светоизлучающих устройствах и фотодетекторах [3, 4]. Одним из способов получения массива наноструктур из ZnO является использование упорядоченных матриц пористого кремния (ПК), в которых диаметр пор задает размеры формируемых структур ZnO. Такие нанокompозитные материалы на основе ПК и ZnO могут использоваться в качестве источников белого света [5], а также в качестве газовых сенсоров [6]. Заполнение пор ПК осаждаемым материалом зависит от структуры ПК и морфологии стенок пор, которые определяют конфигурацию областей пространственного заряда в полупроводниковом скелете ПК и пути протекания тока в нем [7]. Так, при использовании мезо-ПК с разветвленной структурой каналов пор, локальные сужения пор могут быть перекрыты формирующимися частицами ZnO, которые препятствуют дальнейшему осаждению материала в глубине пористой матрицы. Это приводит к преимущественному росту кристаллов ZnO на поверхности ПК [8]. Использование упорядоченных матриц ПК с однородными порами, направленными перпендикулярно поверхности, и имеющими гладкие стенки, может предотвратить преждевременное перекрытие каналов пор частицами ZnO и позволить добиться более полного заполнения матрицы ПК. Формирование таких матриц ПК может быть осуществлено методом импульсного электрохимического анодирования [9].

Осаждение ZnO в матрицы ПК может быть реализовано различными методами, одним из которых является электрохимическое осаждение. В данном методе среда, из которой

происходит осаждение полупроводникового соединения, может проникать в глубину пористой структуры, что должно способствовать увеличению коэффициента заполнения ПК. Однако при электрохимическом осаждении ZnO из обычных водных растворов солей цинка происходит образование гидроксидов ионов [10], при нагреве электролита вызывающих химическое растворение скелета ПК. Поэтому для того, чтобы избежать разрушения пористой матрицы, необходимо использовать безводные растворы на основе диметилсульфоксида (ДМСО) [11].

Целью настоящей работы являлось исследование процесса формирования электрохимическим методом нанокompозитных материалов на основе ПК и ZnO и изучение их структурных и оптических свойств.

### Методика проведения экспериментов

Для проведения экспериментов использовались пластины монокристаллического кремния электронного типа проводимости марки КЭС-0,01 с кристаллографической ориентацией (100). Выбор пластин данного типа обусловлен двумя причинами. Во-первых, использование пластин кремния с высокой проводимостью (удельное сопротивление 0,01 Ом·см) обеспечивает равномерное распределение тока анодирования по пластине, что позволяет получать однородные слои ПК. Во-вторых, кремний электронного типа проводимости, благодаря высокой концентрации электронов, лучше подходит для электрохимического осаждения в него различных материалов.

Поверхность кремниевых пластин очищалась в насыщенном растворе оксида хрома в концентрированной серной кислоте. После этого пластины длительное время промывались в дистиллированной воде. Слой естественного оксида кремния удалялся с поверхности пластин в 4,5%-м водном растворе фтористоводородной кислоты (HF). Формирование упорядоченных матриц ПК проводилось в 9%-м водном растворе HF в режиме импульсного электрохимического анодирования с контролем тока [8] при плотности тока прямого импульса 120 мА/см<sup>2</sup>. Для электрохимического осаждения ZnO использовалась двухэлектродная фторопластовая ячейка с горизонтальным размещением рабочего электрода. В качестве источника тока использовался потенциогальваностат Metrohm Autolab PGSTAT302N; ZnO осаждался в гальваностатическом режиме при плотностях тока 0,1–0,5 мА/см<sup>2</sup> при температуре электролита 100 °С. В качестве электролита использовались безводные растворы на основе диметилсульфоксида (ДМСО), содержащие 0,03 М хлорида цинка ZnCl<sub>2</sub> и 0,1 М хлорида калия KCl (далее «базовый раствор»). В базовый раствор в некоторых случаях также дополнительно вводились полиоксиэтилен (ПОЭ) и пероксид водорода H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. После завершения процесса электрохимического осаждения ZnO образцы последовательно промывались в дистиллированной воде и изопропиловом спирте, и затем сушились в потоке теплого воздуха.

Исследование морфологии и структуры полученных образцов нанокompозитных материалов ПК/ZnO проводилось методом сканирующей электронной микроскопии на микроскопе Hitachi S-4800. Состав полученных структур определялся методом рентгеновского микроанализа на анализаторе Bruker QUANTAX 200. Для исследования спектров фотолюминесценции использовалась установка на основе монохроматора Solar ТП MS 7504i. Возбуждение фотолюминесценции осуществлялось при помощи ксеноновой лампы мощностью 1 кВт. Для выделения монохроматических линий из широкого спектра лампы использовался монохроматор Solar ТП DM 160. Спектры регистрировались цифровой камерой с охлаждаемой кремниевой ПЗС-матрицей. Возбуждение фотолюминесценции для всех образцов структур ПК/ZnO осуществлялось монохроматическим светом с длиной волны 340 нм. Измерения проводилось при температуре 20 °С.

### Результаты и их обсуждение

Электронные микрофотографии поперечного скола образцов нанокompозитов, полученных электрохимическим осаждением ZnO в ПК в базовом растворе в течение 60 мин, представлены на рис. 1. В данном процессе формирование частиц ZnO происходило по всей толщине матрицы ПК, при этом при плотности катодного тока 0,3 мА/см<sup>2</sup> (рис. 1, а–в) количество сформированных частиц ZnO было больше, чем при плотности тока 0,5 мА/см<sup>2</sup>

(рис. 1, *з-е*). Это может быть связано с тем, что при больших плотностях тока ZnO формируется в виде частиц большего размера, которые закрывают входные отверстия пор, тем самым препятствуя дальнейшему проникновению раствора электролита в глубину ПК и, как следствие, формированию в них новых частиц. Для уменьшения концентрации частиц ZnO, осаждающихся на поверхность и в приповерхностном слое матрицы ПК, в раствор осаждения могут быть введены различные ингибиторы реакций, протекающих на поверхности ПК. В данной работе для этого был использован ПОЭ. Адсорбция молекул ПОЭ на поверхности слоя ПК должна приводить к замедлению реакции электрохимического осаждения ZnO и уменьшению количества и размера формирующихся в приповерхностной области частиц ZnO. Было предположено, что в процессе осаждения полупроводникового соединения это позволит входным отверстиям пор оставаться открытыми в течение более продолжительного промежутка времени, что должно привести к увеличению коэффициента заполнения пор осаждаемым веществом.

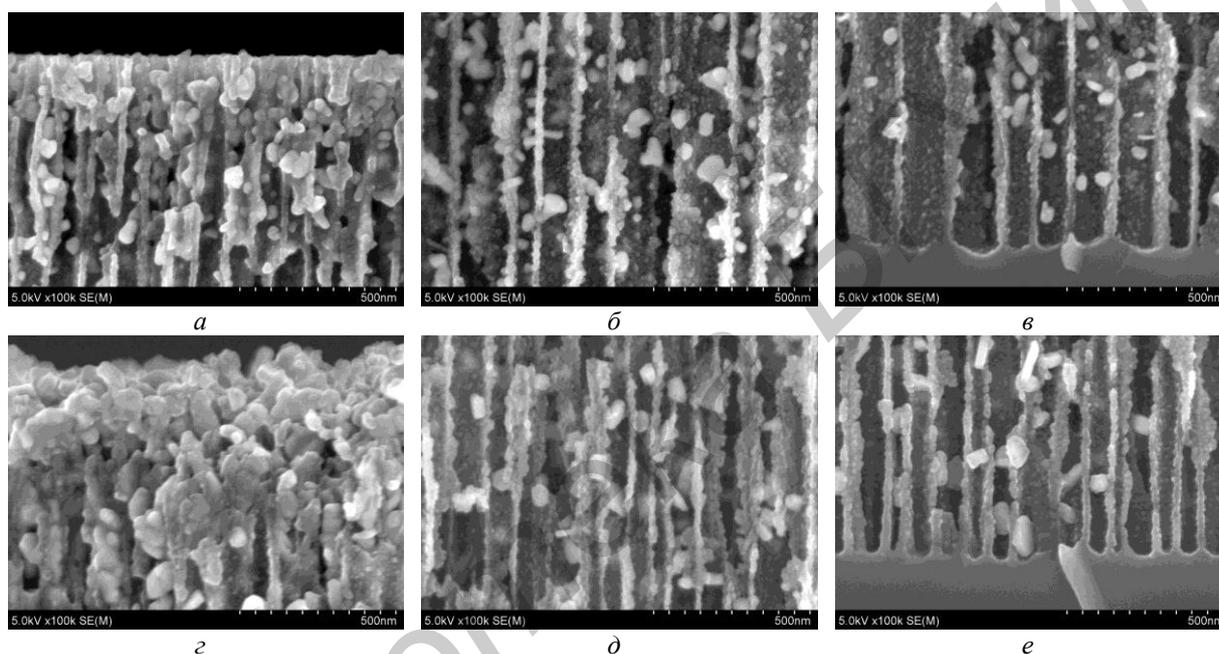


Рис. 1. Микрофотографии поперечного скола приповерхностной области (*а, з*), середины (*б, д*) и донной области (*в, е*) нанокompозитных структур ПК/ZnO, сформированных в базовом растворе при плотности катодного тока: *а, в* – 0,3 мА/см<sup>2</sup>; *з, д, е* – 0,5 мА/см<sup>2</sup>

На рис. 2 представлены электронные микрофотографии поперечного скола образцов нанокompозитных структур на основе ПК и ZnO, полученных при осаждении в течение 60 мин ZnO из базового раствора, но с добавлением 0,01 г/л ПОЭ. В соответствии со сделанным предположением, добавление ПОЭ в базовый раствор позволило уменьшить количество частиц ZnO, формирующихся на поверхности и в приповерхностном слое ПК. Это способствовало лучшей, по сравнению с использованием базового раствора, циркуляции ионов в электролите вдоль каналов пор по всей глубине слоя ПК во время проведения процесса электрохимического осаждения.

По данным рентгеновского микроанализа при использовании базового раствора, в том числе и с добавлением ПОЭ, осажденные в ПК частицы ZnO имели нестехиометрический состав. Так, при плотности катодного тока 0,3 мА/см<sup>2</sup> концентрация цинка в них составляла 60,99 ат.%, кислорода – 39,01 ат.%. Избыток цинка в осадке указывает на недостаточное количество кислорода в растворе. Для увеличения концентрации кислородсодержащих ионов в базовый раствор с ПОЭ был дополнительно введен H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> в количестве 5 мМ. На рис. 3 представлены электронные микрофотографии поперечного скола образцов нанокompозитных структур на основе ПК и ZnO, сформированные осаждением ZnO в течение 60 мин из базового раствора с добавлением ПОЭ и H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. На фотографиях, приведенных на рис. 3, видно, что в данном случае формирование частиц ZnO также происходило по всей толщине пористой матрицы.

Рентгеновский микроанализ образцов, полученных в базовом растворе с добавлением ПОЭ и  $H_2O_2$  показал, что соотношение цинка и кислорода в нанокompозитном материале ZnO/ПК, полученном при плотности катодного тока  $0,5 \text{ mA/cm}^2$ , составляет 37,18 к 62,82 ат.%. Избыток кислорода обусловлен частичным окислением кремниевых кристаллитов, составляющих скелет матрицы ПК.

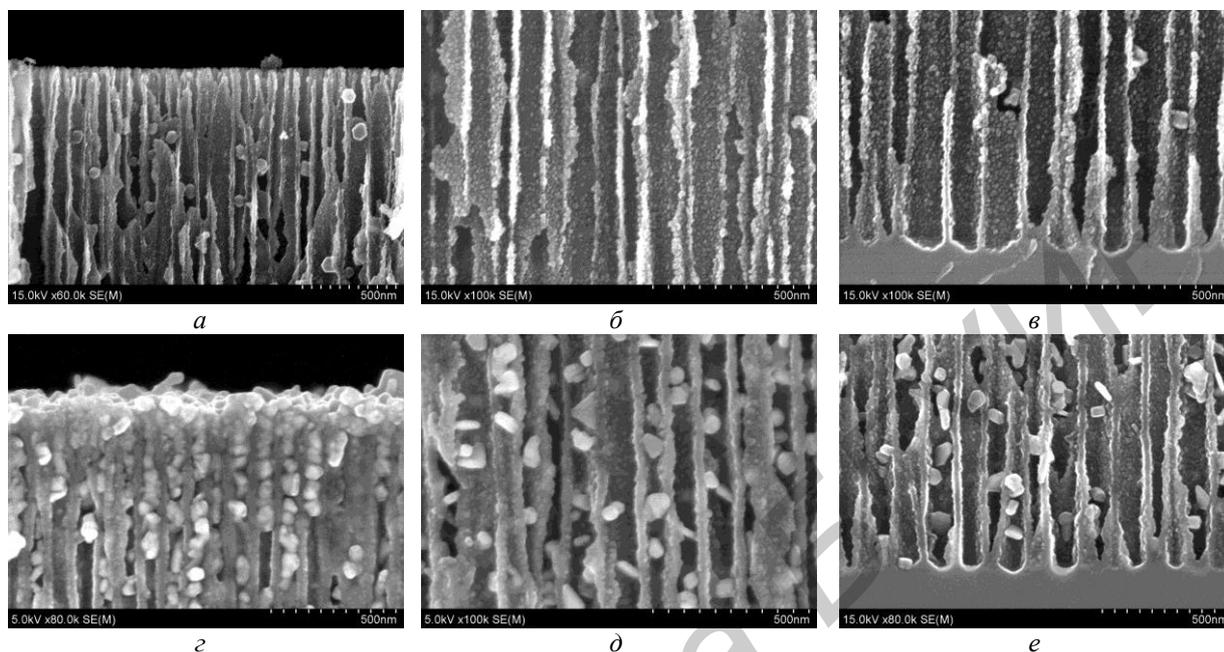


Рис. 2. Микрофотографии поперечного скола приповерхностной области (а, г), середины (б, д) и донной области (в, е) нанокompозитных структур ПК/ZnO, сформированных в базовом растворе с добавлением ПОЭ при плотности катодного тока: а, б, в –  $0,1 \text{ mA/cm}^2$ ; г, д, е –  $0,5 \text{ mA/cm}^2$

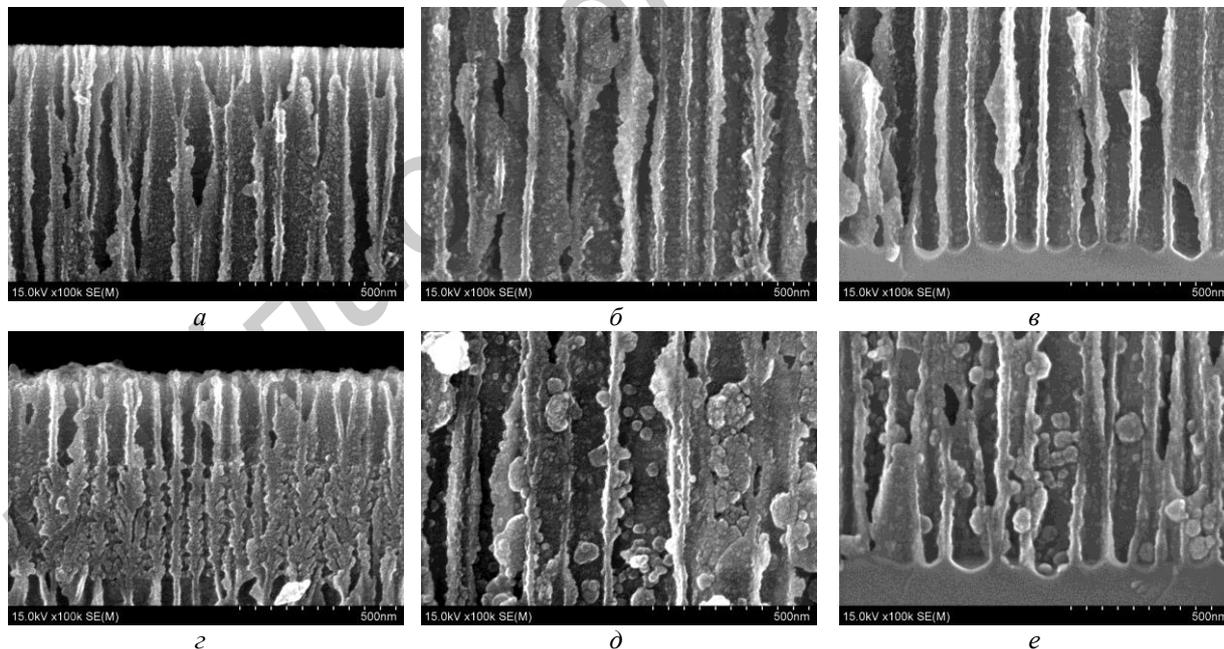


Рис. 3. Микрофотографии поперечного скола приповерхностной области (а, г), середины (б, д) и донной области (в, е) нанокompозитных структур ПК/ZnO, сформированных в базовом растворе осаждения с добавлением ПОЭ и  $H_2O_2$  при плотности катодного тока: а, б, в –  $0,1 \text{ mA/cm}^2$ ; г, д, е –  $0,5 \text{ mA/cm}^2$

Увеличение продолжительности процесса осаждения ZnO из базового раствора с добавлением ПОЭ и  $H_2O_2$  при сохранении постоянной плотности тока приводит к образованию большего количества кристаллов полупроводникового соединения в глубине пористой матрицы и увеличению их размера (рис. 4). Было установлено, что коэффициент заполнения пор матрицы ПК и продолжительность процесса осаждения ZnO (рис. 5) связаны нелинейной

зависимостью. При большой продолжительности процесса наблюдается насыщение коэффициента заполнения, то есть замедление процесса роста частиц ZnO в глубине слоя ПК. Оно обусловлено постепенным перекрытием входных отверстий каналов пор растущими на поверхности и в приповерхностном слое ПК частицами ZnO. При увеличении времени осаждения должно произойти полное перекрытие входных отверстий каналов пор и процесс заполнения матрицы ПК прекратится. Предполагается, что большие значения коэффициента заполнения пористой матрицы частицами ZnO могут быть получены при увеличении концентрации ПОЭ в электролите.

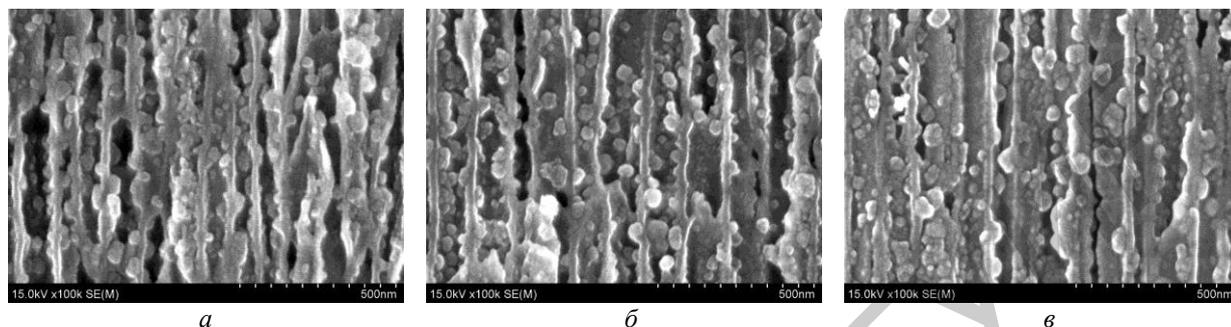


Рис. 4. Микрофотографии поперечного скола средней части слоев нанокompозита ПК/ZnO, сформированных в базовом растворе осаждения с добавлением ПОЭ и H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> при плотности катодного тока 0,3 мА/см<sup>2</sup> и продолжительности процесса осаждения: а – 120 мин; б – 180 мин; в – 240 мин

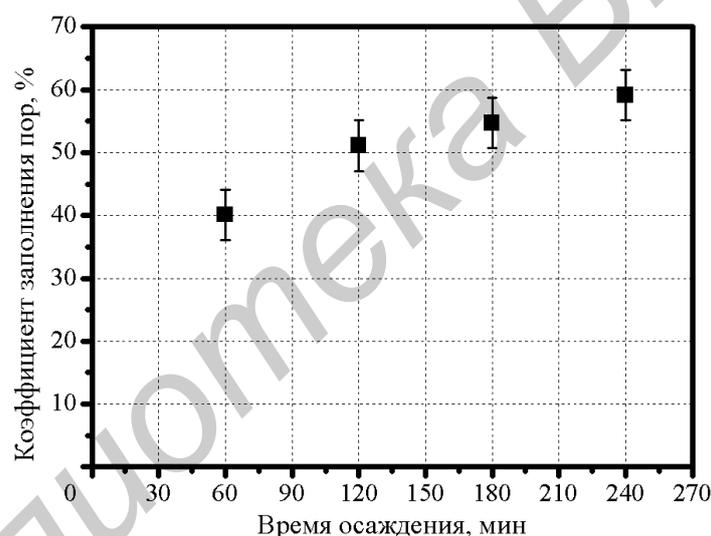


Рис. 5. Изменение коэффициента заполнения пор ПК в зависимости от продолжительности процесса осаждения ZnO при плотности катодного тока 0,3 мА/см<sup>2</sup>

Диаметр частиц ZnO, сформированных в течение одинакового промежутка времени, связан с плотностью катодного тока линейной зависимостью в соответствии с электрохимическим законом Фарадея (рис. 6).

На спектрах фотолюминесценции нанокompозитных структур ПК/ZnO, полученных при осаждении ZnO в базовом растворе с добавлением ПОЭ и H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> в течение различных промежутков времени при одинаковой плотности тока, видны полосы фотолюминесценции, связанные с кислородными дефектами кристаллической решетки ZnO (рис. 7). Спектр фотолюминесценции исходной матрицы ПК имеет максимум в более длинноволновой области спектра на длине волны 850 нм. После осаждения ZnO фотолюминесценция ПК полностью исчезает из-за пассивации поверхности ПК и замещения групп Si-H связями Si-O. Образование последних подтверждается данными рентгеновского микроанализа, который показывает избыточную концентрацию кислорода в структурах ПК/ZnO по отношению к цинку. Избыток кислорода может быть связан с образованием оксида кремния в процессе электрохимического осаждения ZnO.

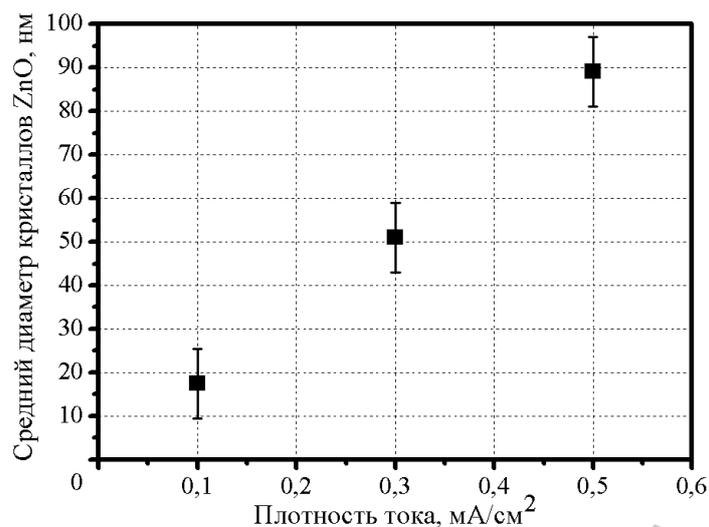


Рис. 6. Зависимость размеров частиц ZnO при одинаковой продолжительности процесса осаждения (60 мин) от плотности катодного тока

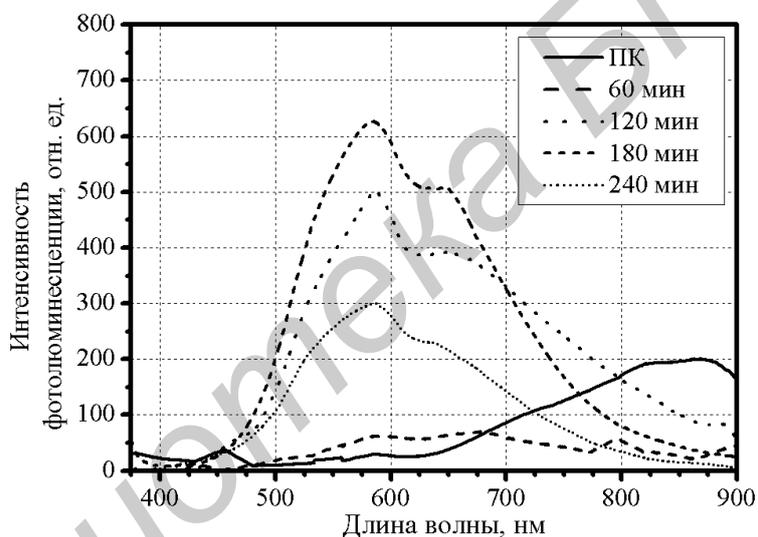


Рис. 7. Спектры фотолюминесценции нанокompозитов ПК/ZnO

Максимумы полос фотолюминесценции ZnO расположены в области 580 нм и 650 нм. Данные полосы обусловлены излучательными переходами электронов через энергетические уровни в запрещенной зоне ZnO, наличие которых связано с вакансиями атомов кислорода в узлах кристаллической решетки и междуузельными атомами кислорода [5, 12]. Было установлено, что интенсивность пиков возрастает с увеличением продолжительности процесса осаждения, что связано с формированием большего количества ZnO на поверхности ПК.

### Заключение

В настоящей работе проведены исследования процесса электрохимического формирования нанокompозитных материалов на основе упорядоченных матриц ПК и ZnO. Изучено влияние состава электролита, электрических параметров и продолжительности процесса осаждения на коэффициент заполнения ПК частицами ZnO. Показано, что введение в состав электролита ингибиторов реакций, таких как ПОЭ, приводит к более медленному формированию ZnO на поверхности и в приповерхностной области ПК. Это способствует увеличению коэффициента заполнения матрицы ПК частицами полупроводникового соединения. Однако нелинейное изменение коэффициента заполнения ПК частицами ZnO в

зависимости от продолжительности процесса показывает, что через определенный промежуток времени входные отверстия каналов пор все равно будут перекрыты растущими частицами ZnO еще до полного заполнения матрицы ПК. Максимальная достигнутая величина коэффициента заполнения пор составила величину около 60 %. При уменьшении плотности тока скорость роста частиц ZnO в глубине пор ПК пропорционально уменьшается, т.е. уменьшается средний диаметр частиц, сформированных в течение одинакового промежутка времени. Добавление H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> в раствор электролита в качестве источника кислорода способствует более полному окислению осаждающегося цинка и формированию ZnO с составом, близким к стехиометрическому. Образцы нанокompозитного материала ПК/ZnO демонстрируют полосы фотолюминесценции с максимумами около 580 и 650 нм, обусловленные вакансиями и междоузельными атомами кислорода в кристаллической решетке ZnO. Полученные нанокompозитные материалы могут быть использованы в фотовольтаических приборах и источниках света видимого диапазона.

*Данная работа выполнялась в рамках задания 2.4.16 ГПНИ Республики Беларусь «Функциональные и композитные материалы, наноматериалы» и гранта министерства образования Республики Беларусь.*

*Авторы выражают благодарность Цыбульскому В.В. за помощь в проведении исследований образцов методом сканирующей электронной микроскопии и рентгеновского микроанализа.*

## **FORMATION OF NANOCOMPOSITE MATERIALS BASED ON POROUS SILICON AND ZINC OXIDE BY ELECTROCHEMICAL TECHNIQUE**

A.I. SHERSTNYOV, E.B. CHUBENKO, S.V. REDKO, V.A. PETROVICH,  
V.A. PILIPENKO, V.P. BONDARENKO

### **Abstract**

The results of electrochemical deposition of zinc oxide into ordered porous silicon matrix, formed in a pulsed galvanostatic mode, are presented. Correlations between zinc oxide nanocrystals growth and electrochemical deposition parameters, such as cathode current density, electrolyte composition, process duration were determined. Structural and optical properties of porous silicon/zinc oxide nanocomposites were studied.

*Keywords:* porous silicon, zinc oxide, nanocomposite material, electrochemical deposition, photoluminescence.

### **Список литературы**

1. Özgür Ü., Alivov Ya.I., Liu C. et al. // Appl. Phys. Rev. 2005. Vol. 98. P. 1–103.
2. Wang Z.L. // Materials Today. 2004. Vol. 7. P. 26–33.
3. Qiao Q., Li B.H., Shan C.X. et al. // Mater. Lett. 2012. Vol. 74. P. 104–106.
4. Law J.B., Thong J.T. // Appl. Phys. Lett. 2006. Vol. 88. P. 1–4.
5. Singh R.G., Singh F., Agarwal V. et al. // Phys. D: Appl. Phys. 2007. Vol. 40. P. 3090–3093.
6. Yan D., Hu M., Li Sh. Et al. // Electrochim. Acta. 2014. Vol. 115. P. 297–305.
7. Hamilton B. // Semicond. Sci. Technol. 1995. Vol. 10. P. 1187–1207.
8. Balucani M., Nenzi P., Chubenko E. et al. // Nanopart. Res. 2011. Vol. 13. P. 5985–5997.
9. Чубенко Е.Б., Редько С.В., Шерстнев А.И. и др. // Докл. БГУИР. 2015. № 3 (89). С. 11–17.
10. Yoshida T., Komatsu D., Shimokawa N. et al. // Thin Solid Films. 2004. Vol. 451–452. P. 166–169.
11. Gomez H., Riveros G., Ramirez D. et al. // Solid State Electrochem. 2012. Vol. 16. P. 197–204.
12. Zhang W.C., Wu X.L., Chen H.T. et al. // J. Appl. Phys. 2008. Vol. 103. P. 093718.

УДК 621.37, 535.016

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЛАЖНОСТИ НА ОПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТКАНЫХ МАТЕРИАЛОВ С НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫМ ФЕРРОМАГНИТНЫМ МИКРОПРОВОДОМ

А.А.А. АХМЕД, Я.Т.А. АЛЬ-АДЕМИ, Н.В. НАСОНОВА, Т.А. ПУЛКО, Л.М. ЛЫНЬКОВ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
П. Бровки, 6, Минск, Беларусь**Поступила в редакцию 5 февраля 2016*

Получены характеристики коэффициента спектральной яркости тканых хлопкополиэфирных материалов, содержащих наноструктурированный ферромагнитный микропровод, и пропитанных водой, в диапазоне длин волн 440...2400 нм. Проведен анализ зависимости полученных результатов от состава элементов, цвета и структуры поверхности образцов, а также присутствия воды.

*Ключевые слова:* коэффициент спектральной яркости, тканые материалы, влажность.

### Введение

Взаимодействие материалов с оптическим излучением описывается процессами отражения и рассеяния от поверхности материала, а также поглощения энергии излучения. Доли энергии, участвующие в этих процессах, составляют в сумме полную энергию падающего излучения, зависят от оптических свойств материала и характеризуются коэффициентами:  $r$  – отражения,  $a$  – поглощения и  $g$  – пропускания:

$$r + a + g = 1. \quad (1)$$

Оптические спектральные характеристики материалов позволяют получить достоверную информацию о свойствах исследуемых объектов, например, в дистанционном зондировании земной поверхности [1]. В видимом диапазоне длин волн (400...750 нм) выделяют семь поддиапазонов: красный (770–625 нм); оранжевый (625–585 нм); желтый (585–565 нм); зеленый (565–510 нм); голубой (510–480 нм); синий (480–440 нм); фиолетовый (440–390 нм).

Природные или искусственные объекты при наблюдении в оптическом диапазоне длин волн могут быть различимы благодаря их яркостным контрастам. Яркость объекта зависит от освещенности, отражательной способности материала, а также поглощения оптического излучения средой, в котором оно распространяется. Яркость объекта часто описывается коэффициентом спектральной яркости (КСЯ), который характеризует пространственное распределение спектральной яркости отражающей поверхности [2]:

$$КСЯ = B / B_0, \quad (2)$$

где  $B$  – спектральная яркость объекта;  $B_0$  – спектральная яркость идеально рассеивающей поверхности в одинаковых условиях освещения и наблюдения.

Характер отражения светового потока материалом в разных участках диапазона длин волн зависит от физико-химического состава материала, структуры поверхности, характера освещения, его спектрального состава и мощности. Структура поверхности связана во многом с рассеянием оптического излучения, так, например, большое количество малоразмерных элементов поверхности приводит к увеличению КСЯ, обусловленному увеличением

многократного внутреннего рассеяния света. Структура поверхности объекта влияет на изменение яркости также в зависимости от изменения угла наблюдения.

Полосы поглощения оптического излучения видимого диапазона веществом зависят от состава его молекул. Присутствие в материале пигментов определяет вид кривой спектральной яркости: возрастает яркость в участке спектра, который не поглощается пигментами, и определяет цвет материала. Например, для объектов красного цвета характерно смещение максимума яркости в длинноволновую часть спектра. На распределение яркости по спектру влияет концентрация, состав частиц, их цвет и размер.

В данной работе исследовались спектральные характеристики тканых хлопкополиэфирных материалов, содержащих наноструктурированный ферромагнитный микропровод, и пропитанных водой, в оптическом диапазоне длин волн (400...2400 нм). Наноструктурный ферромагнитный микропровод (НФМП) в стеклянной изоляции представляет собой композиционный материал с внутренней жилой из аморфных металлических сплавов на основе переходных металлов [3]. Состав аморфного наноструктурированного микропровода в стеклянной изоляции представляет собой ферромагнитный сплав Fe, Co, Ni и металлоидов (B, Si, C). Его содержание изменялось путем чередования нитей утка с ферромагнитным микропроводом [4].

Зависимость диэлектрической проницаемости от частоты в диапазоне СВЧ носит нелинейный характер. При этом наибольшее влияние оказывает частота на действительную составляющую  $\epsilon'$ . Это подтверждается экспериментальными и расчетными данными.

Поиск несущей основы или матрицы для жидкого наполнителя является актуальной задачей при разработке влагосодержащих композиционных экранирующих материалов. Для этих целей используются различные капиллярно-пористые порошковые и волокнистые материалы. Известны конструкции на основе силикагеля, бентонита, тканого и нетканого полотна, шунгита и др. с различными способами герметизации для стабилизации влагосодержания композита. Подобные материалы способны обеспечивать коэффициент передачи ЭМИ не менее  $-10$  дБ при минимальном коэффициенте отражения  $-10...-15$  дБ в СВЧ-диапазоне. В настоящей работе рассматривается возможность применения пористой волокнистой основы, в качестве которой используется древесная стружка хвойных пород. Дерево широко известно как волокнистый электроизоляционный материал. Из всех составных частей древесины волокнистым строением обладает только целлюлоза, содержащаяся в количестве до 50 % от веса абсолютно сухой древесины. Целлюлоза – один из самых основных видов полимерных материалов, имеет волокнистое строение и является главной составной частью стенок растительных клеток и вместе с сопровождающими ее веществами составляет твердый остов всех растений, придавая им механическую прочность и эластичность. Волокнистая структура, гигроскопичность, а также доступность, экологичность и малый вес исходного сырья обуславливают выбор данного материала как несущей основы для жидкого наполнителя. В качестве жидкого наполнителя предлагается использовать гидрофильный водный раствор хлорида кальция, который обеспечит стабилизацию уровня влагосодержания.

Водный раствор хлорида кальция обладает повышенной электропроводностью по сравнению с водой за счет появления свободных ионов, являющихся носителями заряда. Также из-за присутствия ионов происходит существенная модификация структуры воды, сопровождающаяся снижением диэлектрической проницаемости воды с одновременным уменьшением времени диэлектрической релаксации. При этом увеличение отражения, обусловленное возрастанием удельной электропроводности раствора, с избытком компенсируется уменьшением доли отраженной энергии ЭМИ, связанным с уменьшением диэлектрической проницаемости воды и согласованием волновых сопротивлений материала и свободного пространства.

### **Методика проведения эксперимента**

Изготовленные образцы представляли собой прямоугольные отрезки ткани размером  $60 \times 70$  мм, образец 1 – без микропровода; образец 2 – чередование нитей утка с ферромагнитным микропроводом 1:4, образцы, обозначенные «\*», были пропитаны водой до максимального содержания (таблица).

### Описание исследуемых образцов

Обозначение образцов	Вид матрицы, материал и характерные размеры	Влагосодержание, % масс.
1	Хлопкополиэфирная ткань без микропровода	0
1*	Хлопкополиэфирная ткань без микропровода	58,0
2	Хлопкополиэфирная ткань, чередование нитей утка с ферромагнитным микропроводом 1:4	0
2*	Хлопкополиэфирная ткань, чередование нитей утка с ферромагнитным микропроводом 1:4	58,0

Экранирующая ткань с наноструктурным ферромагнитным микропроводом может применяться в изготовлении спецодежды для биологической защиты технического персонала, работающего в условиях воздействия электромагнитных полей, для пошива штор и изготовления изделий в целях обеспечения информационной безопасности зон повышенной конфиденциальности и их скрытия при эксплуатации в условиях повышенной влажности [5].

Исследования оптических характеристик проводились в видимом диапазоне (400...2400 нм) с помощью гониометрической установки и спектрометра ПСР-02, имеющего разрешение не хуже 2 нм с поляризационной насадкой, позволяющей регистрировать спектральную плотность энергетической яркости (СПЭЯ) образцов при различных положениях оси полярида.

Спектрометр ПСР-02 предназначен для проведения измерения в лабораторных и полевых условиях спектральной плотности энергетической яркости (СПЭЯ), а также поляризационных характеристик отраженного растительными элементами или другими объектами излучения в диапазоне длин волн от 0,35 до 2,5 мкм [6]. В результате обработки зарегистрированных на гониометрической установке спектров отражения в диапазоне 440–2400 нм были получены оптические характеристики исследуемых образцов при угле падения света 0° и углах наблюдения 0°, 25°, 45° и 65°.

Для обработки спектров отражения и вычисления КСЯ исследуемых объектов были получены спектры отражения для материала с равномерной индикатрисой рассеяния, в качестве которой использовался диффузный отражатель. В качестве отражателя использовалась пластина молочного стекла МС-20 толщиной 10 мм. Для анализа спектров отражения и вычисления КСЯ исследуемых материалов были получены спектры отражения для эталонного образца, выполненного на основе молочного стекла МС-20 с равномерной индикатрисой рассеяния при условиях измерений, аналогичных условиям для исследуемых образцов.

Коэффициент спектральной яркости КСЯ вычислялся как отношение СПЭЯ исследуемого материала к СПЭЯ молочного стекла МС-20. Величины СПЭЯ-спектров отражения образцов  $L_{ob}$  нормировались на величину СПЭЯ-спектра, отраженного от МС-20 излучения  $L_{MS}$  для каждой длины волны, получая КСЯ исследуемых образцов  $R_{ob}$ :

$$R_{ob} = \frac{L_{ob}}{L_{MS}} . \quad (3)$$

### Результаты и их обсуждение

На основе экспериментально полученных данных построены характеристики КСЯ в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах длин волн для тканых материалов из синтетических волокон, содержащих вязанный в структуру ткани микропровод и включения воды (рис. 1).

Как следует из анализа данных экспериментов, приведенных на рис.1, исследуемые образцы обладают относительно большим поглощением света в коротковолновой области видимого диапазона длин волн, с ростом длины волны интенсивность отраженного света растет с 0,22...0,25 отн.ед. до 0,84 отн.ед. для образцов без пропитки. Анализ базы данных спектров отражения природных объектов [7] показал, что полученные спектральные характеристики яркости наиболее приближены по виду к характеристикам природных растительных объектов – таких как слой стеблей созревшей пшеницы, обертка початка

кукурузы. В длинноволновой области КСЯ повышается до достаточно высокого значения 0,84 отн.ед., что означает отражение большей доли падающего светового потока. Небольшая разница в величине КСЯ между образцами 1 и 2 наблюдается в области длин волн 400...600 нм. Величина КСЯ для образцов, содержащих ферромагнитный микропровод, незначительно ниже, чем для исходного полотна. Это может быть связано с присутствием на поверхности стеклянной изоляции микропровода элементов, обладающих меньшим отражением для оптического излучения, чем полиэфирные волокна. Пропитка тканого материала водой приводит к равномерному снижению его величины КСЯ в среднем на 0,134 отн.ед. во всем исследованном диапазоне длин волн вследствие дополнительного рассеяния света включениями воды на поверхности волокон. Полученная в результате кривая зависимости КСЯ близка к характеристикам желтых листьев березы, бука, осины [7]. В области длин волн 700...1000 нм величина КСЯ исследованных образцов практически не изменяется с длиной волны и составляет 0,8...0,84 отн.ед. для сухих образцов и 0,645...0,683 отн.ед. для образцов, пропитанных водой.

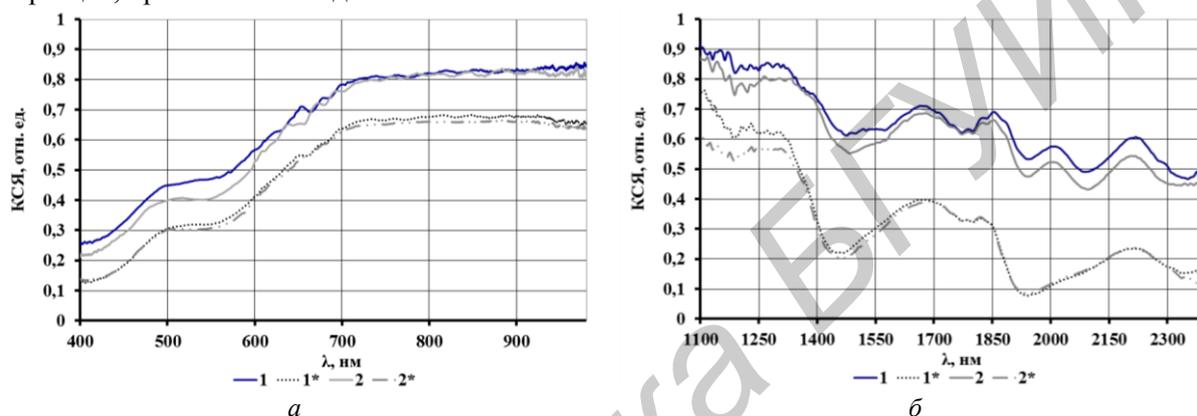


Рис. 1. Характеристики коэффициента спектральной яркости в видимом (а) и ближнем инфракрасном (б) диапазонах длин волн при угле наблюдения  $0^\circ$ : 1 – образец тканого хлопкополиэфирного полотна; 1\* – образец тканого хлопкополиэфирного полотна, пропитанного водой; 2 – образец тканого хлопкополиэфирного полотна с ферромагнитным микропроводом; 2\* – образец тканого хлопкополиэфирного полотна с ферромагнитным микропроводом, пропитанного водой

КСЯ образцов тканых полотен в ближней инфракрасной области длин волн изменяется от 0,9 отн.ед. до 0,435 отн.ед. для непропитанных образцов и незначительно различается для образцов с микропроводом из-за поглощения части светового потока стеклянной оболочкой. Для пропитанных образцов эта разница сглаживается и КСЯ тканых полотен снижается на 0,242 отн.ед. во всем исследованном диапазоне длин волн из-за более интенсивного поглощения ИК-излучения водой в составе полотна. Общий характер зависимости КСЯ сохраняется и величина КСЯ снижается с 0,6 до 0,1 отн.ед. из-за увеличения поглощения ИК-излучения тканым материалом.

Исследовалась зависимость отражательной способности тканого хлопкополиэфирного полотна, содержащего ферромагнитный наноструктурированный микропровод, для различных углов наблюдения ( $0^\circ \dots 65^\circ$ ) (рис. 2). Исследования установили, что для сухого образца величина и характер зависимости КСЯ от длины волны слабо зависят от угла наблюдения, как в видимом, так и в ближнем ИК-диапазонах, что свидетельствует о диффузном рассеянии света поверхностью тканого материала с регулярной структурой. При пропитке тканого полотна водой характер рассеяния оптического излучения исследованными образцами становится смешанным и КСЯ возрастает для больших углов наблюдения ( $65^\circ$ ) на 0,204...0,207 отн.ед. по сравнению с  $0^\circ$ . Это связано с неоднородной структурой поверхности полотна и неравномерным рассеиванием светового потока внутри пор и на неоднородностях, сформированными волокнами в различных направлениях, а также поглощением света водой, заполняющей межволоконные пространства.

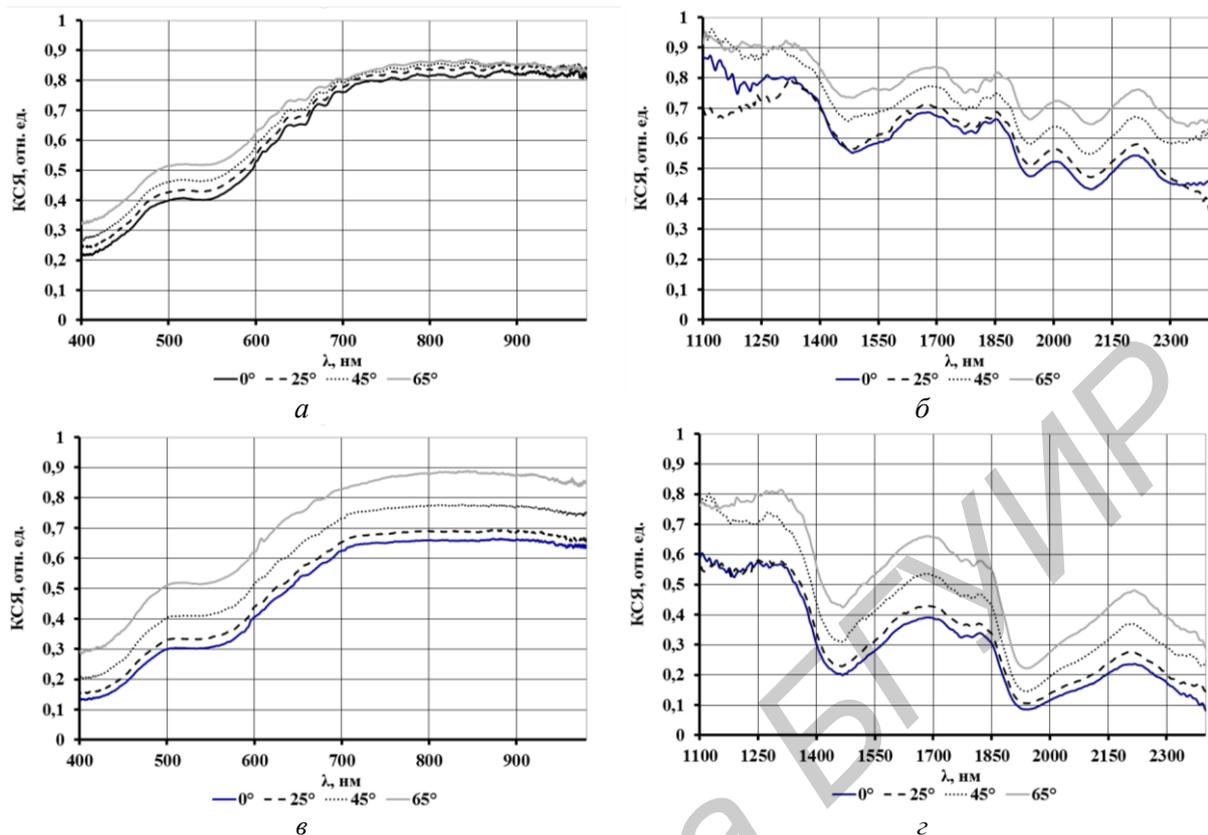


Рис. 2. Зависимость коэффициента спектральной яркости в видимом (а, в) и ближнем инфракрасном (б, г) диапазонах от угла наблюдения (0°...65°) для тканого хлопкополиэфирного полотна, содержащего ферромагнитный наноструктурированный микропровод (а, б), и этого полотна, пропитанного водой (в, г)

### Заключение

Анализ оптических характеристик КСЯ тканых хлопкополиэфирных полотен в диапазоне длин волн 440...2400 нм показал, что характеристика КСЯ в видимом диапазоне длин волн определяется природой, цветом материала волокон и наличием элементов стеклянной изоляции микропровода и изменяется от 0,22...0,25 отн.ед. до 0,84 отн. ед. Пропитка тканого материала водой приводит к равномерному снижению его величины КСЯ в среднем на 0,134...0,242 отн.ед. во всем исследованном диапазоне длин волн вследствие дополнительного рассеяния света включениями воды на поверхности волокон. При этом возникает зависимость КСЯ от углов наблюдения в связи с неоднородной структурой поверхности полотна и неравномерным рассеиванием светового потока в различных направлениях внутри пор и на неоднородностях, сформированных волокнами, а также поглощением света водой, заполняющей межволоконные пространства.

### EFFECT OF MOISTURE CONTENT ON OPTICAL CHARACTERISTICS OF FABRICS, CONTAINING NANOSTRUCTURED FERROMAGNETIC MICROWIRE

A.A.A. AHMED, Y.T.A. AL-ADEMI, N.V. NASONOVA, T.A. PULKO, L.M. LYNKOU

### Abstract

Spectral reflectance characteristics in the wavelength range of 440...2400 nm were obtained for the mixed cotton-polyester fabrics, which contain knitted-in nanostructured ferromagnetic microwire. The obtained results were analyzed against the content of elements, color and structure of the surface of the samples. The moisture content effect was shown.

*Keywords:* spectral reflectance, fabrics, moisture effect.

### Список литературы

1. *Вандербилт В.С., Грант Л., Дотри К.С.Т.* // ТИИЭР. 1985. № 6. С. 72–85.
2. *Шашлов А.Б., Уварова Р.М., Чуркин А.В.* Основы светотехники. М., 2002.
3. *Устименко Л.З., Хандогина Е.Н., Владимиров Д.Н.* // Компоненты и технологии. 2010. № 12. С. 144–146.
4. *Гриценкова В.А., Владимиров Д.Н., Фукина В.А.* Ткань для защиты от электромагнитных излучений / Патент РФ № 2411315.
5. Хлопчатобумажная экранирующая ткань с наноструктурным ферромагнитным микропроводом // ОАО «Центральное конструкторское бюро» [Электронный ресурс]. 2014. Режим доступа: <http://portalnano.ru/read/prop/pro/part9/pb2>. Дата доступа : 17.03.2014.
6. *Беляев Б.И. Беляев Ю.В., Нестерович Э.И. и др.* // Приборы и техника эксперимента. 2010. № 2 С. 127–132.
7. GIS-Lab: Spektry otrazhenija prirodnyh ob#ektov – baza dannyh. [Electronic resource]. – Mode of access: <http://gis-lab.info/projects/spectra>.– accessed: 21.01.2015.

UDC 621.314

**INFLUENCE OF PLASMA NITRIDING ON SURFACE ROUGHNESS OF STEELS**

M.S. AHMED, A.N. DROBOV

*Physical-Technical Institute, National Academy of Sciences of Belarus  
10, Kuprevich Street, 220141, Minsk, Belarus*

*Submitted 5 February 2016*

The research results of the influence of plasma at different levels of surface roughness are presented. The objective of this work is to determine the effects of plasma after the treatment for instrument steel 40Cr and construction steel 38H2MYUA.

*Keywords:* roughness, sputtering, ion, hardening, process.

**Introduction**

Ion plasma nitriding (IPN) is hardening process used to increase surface hardness, wear resistance and fatigue of steels after treatment. The most industrialized countries uses this method of hardening for machine components and tools, which replaced the traditional variants method of thermo chemical treatment (TCT). Compared with traditional processes of gases as well as other ways of strengthening the TCT, ion nitriding has several advantages and additional process features. Nitriding is widely used in various industries to improve the durability and reliability of many critical parts and tools.

In Belarus in the field of plasma physics, including studies of nitriding process and efforts to build the equipment of IPN were carried out in the Institute of Physics, the Institute of Heat and Mass Transfer of NAS of Belarus, BSUIR, BSU, BNTU. However, real progress in the studies of ion nitriding achieved in recent years in the Physical Technical Institute of National Academy of Science of Belarus also created reliable and innovative industrial equipment of IPN [1–3]. Its features are the ability to select the processing chamber pressure, changing the concentration of nitrogen in the working gas mixture during the process, software process control and high energy efficiency.

The author [4] explained that particles are ejected by sputtering from a solid target material due to bombardment of the target by energetic particles, it only happens when the kinetic energy of the incoming particles is much higher than conventional thermal energies greater than 1 eV. Therefore, sputtering is driven by momentum exchange between the ions and atoms in the materials due to collisions with surface of the treatment device. When the energy of sputtering is greater than the surface binding energy, an atom will be ejected and can escape the surface binding energy.

In this paper established the nature of the changes in the surface morphology of the initial products of instrumental and constructional steels having different roughness using IPN. The studies were performed with the use of modern methods of complementary interaction, instruments and equipment to ensure the accuracy and evidence of results.

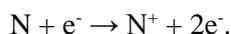
**Experiments on instrument and construction steels**

Plasma (ionized gas) – a fourth state of matter, plasma – a very active medium containing ions, high-energy neutral particles, as a result of the dissociation of the gas molecules in an electric field. IPN process is realized when the nitrogen in the chamber is converted into nitrogen ions and the metal is absorbed. Molecular nitrogen by direct plasma dissociation converted into nitrogen atoms:  
$$\text{N}_2 + e^- \rightarrow \text{N} + \text{N} + e^-$$



Fig. 1. The nitriding of steel molds 4H5MFS and gears of steel 40Cr (own results)

Then, the nitrogen atoms are converted into nitrogen ions due to the ionization of the plasma:



Next, nitrogen ions are diffused into the N + surface of the metal and form fine nitrides that provide high hardness of the material near the surface, Visually process IPN looks like a purple glow surrounding the device as shown in Fig. 1.

Technological factors affecting the efficiency of the IPN are the temperature of the process, the duration of the saturation pressure, composition and flow rate of the working gas mixture, as well as the density of the discharge current. In this case, the discharge must be anomalous, i.e. the entire surface of the processed products should be covered with glow, and the density of the discharge current must be greater than normal density for a given pressure, taking into account the effect of heating the gas in the cathode region of the discharge [5–9].

Temperature range of IPN at hardening steels and cast irons is wider than for gas nitriding and in this study within 350–600 °C. By varying the gas composition, pressure, temperature and exposure time, you can receive a predetermined depth layers with the desired structure and phase composition.

The parameter which characterizes the intensity of the ion nitriding process is the flux density of the diffusing nitrogen into the steel, which is a function of the discharge parameters (voltage and current density), and a predetermined flow of nitrogen, and may vary during the process according to any algorithm, depending on the steel grade and the requirements of the nitride layer.

Table 1. Chemical composition (wt. %) of the investigated steels (GOST 4543–71, 5950–2000)

Elements	40Cr	38H2MYUA
C	0.36–0.44	0.35–0.42
Si	0.17–0.37	0.2–0.45
Mn	0.5–0.8	0.3–0.6
Ni	to 0.3	to 0.3
S	to 0.035	to 0.025
P	to 0.035	to 0.025
Cr	0.8–1.1	1.35–1.65
Mo	–	0.15–0.25
Al	–	0.7–1.1
Cu	–	to 0.3
W	–	–
V	–	–
Ti	–	–
Cu	to 0.3	–

The values were obtained when materials were subjected to a series of structural studies and measurement of mechanical characteristics.

Steel 40Cr has a high performance and is widely used in industry for the manufacture of automotive parts, machine tools and other equipment, such as timing gears, axles, rollers water pump, coupling halves, rotary fists, bipod, ladders, shafts, thrust crossbars, cranks, hubs etc.

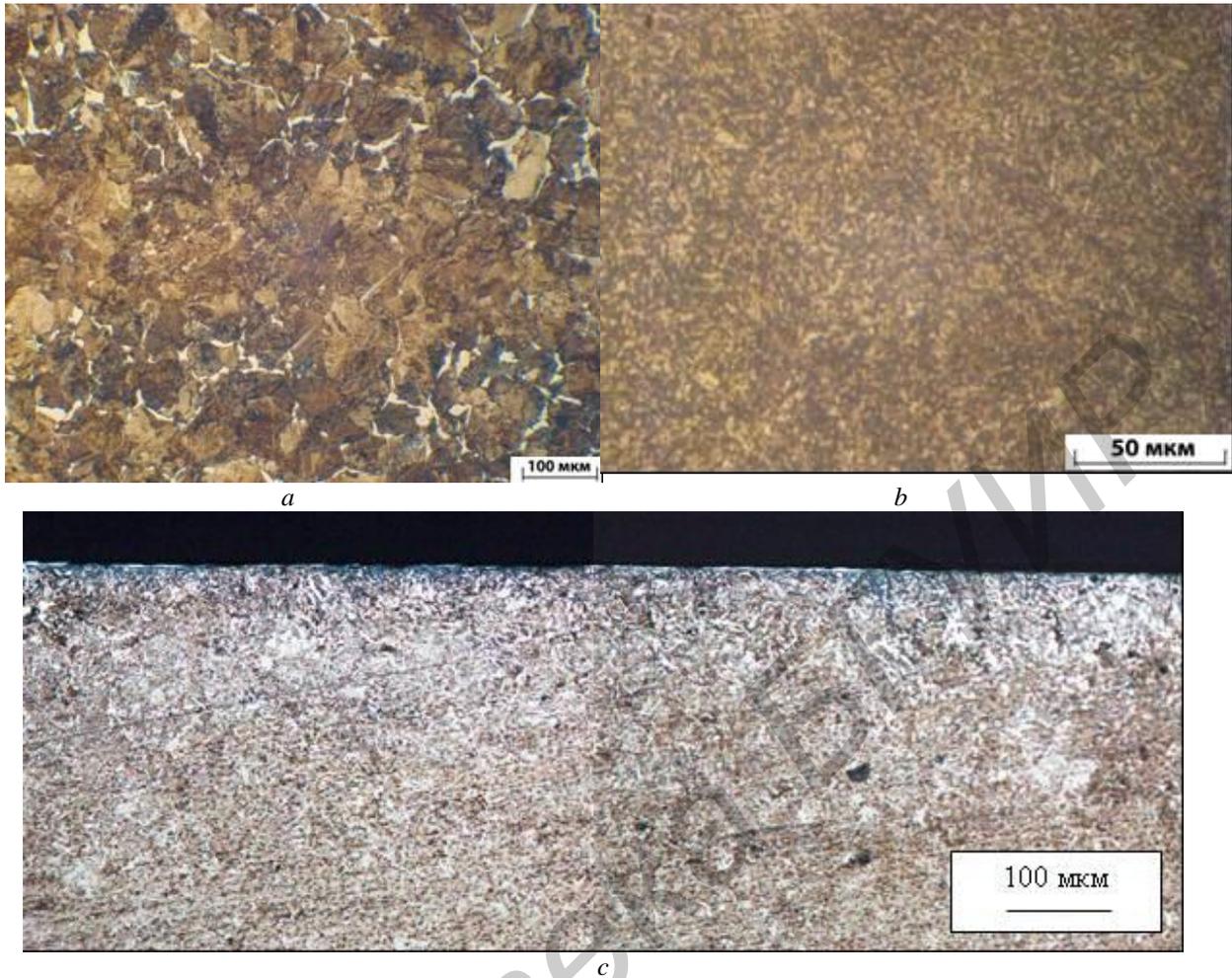


Fig. 2. 40Cr steel microstructure in the initial state (*a*), after hardening and tempering at 600°C (*b*), after quenching and tempering and IPN (*c*)

Steel 40Cr in the initial state has a banded structure consisting of lamellar pearlite with ferrite grain boundary mesh (Fig. 2, *a*) and the banded structure of steel due to the segregation of alloying elements in the smelting.

#### Effects of ion nitriding on surface roughness

From Table 2, with the initial state of surface roughness in the range of 0.027–0.599 microns for 40Cr, after the IPN, the surface roughness is positive. However, with the initial state of surface roughness of 0.74 microns, after the IPN, the surface roughness is negative. Also with the initial state of surface roughness in the range of 0.764–0.800 microns, the surface roughness is positive. With the initial state of surface roughness in the range of 0.889–1.650 microns, after the IPN, the surface roughness is negative.

From Table 2, with the initial state of surface roughness in the range of 0.28 - 0.92 microns for steel 38H2MYUA, after the IPN, the surface roughness is positive. With the initial state of surface roughness in the range of 1.09–1.29 microns, after the IPN, the surface roughness is negative.

On the diffusion of nitrogen into the interior of the material significantly affects the nature of the machining surface before nitriding. Such machining factor as the surface roughness, may also affect the formation and growth of the nitride layer. After grinding the diffusion of nitrogen into the metal is facilitated, since the surface tensile stresses occur during process turning, drilling, milling, magnetic abrasive, blasting and sandblasting, or plastic deformation of the surface shape different types of diagrams of residual stress in the surface, and the surface can affect the diffusion of nitrogen.

Influence of ion nitriding on the variation of surface roughness for samples of steels 40Cr and 38H2MYUA were studied, to this end, a series of samples plane cylindrical plunge quenching and

tempering at 600 °C, treated with sandpaper grit for different surface roughness in the range of 0.03–1.65 microns for 40Cr and Ra 0.28–1.29 um for steel 38H2MYUA. Surface roughness was measured on a device Sustronic 25 manufactured by Taylor Hobson. Samples steel 40Cr were then simultaneously nitride at 530 °C for 13 hours. Steels 38H2MYUA carried out at 510°C for 7 hours exposure on the first treatment stage and 550 °C for 8 hours exposure in the second step. Then measure roughness, surface roughness was measured on a device Sustronic 25 manufactured by Taylor Hobson. The data reflecting the change trends of surface roughness are shown in tables 2 and 3.

Table 2. Changes in the surface roughness of the samples of steel 40Cr in various states after the IPN

State	Initial	After IPN	Change
The roughness Ra, um	0.027	0.235	+0.208
	0.029	0.097	+0.068
	0.033	0.103	+0.070
	0.037	0.244	+0.207
	0.038	0.257	+0.219
	0.041	+0.219	+0.241
	0.051	0.102	+0.051
	0.079	0.132	+0.053
	0.100	0.218	+0.118
	0.152	0.267	+0.115
	0.406	0.588	+0.182
	0.599	0.641	+0.042
	0.74	0.67	-0.07
	0.764	0.828	+0.064
	0.800	1.018	+0.218
	0.800	0.940	+0.140
	0.889	0.781	-0.108
	1.400	1.378	-0.022
	1.650	1.634	-0.016
1.650	1.560	-0.090	

Table 3. Change in surface roughness of steel samples 38H2MYUA after IPN

State	The roughness Ra, um							
initial	0.28	0.38	0.39	0.44	0.51	0.92	1.09	1.29
after IPN	0.44	0.48	0.40	0.48	0.72	0.93	0.96	1.24
change	+0.16	+0.1	+0.01	+0.04	+0.21	+0.01	-0.13	-0.05

When initial roughness in the range of 0.03–0.6 microns, after treatment roughness increases. Surfaces with an initial roughness in the range of 0.74–0.9 microns, after treatment the roughness declines. In the case of the original surface with a higher value Ra, after IPN their roughness reduced. Processes of change of surface morphology during the IPN definitely related to the nature and mechanism of high exposure to the plasma glow discharge in the surface layer of metal, subjecting the surface powerful stationary or pulsed energy fluxes (ions, plasma) leads to a series of melting and solidification processes in surface layer of macroscopic thickness in steels.

During IPN, samples with high initial surface roughness (0.9 um and more), there were smoothing of the projections and surface irregularities. In the case of surface treatment with low initial roughness was a “backwash” of the surface by bombardment with nitrogen ions. In this case, except for the serial melting and solidification of the surface layer, there is a process of “ion etching”, which consists of bombarding the surface of the reinforcing product ions with an energy of 1 keV, in the creation of an atomically clean surface of the material (steel), the defective surface layer with a large number of active sites sorption and surface temperature and the entire part both during the pre-cleaning products, and directly nitriding process. Therefore, the formation of relief etching is associated with changes in the surface topography caused by the ion-stimulated structural and chemical changes in the surface layers.

For tools, machine components and devices depending on its purpose, for example applied to a thin blade processing may require low surface roughness (less than Ra = 0.63 m). Surface roughness Ra 1–1.6 microns is acceptable for general engineering components (gears, gears, shafts, guides), and also for forming tool and equipment in industries.

## Conclusion

The regularities of changes in the morphology of the surface of steel depend on the nature of the surface roughness. Nitriding initially polished samples ( $R_a$  0.03–0.04  $\mu\text{m}$ ) increase their roughness due to ion etching. When the value of  $R_a$  is in the range 0.8–0.9 microns, an increase in roughness was obtained for instrument steel 40Cr, this was due to sputtering. Surface roughness of construction steel 38H2MYUA was in the range of 0.28–0.92 microns after the IPN, the surface roughness was positive, and surface roughness was in the range of 1.09–1.29 microns after the IPN, the surface roughness was negative. Plasma-nitriding as surface treatment is important for achieving good corrosion and wears properties of steels.

## References

1. *Bosiakov M.N., Kozlov A.A.* // Doklady BGUIR. 2013. № 3 (73). P. 76–82.
2. *Behrisch R., Eckstein W.* Sputtering by Particle bombardment: Experiments and Computer Calculations from Threshold to MeV Energies. Berlin. 2007.
3. *Arzamasov B.N.* The ionic chemical-thermal treatment Alloys. M., 1999.
4. *Bosiakov M.N.* // Coll. Reports of the 8th International Symposium “Powder metallurgy: surface engineering, new powder composite materials. Welding”. Part 2. Minsk, Belarus, April 10–12, 2013. P. 34–40.
5. *Bosiakov M.N.* // New equipment ion-plasma nitriding. 2013. № 3 (91). P. 30–34.
6. Nitriding and carbonitriding // Ed. A.V. Supova. M., 1990.
7. *Mittemeijer E.J.* Fundamentals of Nitriding and Nitrocarburizing ASM Handbook, Volume 4A, Steel Heat Treating Fundamentals and Processes J. Dossett and G.E. Totten, editors, ASM International, 2013.
8. *Mittemeijer E.J., Somers M.A.J.* // Proceeding of the 10<sup>th</sup> Congress of the IFHT “Thermodynamics, Kinetics and Process Control of Nitriding”. Moscow, 1996. P. 83–117.
9. *Rolinski E.* Electrical discharges in gases and principles of ion nitriding. Advanced Heat Treat Corp., 2009.

**КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ**

УДК 621.794

**ВЛИЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНОЙ СТРУКТУРЫ ТИТАНОВЫХ ИМПЛАНТАТОВ  
НА РЕАКЦИЮ СО СТОРОНЫ КОСТНОЙ ТКАНИ**

С.К. ЛАЗАРУК, О.В. КУПРЕЕВА, Д.В. ИСАЕВ\*, Ф.А. ГОРБАЧЕВ\*, А.С. ЛАСТОВКА\*

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь**\*Белорусский государственный медицинский университет  
Дзержинского, Минск, 83220116, Беларусь**Поступила в редакцию 30 июня 2015*

Исследовано влияние состояния поверхности крепежных на костных титановых пластин и шурупов на рост костной ткани на их поверхностях в процессе хирургического лечения переломов нижней челюсти человека и установлено, что рост костной ткани на развитой микроструктурированной поверхности происходит с большей интенсивностью по сравнению с гладкой поверхностью. Предложены методы обработки титановой поверхности с целью управления процессом регенерации костной ткани на титановых конструкциях, используемых в процессе хирургического лечения.

*Ключевые слова:* оксид титана, продуктивная реакция костной ткани, титановые на костные пластины.

**Введение**

Влияние поверхности титановых конструкций, используемых при хирургическом лечении повреждений костей человека, на ответную реакцию со стороны костной ткани активно исследуется последние 10 лет [1–3]. Следует отметить, что в некоторых случаях в процессе хирургического лечения с использованием титановых крепежных элементов требуется максимальная интеграция их с костной тканью, в других – наоборот, эта реакция является нежелательной. В частности, когда титановые пластины и шурупы используются для временной фиксации отломившихся костных фрагментов и впоследствии подлежат удалению, то продуктивная реакция костной ткани на титановой поверхности должна быть минимизирована. Часто хирурги сталкиваются с техническими сложностями при удалении данных конструкций за счет «зарастания» их костной тканью, т.е. происходит «наплыв» костной ткани на временно установленные крепежные элементы. Удаление таких конструкций всегда сопряжено с дополнительной операционной травмой костной ткани и увеличением времени проведения операции. В работе проведено исследование рельефа поверхности титановых конструкций, используемых для временной фиксации костных фрагментов при переломах нижней челюсти, и влияния состояния поверхностей этих конструкций на процесс нежелательного интегрирования этих конструкций с костной тканью. Проведено обсуждение возможных применений уникальных электрофизических свойств наноструктурированного оксида титана для решения различных проблем в медицине.

**Методика эксперимента**

В проведенных экспериментах использовали и анализировали титановые на костные пластины и крепежные шурупы производителя ЗАО «Струм» Республика Беларусь – рис. 1, а, используемые при хирургическом лечении переломов нижней челюсти человека (рис. 1, б).



*a*



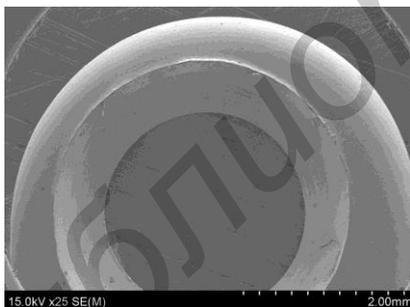
*б*

Рис. 1. Титановые конструкции, применяемые при хирургическом лечении переломов нижней челюсти человека: *a* – титановая пластина и крепежные шурупы; *б* – рентгеновский снимок нижней челюсти пациента после проведенного остеосинтеза

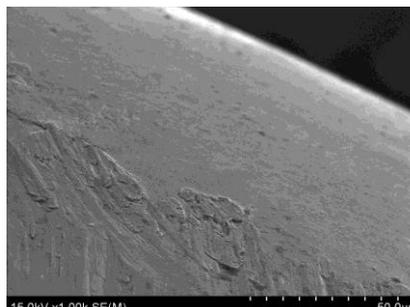
Структуру поверхности титана до и после хирургического лечения исследовали при помощи оптической и электронной микроскопии (оптический микроскоп Планар 100-М, электронный микроскоп Hitachi JSM-6700).

### Результаты и их обсуждение

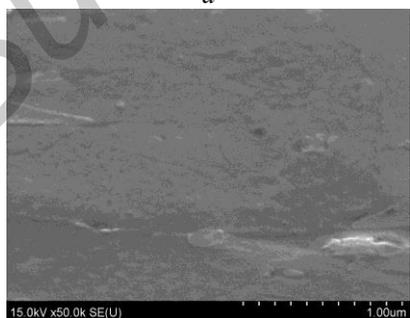
На рис. 2 представлены фотографии различных участков поверхности исходной титановой пластины с крепежным отверстием. На ней можно выделить две области – внутренняя поверхность крепежного отверстия и область за пределами крепежного отверстия, отличающиеся своей структурой. Очевидно, что поверхность титана за пределами отверстия гладкая, в то время как внутри отверстия поверхность рельефная. Это подтверждают фотографии участков исследуемой поверхности при большом (50000-кратном – рис. 2, *з*) увеличении. Это различие в структуре поверхности связано с тем, что при изготовлении титановых наконечных пластин внешние участки поверхности подвергаются полировке, обеспечивающей сглаживание поверхности, в то время как поверхность внутри крепежных отверстий не подвергается полировке из-за сложности доступа к таким участкам. Аналогичная ситуация имеет место на поверхности крепежных шурупов, где внутренние участки расположены в глубине области резьбы.



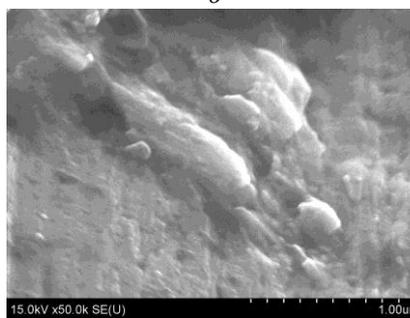
*a*



*б*



*в*



*з*

Рис. 2. Внешний вид поверхности титановых наконечных пластин: *a* – общий вид; *б* – участок на границе раздела гладкой и развитой поверхности; *в* – гладкий участок (высокое разрешение электронной микроскопии); *з* – развитая поверхность внутри крепежных отверстий

На рис. 3 представлены фотографии поверхности наkostных пластин и крепежных шурупов после их использования для фиксации костей при хирургической операции нижней челюсти человека. На них видно, что внутри крепежного отверстия на рельефной поверхности титана происходит рост костной ткани (рис. 3, *a*). Аналогичное явление наблюдается на поверхности крепежных шурупов (рис. 3, *б*). Таким образом, можно сделать вывод, что рельефная поверхность титана в сравнении с гладкой способствует большей интеграции с костной тканью, что согласуется с результатами исследований, выполненных ранее [4–6].

При временной фиксации костных фрагментов при переломе нижней челюсти требуется уменьшение интеграции костной ткани на поверхности наkostных пластин и шурупов. В связи с этим необходимо проводить сглаживание поверхности внутри отверстий в поддерживающих титановых пластинах и по резьбе крепежных шурупов. Так как доступ к указанной поверхности при механической обработке ограничен, целесообразно использовать для этих целей электрохимическую полировку, которая лишена указанного недостатка.

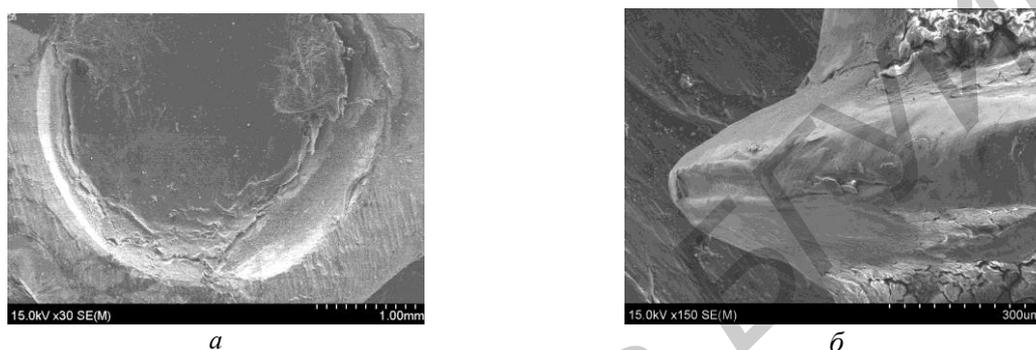


Рис. 3. Внешний вид поверхности наkostных пластин и крепежных шурупов после их использования для фиксации костей при хирургической операции нижней челюсти: *a* – наkostная пластина (область крепежного отверстия); *б* – поверхность крепежного шурупа

На рис. 4 представлены фотографии поверхности костной ткани, покрывающей титановую пластину. Исследование при помощи электронной микроскопии показывает, что такая поверхность имеет как микроструктуру, так и наноструктуру с минимальными размерами до 100 нм. Из этого следует актуальность проведения исследований по влиянию наноструктурированной поверхности титана на процесс регенерации костной ткани при хирургическом лечении. В частности, особый интерес представляет определение роли размеров наноструктур на поверхности титановых элементов на регенерацию костной ткани. Также важно исследовать влияние формы поверхности на это явление, так как морфология поверхности наноструктурированного оксида титана может быть кораллообразной, столбиковой, трубчатой [7–9].

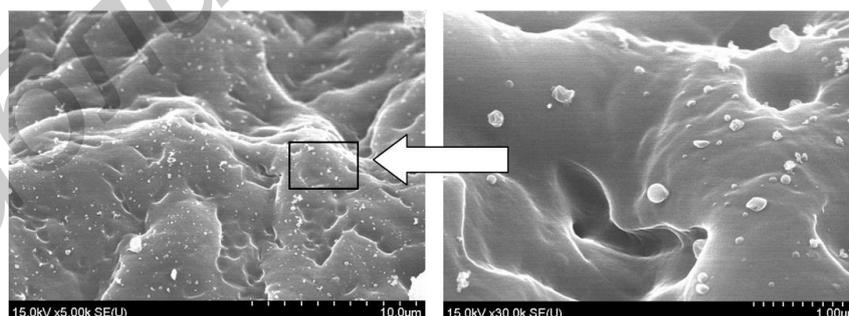


Рис. 4. Внешний вид костной ткани, наростшей на поверхности наkostной пластины при различном увеличении

Кроме того было показано, что отрицательный потенциал на поверхности наноструктурированного оксида титана ускоряет регенерацию костной ткани [10]. А ультрафиолетовое экспонирование наноструктурированного оксида титана вызывает фотокаталитическую генерацию синглетного кислорода, способного убивать раковые клетки [10]. Следует отметить, что в зарубежной научной периодике этим исследованиям уделяется достаточно много внимания, причем исследования проводятся как на титане, так и на других материалах.

## Заклучение

Применение методов электрохимической обработки поверхности титановых пластин дает возможность управлять рельефом поверхности, что позволит применять такие пластины при лечении переломов костей в зависимости от конкретной ситуации, требующей либо минимизировать, либо ускорить процесс регенеративного роста костной ткани.

*Авторы выражают признательность компании «Белмикрoанализ» за электронную микроскопию образцов и профессору В.Е. Борисенко за полезное обсуждение полученных результатов.*

## INFLUENCE OF SURFACE STRUCTURE OF TITANIUM IMPLANTS ON THE RESPONSE FROM THE BONE TISSUE

S.K. LAZAROUK, O.V. KUPREEVA, D.V. ISAEV, F.A. GORBACHEU, A.S. LASTOVKA

### Abstract

The growth of bone tissue on titanium plates and mounting screws during surgical treatment of mandibular fractures was studied. The growth of bone tissue was more intensive on the developed surface in comparison with a polished surface. The methods of electrochemical treatment of titanium surface in order to control the regeneration process of bone tissue on the titanium constructions used during surgery were proposed.

*Keywords:* titanium dioxide, bone tissue productive response, titanium extramedullary plates.

### Список литературы

1. Guizzardi S., Galli C., Martini D. et al. // J. Periodontol. 2004. Vol. 75. P. 73–82.
2. Keller J.C., Schneider G.B., Stanford C.M. et al. // Implant Dent. 2003. Vol. 12. P. 175–181.
3. Boyan B.D., Lossdörfer S., Wang L. et al. // Eur Cell Mater. 2003. Vol. 6. P. 22–27.
4. Schwartz Z., Raz P., Zhao G. et al. // J Bone Joint Surg Am. 2008. Vol. 90 (11). P. 2485–2498.
5. Fan Z., Jia S., Su J.S. // Zhonghua Kou Qiang Yi Xue Za Zhi. 2010. Vol. 45(8). P. 466–470.
6. Jäger M., Zilkens C., Zanger K. et al. // J Biomed Biotechnol. 2007. Vol. 2007(8). P. 69036.
7. Lazarouk S.K., Sasinovich D.A., Kupreeva O.V. et al. // Thin Solid Films. 2012. Vol. 526. P. 41–46.
8. Liang K., Tay B. K., Kupreeva O.V. et al. // ACS Sustainable Chem. Eng. 2014. Vol. 2, № 3. P. 991–995.
9. Купреева О.В., Сасинович Д.А., Ореховская Т.И. и др. // Матер. 23-й Междунар. Крымской конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». Севастополь, Украина, 8–13 сентября 2013 г. С. 814–815.
10. Kulkarni M., Mazare A., Gongadze E. et al. // Nanotechnology. 2015. Vol. 26. P. 062002.

УДК 537.877

## КОМПОЗИЦИОННЫЕ ВЛАГОСОДЕРЖАЩИЕ ЭКРАНЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ СФАГНОВЫХ МХОВ

В.А. БОГУШ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь

Поступила в редакцию 16 ноября 2015

Обосновано использование сфагновых мхов для изготовления влагосодержащих модульных конструкций экранов электромагнитного излучения. Представлены результаты исследования характеристик передачи и отражения электромагнитного излучения таких конструкций.

*Ключевые слова:* композиционный материал, сфагновый мох, электромагнитное излучение.

### Введение

Микроволновый диапазон излучений широко используется в современной радиоэлектронной аппаратуре (бытовые приборы, системы наземной и спутниковой связи, средства радиолокационного обнаружения различных объектов, электронно-вычислительная техника и др.) [1]. Актуальность поиска новых материалов для экранов электромагнитного излучения (ЭМИ) заключается в защите персонала, эксплуатирующего такую аппаратуру, от воздействия ее излучения.

Целью настоящей работы является обоснование использования композиционных материалов на основе влагосодержащих мхов для изготовления конструкций экранов ЭМИ.

### Обоснование использования сфагновых мхов для экранов ЭМИ

Широкое использование металлических экранов ЭМИ заключается в их высоких значениях ослабления энергии за счет отражательной способности. Конструктивно такие изделия представляют собой металлическую фольгу, пластину, сетку.

Разрабатывается широкая номенклатура изделий для использования в качестве экранов ЭМИ, характеризующихся свойством радиопоглощения [2]. К ним относится и широкий круг водосодержащих материалов, которые характеризуются поляризационными свойствами, обеспечивающими высокие диэлектрические потери в диапазоне СВЧ.

В качестве несущей конструкции для водосодержащего наполнителя предложен материал на основе сфагновых (торфяных) мхов. Особенность таких материалов заключается в высокой влагоемкости, составляющей более 1500 % их сухой массы. Такие мхи содержат крупные пустотелые водопоглощающие клетки, снабженные сквозными отверстиями – порами. Высохшие мхи используются для дезинфекции, упаковки скоропортящихся продуктов, изготовления перевязочных материалов или защитных масок от газов.

### Методика проведения эксперимента

Для повышения временной стабильности и защиты от высыхания исследованных модульных конструкций экранов ЭМИ на основе влагосодержащих сфагновых мхов была реализована их изоляция, при которой мхи запаивались в локальные участки с размером 50×50 мм двуслойной лавсан-полиэтиленовой термопленки (рис. 1).

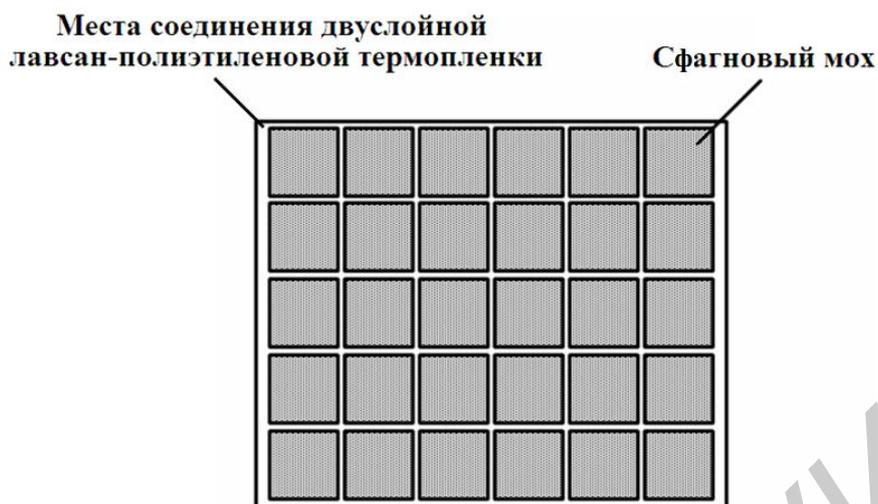


Рис. 1. Схематическое изображение модулей конструкции экрана ЭМИ на основе водосодержащих сфагновых мхов

Значения коэффициентов передачи и отражения ЭМИ исследованных модульных конструкций экранов ЭМИ на основе влагосодержащих сфагновых мхов измерялись в диапазоне частот 0,7...17 ГГц с использованием панорамного измерителя SNA 0,01–18, согласно методике, представленной в [3].

### Результаты и их обсуждение

На рис. 2 представлена частотная зависимость коэффициента передачи ЭМИ исследованных модульных конструкций экранов.

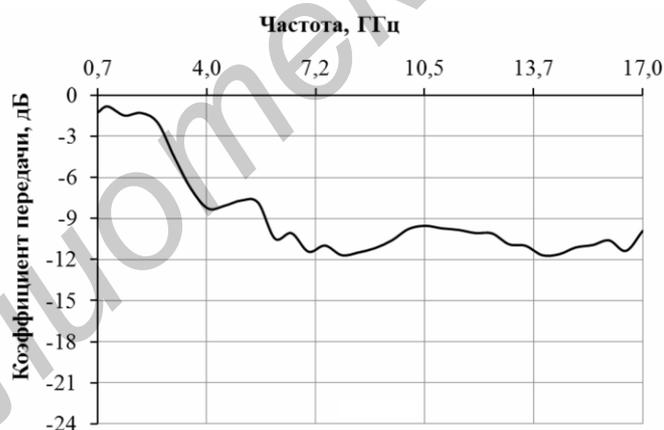


Рис. 2. Частотная зависимость коэффициента передачи ЭМИ модульных конструкций экранов на основе сфагновых мхов

Как видно из рис. 2, коэффициент передачи ЭМИ исследованных конструкций экранов составляет не менее  $-12$  дБ в диапазоне частот 4...17 ГГц. На рис. 3 представлены частотные зависимости коэффициента отражения ЭМИ модульных конструкций экранов на основе сфагновых мхов, в том числе и в режиме короткого замыкания (при размещении таких конструкций на металлических подложках). Установлено, что такие конструкции характеризуются значениями коэффициента отражения ЭМИ в исследованном диапазоне частот, составляющими  $-5$ ... $-15$  дБ. Введение режима короткого замыкания обеспечивает снижение значений их коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне частот 1...3 ГГц до  $-1$ ... $-9$  дБ. Также при этом наблюдаются локальные снижения значений коэффициента отражения исследованных конструкций до  $-15$  дБ в диапазонах частот 4...5 ГГц, 10,5...11,5 ГГц.

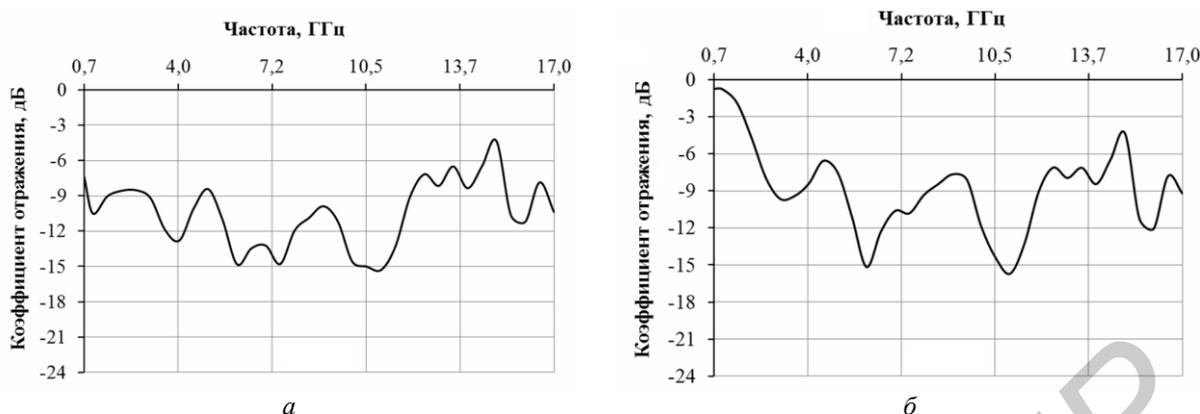


Рис. 3. Частотная зависимость коэффициента отражения ЭМИ модульных конструкций экранов на основе сфагновых мхов, не закрепленных (*а*) и закрепленных (*б*) на металлических подложках

### Заключение

Показано, что на основе сфагновых (торфяных) мхов могут быть получены конструкции экранов ЭМИ, характеризующиеся стабильным влагосодержанием и значениями коэффициента отражения ЭМИ до  $-15$  дБ (при использовании металлического отражателя). Установлено, что по сравнению с большей частью аналогов для предложенных конструкций обеспечивается свойство низкой массы. Такие конструкции могут быть использованы для маскирования наземных объектов в радиолокационном диапазоне длин волн, а также для создания спецодежды для персонала, работающего с радиоэлектронным оборудованием.

## COMPOSITE WATER-CONTAINING ELECTROMAGNETIC RADIATION SHIELDS BASED ON SPHAGNUM MOSS

V.A. BOGUSH

### Abstract

The utilization of sphagnum moss for production of water-containing module electromagnetic radiation shielding constructions is grounded. The research results of such constructions electromagnetic radiation transmission and reflection characteristics are presented.

*Keywords:* composite material, sphagnum moss, electromagnetic radiation.

### Список литературы

1. Антропогенные источники электромагнитного излучения. Безопасность жизнедеятельности человека / Под ред. Л.М. Лынькова. Минск, 2008.
2. Насонова Н.В., Пухир Г.А. // Докл. БГУИР. 2015. № 1 (87). С 34–40.
3. Радиозранирующие модульные конструкции на основе порошкообразных материалов / Под ред. Л.М. Лынькова. Минск, 2013.

## ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЕЙ, НАПРАВЛЯЕМЫХ В РЕДАКЦИЮ ЖУРНАЛА «ДОКЛАДЫ БГУИР»

1. К публикации принимаются статьи, отражающие результаты **оригинальных научно-технических исследований и разработок, не опубликованные и не предназначенные для публикации в других изданиях**. Ответственность за оригинальность и достоверность материалов, поданных в печать, несут авторы. Тематика представляемой статьи должна соответствовать рубрикам журнала (электроника, радиофизика, радиотехника, информатика).

2. Статьи должны быть написаны в сжатой и ясной форме и содержать соответствующий индекс УДК; название на русском и английском языках; инициалы и фамилии авторов на русском и английском языках; полное название учреждений, в которых выполнялось исследование (с указанием адреса); ключевые слова (до 10 слов) на русском и английском языках; аннотацию на русском и английском языках (3–5 предложений). Рекомендуется стандартизировать текст статьи, используя подзаголовки **введение, теоретический анализ, методика, экспериментальная часть, результаты и их обсуждение, заключение, список литературы**.

3. Статья представляется в двух экземплярах, распечатанных на листах формата А4, и в электронном варианте в виде файла формата MS Word (расширение – \*.doc). Также необходимо представить *экспертное заключение о возможности опубликования материалов в печати* и сведения об авторах статьи, содержащие их фамилии, имена, отчества и контактные данные.

**Количество страниц и иллюстраций:** для оригинальной статьи – не более 7 страниц; для краткого сообщения – не более 4 страниц.

4. При наборе текста используется гарнитура Times New Roman и Symbol, кегль – 11 pt. Устанавливаемый размер бумаги – А4 (210×297 мм). Поля слева, справа, сверху и снизу – по 25 мм. Межстрочный интервал – 1,0. Абзацный отступ – 1,25 см. *Запрещается* при наборе текста использовать гиперссылки, маркированные списки и ручные переносы слов.

5. **Формульные выражения** выполняются только в редакторе формул MathType, стиль – «Математика» («Math»), гарнитура – Times New Roman и Symbol, кегль – 11 pt. Как в тексте статьи, так и в формульных выражениях, математические функции, цифры, буквы греческого и русского алфавитов набираются прямым начертанием, латинские буквы – курсивом. Нумеровать рекомендуется те формульные выражения, на которые имеются ссылки в последующем тексте, заключая при этом номер в круглые скобки.

6. **Рисунки выполняются в соответствии со следующими требованиями:**

- размер рисунка – не более 15×20 см, разрешение – не менее 300 dpi;
- рисунок должен быть оформлен как графический объект;
- подрисуночные подписи обязательно должны включать в себя номер и название рисунка;
- словесных обозначений на рисунках рекомендуется избегать, используя при этом цифровые либо буквенные обозначения, пояснения к которым следует давать в тексте статьи либо подрисуночных подписях;
- цифровые и буквенные обозначения на рисунках по начертанию и размеру должны соответствовать обозначениям в тексте статьи либо подрисуночных подписях.

7. Наименования, обозначения, определения и правила применения единиц физических величин, употребляемых в статье, должны соответствовать ГОСТ 8.417–2002.

8. Ссылки на литературные источники нумеруются в порядке их цитирования в тексте. Номера ссылок заключаются в квадратные скобки.

9. Набор статьи рекомендуется выполнять в шаблоне, доступном для скачивания на сайте БГУИР ([www.bsuir.by](http://www.bsuir.by) → «Журнал "Доклады БГУИР"» → раздел «Авторам»).

10. Адрес для пересылки статей в электронном варианте и переписки с редакцией: [doklady@bsuir.by](mailto:doklady@bsuir.by).



## Памяти Чердынцева Валерия Аркадьевича



В январе 2016 г. ушел из жизни доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки Республики Беларусь, почетный академик Инженерной академии Украины, почетный академик Инженерной академии Казахстана, действительный член ИЕЕ, лауреат премии МО СССР, лауреат премии Международной инженерной академии и ЮНЕСКО Чердынцев Валерий Аркадьевич.

В.А. Чердынцев родился 21 августа 1936 г. в г. Свердловске в семье служащих. В 1954 г. году поступил на радиотехнический факультет Уральского политехнического института имени С.М. Кирова (г. Свердловск). В 1959 г. с отличием окончил институт и зачислен ассистентом на кафедру радиоприемных

устройств Уральского политехнического института, где занимался исследованием динамических характеристик перестраиваемых избирательных систем.

В 1961–1964 гг. обучался в аспирантуре Московского ордена Ленина энергетического института под научным руководством заведующего кафедрой радиосистем профессора Л.С. Гуткина, известного ученого в области радиоприема и радиосистем управления. В 1965 г. В.А. Чердынцев защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук на тему «Взаимодействие радиозвена с внешним контуром системы самонаведения». После окончания аспирантуры с 1965 по 1968 г. В.А. Чердынцев работал старшим преподавателем кафедры теоретических основ радиотехники УПИ имени С.М. Кирова.

В 1968 г. В.А. Чердынцев избирается на должность доцента кафедры радиопередающих устройств и радиотехнических систем Минского радиотехнического института. В 1971–1972 гг. проходит научную стажировку в Сити-университет (г. Лондон), где занимается моделированием алгоритмов цифровой фильтрации дискретно-непрерывных марковских процессов. С 1972 г. работает в должностях заведующего кафедрой конструирования и производства радиоаппаратуры (1972–1975 гг.), заведующего кафедрой радиоприемных устройств (1988–2006 гг.), профессора кафедры радиотехнических систем (2008–2015 гг.). В 1983 г. в Совете Московского электротехнического института связи В.А. Чердынцев защищает диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук на тему «Оптимизация устройств обработки многоцелевых сложных сигналов в совмещенных системах».

Профессор Чердынцев В.А. – основоположник научной школы «Статистическая теория и техника формирования, приема и обработки сигналов в радиотехнических системах», опубликовал более 300 работ, среди которых 3 монографии, 6 учебных пособий, 65 авторских свидетельств СССР на изобретения и 3 патента РБ, 180 научных статей, подготовил 18 кандидатов технических наук и 1 доктора наук. В 1993 г. был избран действительным членом Международной инженерной академии. С 1996 г. являлся председателем ОО «Белорусская инженерная академия», председателем ОО «Белорусское профессорское собрание».

За плодотворную научно-педагогическую деятельность В.А. Чердынцев удостоен почетного звания «Заслуженный деятель науки Республики Беларусь», награжден знаком «За отличные успехи в работе высшей школы СССР», знаком «Выдатнік адукацыі Рэспублікі Беларусь», Большой серебряной медалью лауреата премии Международной инженерной академии и ЮНЕСКО, Юбилейной медалью МИА, награжден Почетными грамотами Верховного Совета Республики Беларусь, Минвуза БССР, МО РБ, МРТИ и БГУИР.