

Министерство образования и науки Российской Федерации
Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)

**VII Международная
научно-практическая конференция**

ЭЛЕКТРОННЫЕ СРЕДСТВА И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Материалы докладов

10–11 ноября 2011 г.

В-Спектр
Томск 2011

УДК 621.37/39 + 681.3
ББК (Ж/О) 32.84.85.965
Э 45

Э 45 Электронные средства и системы управления: Материалы докладов Международной научно-практической конференции (10–11 ноября 2011 г.). – Томск: В-Спектр, 2011. – 260 с.
ISBN 978-5-91191-231-7

В сборнике собраны материалы докладов, представленных на VII Международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления» (Томск, 10–11 ноября 2011 г.), по следующим направлениям: радиотехнические и телекоммуникационные системы; наноэлектроника СВЧ; нанотехнологии в электронике; антенны и микроволновые устройства СВЧ; квантовая электроника, нелинейная оптика; интеллектуальная силовая электроника и преобразовательная техника; физическая и плазменная электроника; биомедицинская электроника; автоматизация и оптимизация систем управления и обработка информации; интеллектуальные системы проектирования, автоматизация проектирования электронных устройств и систем; информационная безопасность; информационные технологии в управлении и принятии решений; информационные технологии в обучении; инновации в сфере электроники и управления; электроника, оптоэлектроника и фотоника; видеоинформационные технологии и цифровое телевидение; измерение параметров ВЧ- и СВЧ-цепей. Также представлены доклады участников Программы фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере «У.М.Н.И.К.».

Для студентов, преподавателей и всех интересующихся проблемами систем управления.

УДК 621.37/39 + 681.3
ББК (Ж/О) 32.84.85.965

Ответственный редактор – Н.Д. Малютин, д.т.н., профессор

*Статьи секций 1, 6, 17, 18 размещены в сборнике статей
«Докладах ТУСУРа» №2 (24), ч. 1, 2; декабрь 2011 г.*

ISBN 978-5-91191-231-7

© ТУСУР, 2011
© Коллектив авторов, 2011

Секция 2

РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

*Председатель секции – Шарыгин Герман Сергеевич,
д.т.н., профессор, зав. каф. РТС*

УДК 621.396.2

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ И РЕАЛИЗАЦИЯ КОМПЛЕКСНОЙ СИСТЕМЫ ВИДЕОКОНФЕРЕНЦИЙ, ИСПОЛЬЗУЮЩЕЙ ЗАЩИЩЕННЫЕ IP VPN КАНАЛЫ

П.А. Ефремов, Н.В. Макаров, А.М. Голиков

Рассматривается разработанный авторами программный комплекс, обеспечивающий возможность проведения видеоконференций (лекций) преподавателя со студенческой аудиторией – до 50 студентов.

Ключевые слова: видеоконференции, высокоскоростные соединения, сервер видеоконференц-связи, видеокодеки, аудиокодеки, веб-камера, Web-сервера, интерфейс видеоконференции.

Для организации групповых видеоконференций, в которых участвуют несколько сторон (групп), в каждой из которых может быть по несколько участников, используют групповые системы видеоконференц-связи.

Системы групповой видеосвязи обычно устанавливаются в отдельных помещениях, например в переговорных комнатах или конференц-залах. Их непременный атрибут – большой плазменный ЖК телевизор или проектор для отображения участников видеоконференции.

Основное назначение групповых систем ВКС – обеспечить комфортную видеосвязь или видеоконференц-связь группы людей с удаленными собеседниками. В общем случае такой системе приходится решать две задачи. Первая заключается в видеосъемке одних участников видеоконференции и передаче их изображения (вместе со звуком от микрофона) другим. Вторая состоит в отображении картинки на одном или нескольких ТВ (мониторах) и выводе звука на динамики телевизора или акустические колонки (через звукоусиливающую аппаратуру). Чтобы все это обеспечить, групповые системы ВКС должны обладать большой вычислительной мощностью для обработки голосовой и видеoinформации в режиме реального времени (особенно в случае высокого качества видео), и поэтому они представляют собой сложные с инженерной точки зрения и довольно дорогостоящие продукты.

Групповые системы для видеоконференций можно разделить на системы начального уровня и системы бизнес-класса. Первые предназначены для подключения к минимально необходимому для работы аудиовидеооборудованию и поддерживают, в основном, соединение «точка-точка» (т.е. видеосвязь между двумя участниками или двумя группами участников). Вторые, как правило, более производительны, поддерживают высокоскоростные соединения и способны автоматически наводить камеру на говорящего. С помощью встроенного сервера видеоконференц-связи они позволяют организовать многопользовательские (много-

сторонние) видеоконференции и обладают широким набором сетевых интерфейсов и аудио- и видеопортов.

Принадлежность оборудования для групповых видеоконференций к тому или иному классу вовсе не означает, что оно обеспечивает общение более высокого качества. Выбор конкретного класса определяется задачами, которые возлагают на систему видеосвязи. Например, если в компании требуется наладить видеосвязь между несколькими отделениями (офисами), но в многосторонних конференциях нет нужды, то использовать системы бизнес-уровня не имеет смысла.

Пример наиболее часто используемой структуры корпоративной сети видеосвязи для малого и среднего бизнеса приведен на рис. 1.

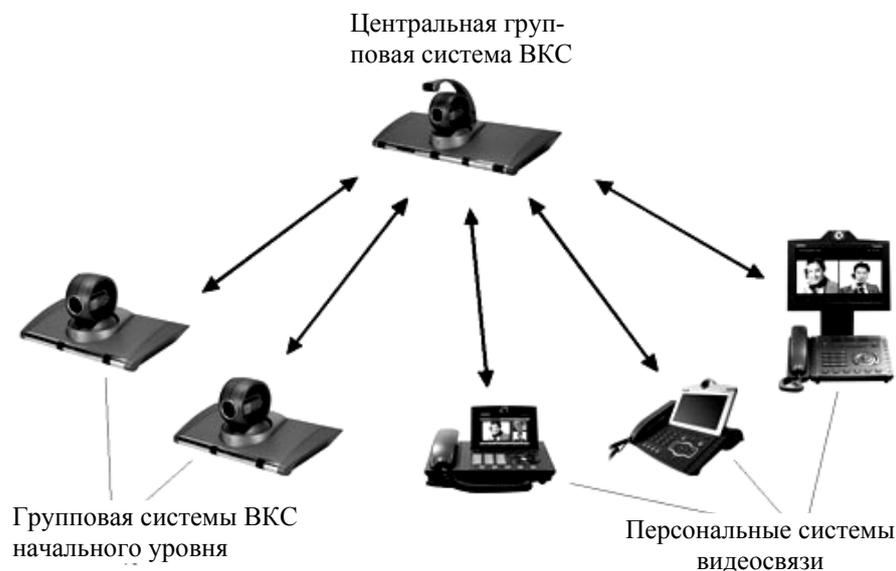


Рис. 1. Схема многопользовательской ВКС

Центральная групповая система ВКС располагается в центральном офисе компании. Она обеспечивает проведение видеоконференций. Эта система соединена с другими крупными офисами, где установлены групповые системы ВКС начального уровня или личные персональные терминалы видеосвязи сотрудников. Такая структура корпоративной сети видеосвязи позволяет, с одной стороны, организовывать все виды видеоконференций, а с другой – экономить на групповых терминалах.

В техническом описании любой групповой системы, предназначенной для организации видеосвязи и проведения видеоконференций, можно встретить длинный перечень поддерживаемых стандартов: видекодеки, аудиокодеки, стандарты совместной работы с данными, связи и управления. Между тем большая часть приводимых в описаниях характеристик не имеет практического значения.

Практическая часть. Выбор решений

Одним из важнейших критериев выбора будет являться открытость исходного кода. Так как программное решение будет внедряться в образовательной среде, то факт открытости исходного кода благотворно скажется на развитии навыков работы с подобными системами, на процессе доработки под нужды учебного

процесса. На данный момент этим требованиям удовлетворяет только система OpenMeetings.

OpenMeetings является бесплатным сервером веб-конференций, где можно организовывать захват экрана любого участника, передать его любому участнику, совместный доступ к документам, чат, разговоры и трансляции через веб-камеру с участниками. Широкая языковая поддержка. Строится на основе браузера.

Архитектура OpenMeetings

- * Client OpenLaszlo <http://www.openlaszlo.org>
- * Server (Remoting and Streaming) Red5 <http://www.osflash.org/red5>
- * Xuggler <http://www.xuggle.com>
- * Persistent Layer: Hibernate <http://www.hibernate.org>
- * Database: MySQL or Postgres, or any other with a Hibernate-Dialect (full-list)
- * DocumentConverter: OpenOffice <http://www.openoffice.org> and JOD

(<http://www.artofsolving.com/opensource/jodconverter>), for help in installing see: OpenOfficeConverter

- * ImageConverter: <http://www.imagemagick.org>
- * Axis2. see available/planned Services at SoapMethods (рис. 2).

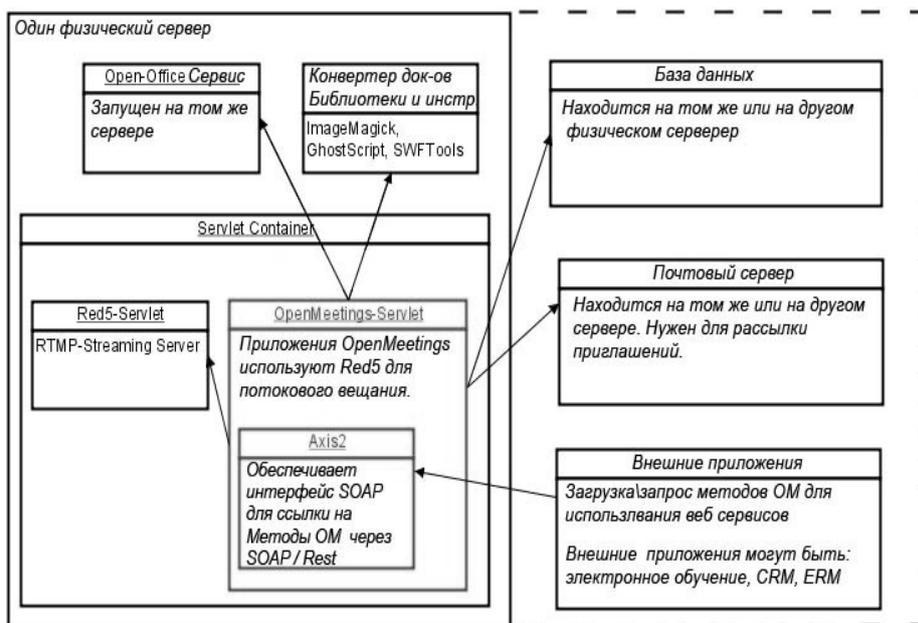


Рис. 2. Архитектура Web-сервера

Схемы подключения сервера. Ниже приведены схемы включения в локальную сеть организации сервера видеоконференции (рис. 3). Существуют две основные схемы подключения:

1. Сервер устанавливается в демилитаризованной зоне.
2. Сервер устанавливается в общей локальной сети.

Для того чтобы подключаемый сервер был виден из сети Интернет, необходимо дополнить конфигурацию роутера. Например, для роутера Cisco 2821 необходимо добавить в конфигурацию следующие команды:

```
ip nat inside source static tcp <local_ip> 1935 <global_ip> 1935 route-map <filter> extendable
ip nat inside source static tcp <local_ip> 5080 <global_ip> 5080 route-map <filter> extendable
ip nat inside source static tcp <local_ip> 8088 <global_ip> 8088 route-map <filter> extendable
```

В списках доступа надо разрешить соединения на соответствующие порты <global_ip>.

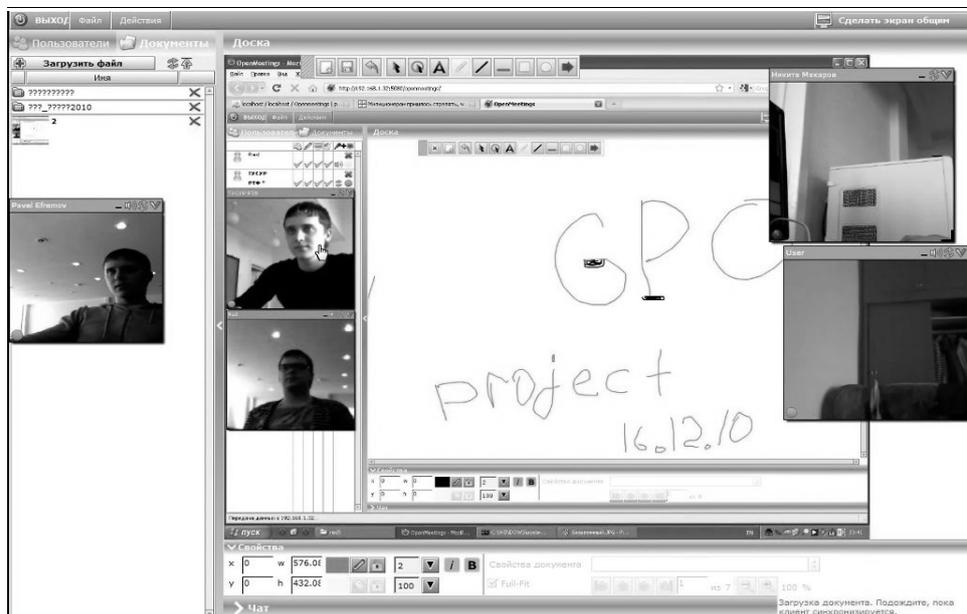


Рис. 3. Интерфейс видеоконференции

Конфигурация LDAP

Для конфигурации параметров LDAP необходимо иметь некий базовый уровень познаний в этой области, например ознакомиться с материалами по проекту OpenLDAP: <http://www.openldap.org/doc/admin24/intro.html#What is LDAP>. Для проверки правильности вводимых данных и работоспособности сервера LDAP нужна утилита JXplorer (<http://www.jxplorer.org>): используя её, можно зайти на сервер LDAP и проверить параметры соединения.

Настройка LDAP в OpenMeetings включает два шага:

- Укажите путь к установочному файлу в закладке Администрирование > Конфигурация администратором OpenMeetings (параметр `ldap_config_path`). По указанному пути должен лежать файл, пример которого находится в `openmeetings/conf/om_ldap.cfg`.

- Установите в установочном файле следующие поля:

`ldap_conn_url` – сервер: порт LDAP, `ldap_admin_dn` – distinguished name (DN) пользователя с правами на обращение к серверу LDAP, `ldap_passwd` – пароль пользователя сервера LDAP, `ldap_search_base` – в какой ветви осуществлять поиск введенных данных, `field_user_principal` – с каким полем записи сервера сравнивать введенные данные.

Если файл составлен правильно и данные верны, то после перезапуска сервера видеоконференций для авторизации пользователей будет в первую очередь использоваться LDAP, затем локальная таблица пользователей. Создание много-

пользовательской ВКС с использованием ПО с открытым кодом является довольно перспективным решением для небольших предприятий, которые не готовы платить за дорогостоящее оборудование. Также такое решение вполне подойдет для использования в вузовской кафедре для проведения групповых занятий.

Литература

1. Виталисов А.А. Преимущества создания систем видеонаблюдения на базе IP // Системы безопасности. 2007. №4. С. 34.
2. <http://www.mefedia.com/entry/openmeetings-basic-installation>

УДК 004.2

ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМА КРИПТОГРАФИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ AES И ЕГО АППАРАТНО-ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ В СРЕДЕ MATLAB

Ю.Д. Кузьменко, А.М. Голиков

Разработан аппаратно-программный комплекс, реализующий криптоалгоритм AES. С помощью пакета Matlab/Simulink были созданы блоки, которые выполняют различные функции, требуемые для корректной работы алгоритма. Данные блоки можно комбинировать для получения необходимого режима шифрования.

Ключевые слова: криптоалгоритм AES, Matlab/Simulink, ключи шифрования.

Основной задачей работы является создание виртуального прибора, осуществляющего шифрование/дешифрование информации при помощи алгоритма AES [1] с помощью пакета Matlab/Simulink [2]. *RIJNDAEL* – это итерационный блочный шифр, имеющий архитектуру «Квадрат». Шифр имеет переменную длину блоков и различные длины ключей. Длина ключа и длина блока могут быть равны независимо друг от друга 128, 192 или 256 битам. Стандарты *AES* берут название от размера ключа AES-128, 192, 256, соответственно определена длина блока данных, равная 128 битам.

Промежуточные результаты преобразований, выполняемых в рамках криптоалгоритма, называются состояниями (State). Состояние можно представить в виде прямоугольного массива байтов. При размере блока, равном 128 битам, этот 16-байтовый массив (рис. 1, а) имеет 4 строки и 4 столбца (каждая строка и каждый столбец в этом случае могут рассматриваться как 32-разрядные слова). Входные данные для шифра обозначаются как байты состояния в порядке $s_{00}, s_{10}, s_{20}, s_{30}, s_{01}, s_{11}, s_{21}, s_{31}, s_{02}, s_{12}, s_{22}, s_{32}, s_{03}, s_{13}, s_{23}, s_{33}$. После завершения действия шифра выходные данные получаются из байтов состояния в том же порядке. В общем случае число столбцов N_b равно длине блока, деленной на 32.

Ключ шифрования также представлен в виде прямоугольного массива с четырьмя строками. Число столбцов N_k этого массива равно длине ключа, деленной на 32. В стандарте определены ключи всех трех размеров – 128, 192 и 256 бит, т.е. соответственно 4, 6 и 8 32-разрядных слов (или столбца – в табличной форме представления). В некоторых случаях ключ шифрования рассматривается как линейный массив 4-байтовых слов. Слова состоят из 4 байтов, которые находятся в одном столбце (при представлении в виде прямоугольного массива).

S ₀₀	S ₀₁	S ₀₂	S ₀₃
S ₁₀	S ₁₁	S ₁₂	S ₁₃
S ₂₀	S ₂₁	S ₂₂	S ₂₃
S ₃₀	S ₃₁	S ₃₂	S ₃₃

k ₀₀	k ₀₁	k ₀₂	k ₀₃
k ₁₀	k ₁₁	k ₁₂	k ₁₃
k ₂₀	k ₂₁	k ₂₂	k ₂₃
k ₃₀	k ₃₁	k ₃₂	k ₃₃

а

б

Рис. 1. Форматы данных: а – пример представления блока ($N_b = 4$); б – ключа шифрования ($N_k = 4$), где s_{ij} и k_{ij} – соответственно байты массива State и ключа, находящиеся на пересечении i -й строки и j -го столбца

Число раундов N_r в алгоритме *RIJNDAEL* зависит от значений N_b и N_k . Раунд алгоритма состоит из четырех различных преобразований:

- замены байтов *SubBytes()* – побайтовой подстановки в 5-блоках с фиксированной таблицей замен размерностью 256;
- сдвига строк *ShiftRows()* – побайтового сдвига строк массива *State* на разное количество байт;
- перемешивания столбцов *MixColumns()* – умножения столбцов состояния, рассматриваемых как многочлены над $GF(2^8)$, на многочлен третьей степени $g(x)$ по модулю $x^4 + 1$;
- сложения с раундовым ключом *AddRoundKey()* – поразрядного XOR с текущим фрагментом развернутого ключа.

Рассмотрим подробнее каждое раундовое преобразование.

SubBytes так как данная процедура реализована на языке Matlab воспользуемся для визуализации блоком *Embedded Matlab Function* (для реализации последующих процедур будем пользоваться данным блоком).

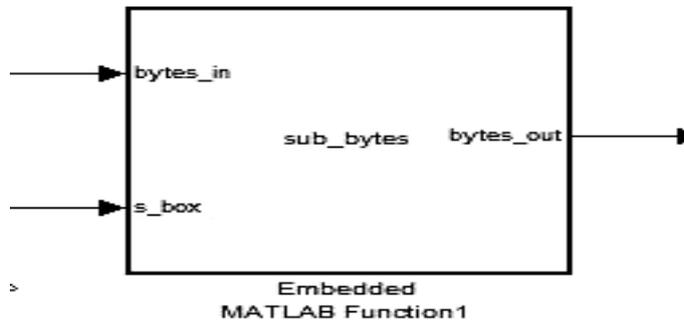


Рис. 2. Блок SubBytes

Данный блок представляет собой нелинейную замену байтов, выполняемую независимо с каждым байтом состояния. Таблицы замены S-блока являются инвертируемыми и построены из композиции следующих двух преобразований входного байта:

- 1) получение обратного элемента относительно умножения в поле $GF(2^8)$, нулевой элемент $\{00\}$ переходит сам в себя;
- 2) применение преобразования над $GF(2)$, определенного следующим образом:

$$\begin{bmatrix} b'_0 \\ b'_1 \\ b'_2 \\ b'_3 \\ b'_4 \\ b'_5 \\ b'_6 \\ b'_7 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \\ b_5 \\ b_6 \\ b_7 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Другими словами, суть преобразования может быть описана уравнениями:

$$b'_i = b_i b_{(i+4)\bmod 8} b_{(i+5)\bmod 8} b_{(i+6)\bmod 8} b_{(i+7)\bmod 8} c_i,$$

где $c_0 = c_1 = c_5 = c_6 = 1$, $c_2 = c_3 = c_4 = c_7 = 0$, b_i и b'_i – соответственно исходное и преобразованное значение i -го бита, $i = \overline{0,7}$.

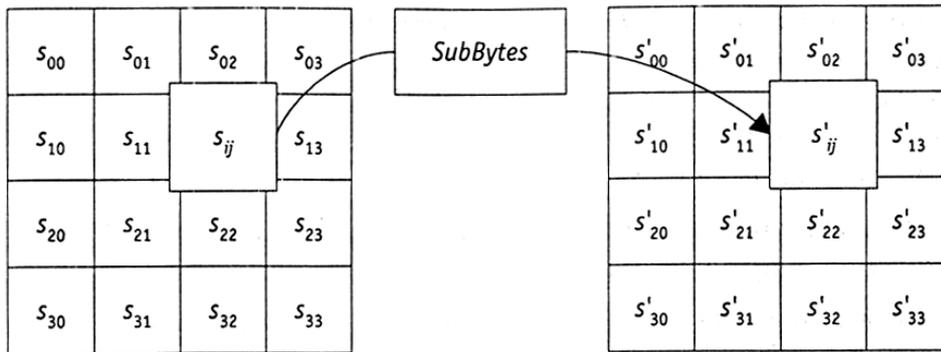


Рис. 3. SubBytes() действует на каждый байт состояния

Применение описанного S-блока ко всем байтам состояния обозначается как $SubBytes(State)$. Логика работы S-блока при преобразовании байта $\{xy\}$ отражена в рис. 3. Например, результат $\{ed\}$ преобразования байта $\{53\}$ находится на пересечении 5-й строки и 3-го столбца.

S-блок используется, как промежуточная операция в алгоритмах симметричного шифрования (рис. 4). Табличная подстановка, при которой группа битов отображается в другую группу битов.

Преобразование сдвига строк (ShiftRows). Последние 3 строки состояния циклически сдвигаются влево на различное число байтов (рис. 5). Строка 1 сдвигается на C_1 байт, строка 2 – на C_2 байт, и строка 3 – на C_3 байт. Значения сдвигов C_1 , C_2 и C_3 в *RIJNDAEL* зависят от длины блока N_b .

Преобразование перемешивания столбцов (MixColumns) (рис. 6). В этом преобразовании столбцы состояния рассматриваются как многочлены над $GF(2^8)$ и умножаются по модулю $x^4 + 1$ на многочлен $g(x)$, выглядящий следующим образом:

$$g(x) = \{03\}x^3 + \{01\}x^2 + \{01\}x + \{02\}.$$

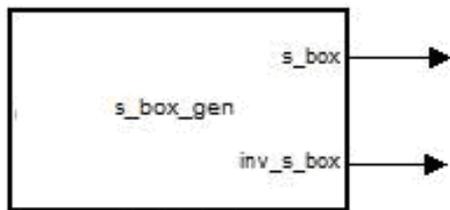


Рис. 4. Блок S-Box

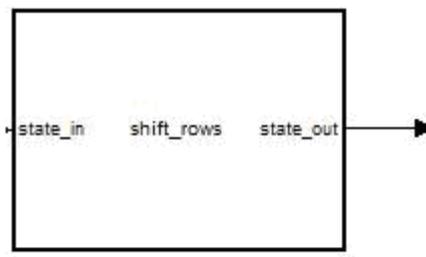


Рис. 5. Блок ShiftRows

Это может быть представлено в матричном виде следующим образом:

$$\begin{bmatrix} s'_{0c} \\ s'_{1c} \\ s'_{2c} \\ s'_{3c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 02 & 03 & 01 & 01 \\ 01 & 02 & 03 & 01 \\ 01 & 01 & 02 & 03 \\ 03 & 01 & 01 & 02 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_{0c} \\ s_{1c} \\ s_{2c} \\ s_{3c} \end{bmatrix}, \quad 0 \leq c \leq 3,$$

где c – номер столбца массива $State$.

Добавление раундового ключа (Add Round Key). В данной операции раундовый ключ добавляется к состоянию посредством простого поразрядного XOR (рис. 7). Раундовый ключ вырабатывается из ключа шифрования посредством алгоритма выработки ключей (Key Schedule). Длина раундового ключа (в 32-разрядных словах) равна длине блока N_b . Преобразование, содержащее добавление посредством XOR раундового ключа к состоянию, обозначено как $Add\ Round\ Key(State, Round\ Key)$.

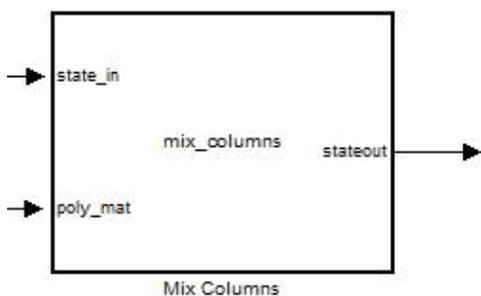


Рис. 6. Блок MixColumns

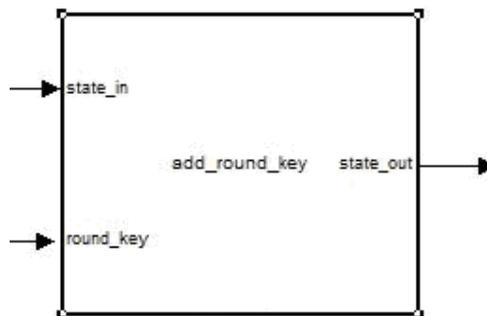


Рис. 7. Блок Add Round Key

Алгоритм выработки ключей (Key Schedule). Раундовые ключи получают-ся из ключа шифрования посредством алгоритма выработки ключей. Он содержит два компонента: *расширение ключа* (Key Expansion) и *выбор раундового ключа* (Round Key Selection). Основопологающие принципы алгоритма выглядят следующим образом:

- общее число битов раундовых ключей равно длине блока, умноженной на (число раундов плюс 1) (например, для длины блока 128 бит и 10 раундов требуется 1408 бит раундовых ключей);
- ключ шифрования расширяется в *расширенный ключ* (Expanded Key);

– в раундовые ключи берутся из расширенного ключа следующим образом: первый раундовый ключ содержит первые N_b слов, второй – следующие N_b слов и т.д.

Выбор раундового ключа (Round Key Selection). Раундовый ключ i получается из слов массива раундового ключа от $w[N_b i]$ и до $w[N_b (i + 1)]$, как показано на рис. 8. Расширенный ключ должен всегда получаться из ключа шифрования и никогда не указывается напрямую.

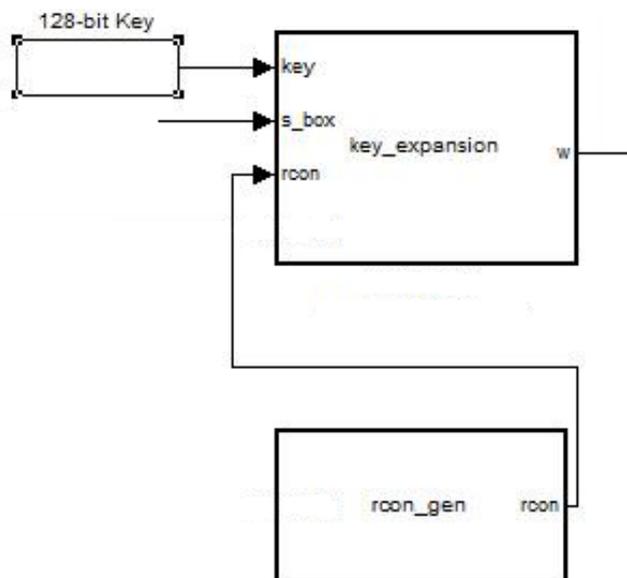


Рис. 8. Блок Key Schedule

Аппаратная часть. В результате работы были получены блоки совершающие те или иные действия, требуемые алгоритмом шифрования для выполнения требуемой задачи. Соединив данные блоки в цепь, получим раунд шифрования алгоритма AES. Использовать всего один раунд нет смысла, так как мы не обеспечим должной криптостойкости алгоритма, тем более существует атака, вскрывающая 4 раунда алгоритма. На рис. 9 изображен раунд преобразования алгоритма AES. Можно конечно создать сколько угодно таких блоков, но исследования проведенные NIST и самими создателями, показывают, что для AES-128 достаточно 10 раундов преобразований, для AES-192 – 12 раундов преобразований и для AES-256 – 14 раундов преобразований. Дальнейшее увеличение становится бессмысленным. Так как полностью изображенная схема слишком громоздка ограничимся представлением одного раунда, все последующие раунды можно представить, основываясь на первом раунде.

Схема расшифрования подобна схеме шифрования, только блоки меняются на инверсные.

Произведем кодирование и декодирование какого-нибудь документа, для того чтобы показать, каким образом происходит шифрование.

1) Загружаем в Matlab проект Crypt.mdlx, в котором реализован наш алгоритм шифрования. Загружаем документ, который необходимо зашифровать. Допустим, это курсовой проект под названием «Курсовой проект печать».

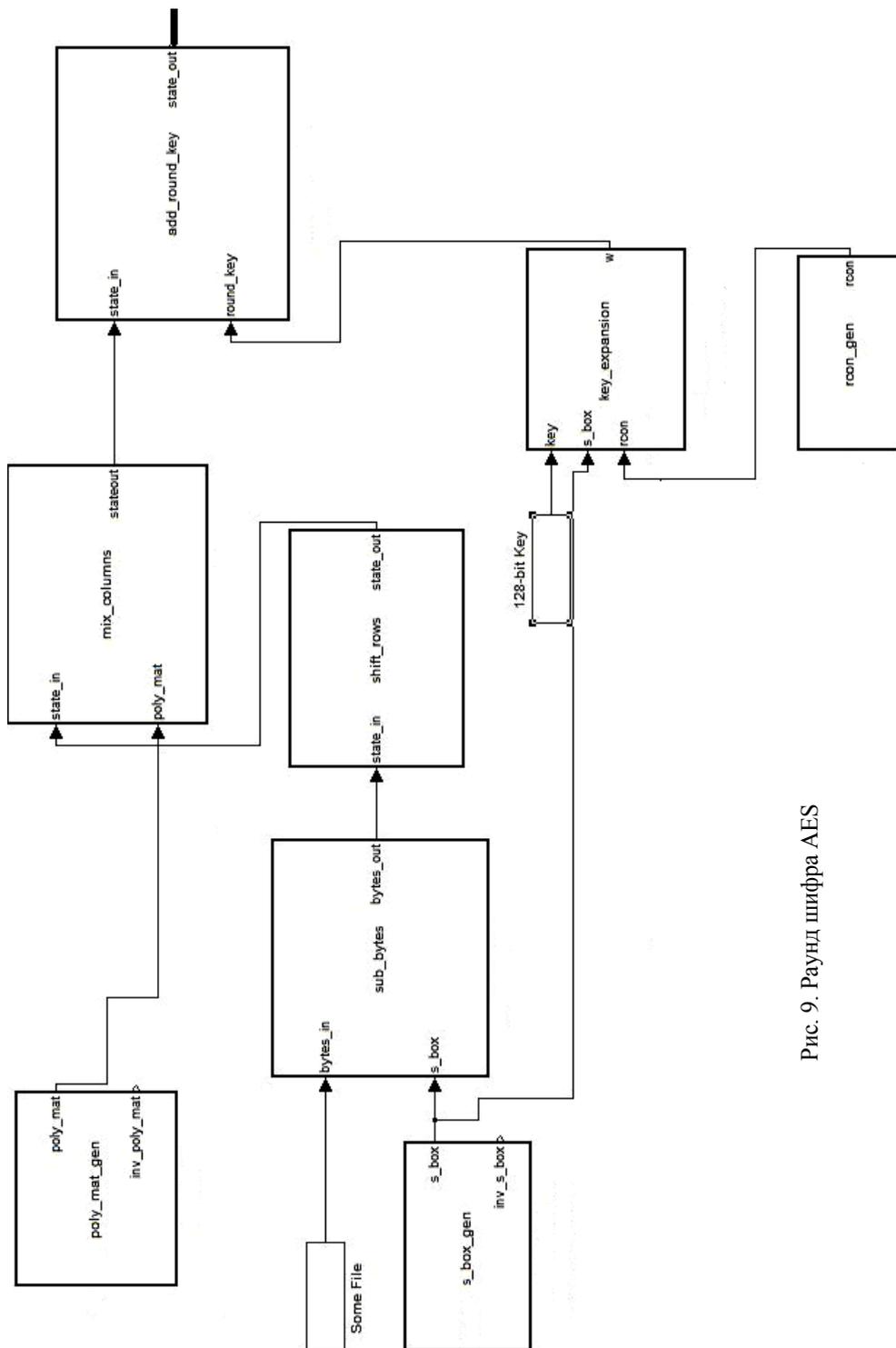


Рис. 9. Раунд шифра AES

2) В конце кодирования получаем зашифрованный файл под названием «En-



codedFile.docx». Данный файл будет того же формата, что и файл, который мы шифровали. Но стандартными средствами Windows открыть его не получится, так как при открытии выдается ошибка (рис. 10).

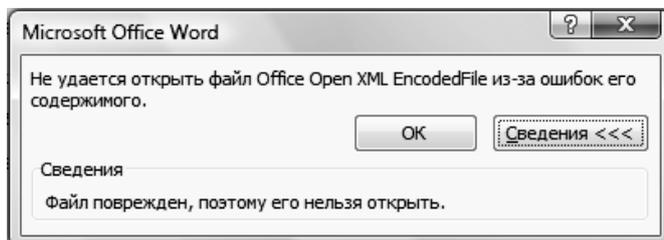


Рис. 10. Ошибка при открытии файла

Можно считать что кодирование документа было выполнено успешно.

3) Произведем дешифрование зашифрованного документа. Для дешифрования перестроим файл проект Crypt.mdlx, для того чтобы блоки выполняли инверсные операции. Произведем дешифрование, в конце декодирования получим



файл «DecodedFile.docx». который можно открыть средствами Windows. Сравним исходный файл и дешифрованный. Размер не изменился, формат не изменился, в самом документе каких-либо изменений и непонятных символов не обнаружено.

В ходе проделанной работы был реализован алгоритм шифрования AES. С помощью пакета Matlab/Simulink были созданы блоки, которые выполняют различные функции, требуемые для корректной работы алгоритма. Данные блоки можно комбинировать для получения необходимого режима шифрования. Расшифрование производится в обратном порядке для каждого режима. Проведены испытания быстродействия алгоритма. Они показали, что шифрование производится гораздо быстрее дешифрования. Связано это с тем, что в процессе дешифрования алгоритм перебирает варианты по всему ключевому пространству, поэтому время совершения дешифрования увеличивается. Наиболее простым в реализации считается режим ECB, так как происходит последовательное сцепление раундов. Наиболее сложным в реализации является CFB, так как возникает потребность в синхронизации процессов шифрования. Рекомендовать использовать какой-либо один режим шифрования нельзя, так как каждый из режимов может использоваться в различных ситуациях, например когда нам необходима быстрота выполнения алгоритма в том или ином направлении.

Литература

1. Зензин О.С., Иванов М.А. Стандарт криптографической защиты – AES. Ко-
нечные поля / Под ред. М.А. Иванова. М.: КУДИЦ-ОБРАЗ, 2002. 176 с.
2. Дьяконов В.П. Simulink 5/6/7. Самоучитель. М.: ДМК-Пресс, 2008. 768 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМА КРИПТОГРАФИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ ГОСТ 28147–89 И ЕГО АППАРАТНО-ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ НА ПЛИС

С.С. Логинов, А.М. Голиков

Подробно рассмотрен российский алгоритм криптографической защиты ГОСТ 28147–89 и способы его программной и аппаратной реализации. Базой для создания программно-аппаратного комплекса для шифрования и дешифровки данных является ПЛИС – приведены примеры реализации.

Ключевые слова: алгоритм криптографической защиты, ПЛИС, имитовставка, сети Фейстеля, гаммирование, симметричное шифрование.

В ходе работы был подробно рассмотрен российский алгоритм криптографической защиты ГОСТ 28147–89, его слабые и сильные стороны, способы его программной и аппаратной реализации. Кроме того, на его основе был создан программный и аппаратный шифровальные продукты, которые в будущем могут служить базой для создания программно-аппаратного комплекса для шифрования и дешифровки данных как на локальном компьютере, так и в сетях передачи информации. В дальнейшем планируется создание программно-аппаратных шифраторов на базе цифрового сигнального процессора или ПЛИС.

ГОСТ 28147–89 – российский стандарт симметричного шифрования, введенный в 1990 г., также является стандартом СНГ. Полное название – «ГОСТ 28147–89 Системы обработки информации. Защита криптографическая. Алгоритм криптографического преобразования». С момента опубликования ГОСТа на нём стоял ограничительный гриф «Для служебного пользования», и формально шифр был объявлен «полностью открытым» только в мае 1994 г. [1].

Алгоритм криптографического преобразования предназначен для аппаратной или программной реализации, удовлетворяет криптографическим требованиям и по своим возможностям не накладывает ограничений на степень секретности защищаемой информации. Стандарт обязателен для организаций, предприятий и учреждений, применяющих криптографическую защиту данных, хранимых и передаваемых в сетях, в отдельных вычислительных комплексах или на персональных компьютерах. То, что в его названии вместо термина «шифрование» фигурирует более общее понятие «криптографическое преобразование», вовсе не случайно. Помимо нескольких тесно связанных между собой процедур шифрования, в документе описан один построенный на общих принципах с ними алгоритм выработки имитовставки. Имитовставка – отрезок информации фиксированной длины, полученный по определенному правилу из открытых данных и ключа и добавленный к зашифрованным данным для обеспечения имитозащиты (защиты системы шифрованной связи от навязывания ложных данных).

К симметричному шифрованию предъявляются следующие требования:

- Отсутствие линейности (т.е. условия $f(a) \text{ xor } f(b) = f(a \text{ xor } b)$), в противном случае облегчается применение дифференциального криптоанализа к шифру.

- Полная утрата всех статистических закономерностей исходного сообщения. Для этого шифр должен иметь «эффект лавины». Лавинный эффект проявляется в зависимости всех выходных битов от каждого входного бита:

- 1) криптографический алгоритм удовлетворяет *лавинному критерию*, если при изменении одного бита входной последовательности изменяется в среднем половина выходных битов.

2) криптографический алгоритм удовлетворяет *строгому лавинному критерию*, если при изменении одного бита входной последовательности каждый бит выходной последовательности изменяется с вероятностью одна вторая.

3) криптографический алгоритм удовлетворяет *критерию независимости битов*, если при изменении любого входного бита любые два выходных бита изменяются независимо.

Алгоритм ГОСТ 28147–89 является *блочным шифром* – разновидность симметричного шифра. Особенностью блочного шифра является обработка блока нескольких байт за одну итерацию (как правило, 8 или 16). Как и большинство современных блочных шифров, ГОСТ основан на *сети Фейстеля*. Сеть представляет собой определённую многократно повторяющуюся (итерированную) структуру, называемую ячейкой Фейстеля. При переходе от одной ячейки к другой меняется ключ, причём выбор ключа зависит от конкретного алгоритма.

Операции шифрования и расшифрования на каждом этапе очень просты и при определённой доработке совпадают, требуя только обратного порядка используемых ключей. Шифрование при помощи данной конструкции легко реализуется как на программном уровне, так и на аппаратном, что обеспечивает широкие возможности применения.

1. Каждый блок разбивается на два «подблока» (левый и правый соответственно).

2. Исходное заполнение правого блока записывается в левый блок на выходе.

3. Над правым блоком производится криптографическое преобразование с применением ключевых данных.

4. Левый (исходный) и правый (преобразованный) блоки складываются по модулю 2.

5. Полученная комбинация записывается в правый блок на выходе.

6. Так повторяется несколько раз.

В ГОСТе ключевая информация состоит из двух структур данных. Помимо собственно ключа, необходимого для всех шифров, она содержит еще и таблицу замен. Ниже приведены основные характеристики ключевых структур ГОСТа:

1. *Таблица замен K* состоит из восьми узлов замены $K_1, K_2, K_3, K_4, K_5, K_6, K_7, K_8$ с памятью на 64 бита каждый. Поступающий на блок подстановки 32-разрядный вектор разбивается на восемь последовательно идущих 4-разрядных векторов, каждый из которых преобразуется в 4-разрядный вектор соответствующим узлом замены, представляющим собой таблицу из шестнадцати строк, содержащих по четыре бита заполнения в строке. Входной вектор определяет адрес строки в таблице, заполнение данной строки является выходным вектором. Затем 4-разрядные выходные векторы последовательно объединяются в 32-разрядный вектор.

Таким образом, общий объем таблицы замен равен 512 бит (64 байта).

2. При сложении и циклическом сдвиге двоичных векторов старшими разрядами считаются разряды накопителей с большими номерами.

3. При записи ключа (W_1, W_2, \dots, W_{256}), $W_q \in \{0, 1\}$, $q = 1 \div 256$, в ключевое запоминающее устройство (КЗУ) значение W_1 вводится в 1-й разряд накопителя X_0 , значение W_2 вводится во 2-й разряд накопителя X_0 , ..., значение W_{32} вводится в 32-й разряд накопителя X_0 ; значение W_{33} вводится в 1-й разряд накопителя X_1 , значение W_{34} вводится во 2-й разряд накопителя X_1 , ..., значение W_{64} вводится в 32-й разряд накопителя X_1 ; значение W_{65} вводится в 1-й разряд накопителя X_2 и т.д., значение W_{1256} вводится в 32-й разряд накопителя X_7 .

4. При перезаписи информации содержимое p -го разряда одного накопителя (сумматора) переписывается в p -й разряд другого накопителя (сумматора).

5. Ключи, определяющие заполнения КЗУ и таблиц блока подстановки K , являются секретными элементами и поставляются в установленном порядке.

Ключ является массивом из восьми 32-битовых элементов кода в ГОСТе, элементы ключа используются как 32-разрядные целые числа без знака. Таким образом, размер ключа составляет 256 бит (32 байта). Ключ должен являться массивом статистически независимых битов, принимающих с равной вероятностью значения 0 и 1. При этом некоторые конкретные значения ключа могут оказаться «слабыми», т.е. шифр может не обеспечивать заданный уровень стойкости в случае их использования. Однако предположительно доля таких значений в общей массе всех возможных ключей ничтожно мала. Поэтому ключи, выработанные с помощью некоторого датчика истинно случайных чисел, будут качественными с вероятностью, отличающейся от единицы на ничтожно малую величину.

Режимы шифрования. ГОСТ 28147–89 предусматривает следующие режимы шифрования данных:

- простая замена,
- гаммирование,
- гаммирование с обратной связью,
- дополнительный режим выработки имитовставки.

В любом из этих режимов данные обрабатываются блоками по 64 бита, на которые разбивается массив, подвергаемый криптопреобразованию. Однако в двух режимах гаммирования есть возможность обработки неполного блока данных размером меньше 8 байт, что существенно при шифровании массивов данных с произвольным размером, который может быть не кратным 8 байтам.

Достоинства ГОСТа:

- бесперспективность силовой атаки, т.е. полным перебором (XSL-атаки в учёт не берутся, т.к. их эффективность на данный момент полностью не доказана);
- эффективность реализации и соответственно высокое быстродействие на современных компьютерах;
- наличие защиты от навязывания ложных данных (выработка имитовставки) и одинаковый цикл шифрования во всех четырех алгоритмах ГОСТа.

Недостатки ГОСТа. Основные проблемы ГОСТа связаны с неполнотой стандарта в части генерации ключей и таблиц замен. Тривиально доказывается, что у ГОСТа существуют «слабые» ключи и таблицы замен, но в стандарте не описываются критерии выбора и отсева «слабых». Также стандарт не специфицирует алгоритм генерации таблицы замен (К-блоков). С одной стороны, это может являться дополнительной секретной информацией (помимо ключа), а с другой – поднимает ряд проблем:

- нельзя определить криптостойкость алгоритма, не зная заранее таблицы замен;
- реализации алгоритма от различных производителей могут использовать разные таблицы замен и могут быть несовместимы между собой;
- возможность преднамеренного предоставления слабых таблиц замен лицензирующими органами;
- потенциальная возможность (отсутствие запрета в стандарте) использования таблиц замены, в которых узлы не являются перестановками, что может привести к чрезвычайному снижению стойкости шифра.

Аппаратная реализация алгоритма. В учебном семестре был создан программный шифровальный комплекс на базе языка программирования C++.

- В следующем семестре стояла задача построения «начинки» аппаратного шифровального комплекса, используя логические узлы и элементы.

- Для виртуальной реализации шифровального блока было выбрано приложение Simulink программы Matlab, как наиболее функциональное и простое в обращении.

- В данной работе представлен основной шаг криптопреобразования (рис. 1).

- При создании на его основе циклической структуры можно получить все режимы шифрования алгоритмом ГОСТ [1, 2].

Методика разработки виртуального устройства

1. Определить задачу и требуемые результаты.
2. Выделить дополнительные требования и условия, налагаемые на разработку.
3. Определиться с методом реализации продукта.
4. Продумать возможные пути решения задачи.
5. Определить необходимость использования того или иного пакета разработчика.
6. Обозначить входные и выходные параметры.
7. Составить словесное описание основных функций, которые будет выполнять устройство.
8. Построить структурную схему основных блоков.
9. Определить возможные системы взаимодействия блоков друг с другом.
10. Разработать пошаговую реализацию команд для каждого блока.
11. По необходимости разработать подсистемы внутри основных блоков, для упрощения реализации программы и взаимодействия ее внутренних структур.
12. Провести анализ разработанных блоков и систем, с целью проверки их обоснованности и возможности упрощения структуры будущего продукта.
13. Определиться с элементной базой.
14. Разработать принципиальную схему, используя набор возможностей программного пакета.
15. Произвести рационализацию полученной схемы для облегчения ее понимания другими пользователями и увеличения производительности аппаратуры, на которой будет реализовываться продукт.
16. Произвести построение виртуальной модели продукта с использованием программного пакета и разработанных схем.
17. Проверить правильность построения, соединения и расположения элементов и блоков.
18. При помощи тестирующих сигналов и/или констант проверить работоспособность и правильность выполнения задач продукта.
19. Составить отчет по проделанной работе, указав назначение элементов, осуществляемые блоками функции и сопроводив его техническими схемами и характеристиками разработанного продукта.

Структурная схема построения устройства для реализации на ПЛИС

В ходе работы был подробно изучен российский алгоритм криптографической защиты ГОСТ 28147–89, его слабые и сильные стороны, способы его программной и аппаратной реализации. Кроме того, на его основе был создан программный и аппаратный шифровальные продукты, которые в будущем могут служить базой для создания программно-аппаратного комплекса для шифрова-

ния и дешифровки данных как на локальном компьютере, так и в сетях передачи информации.

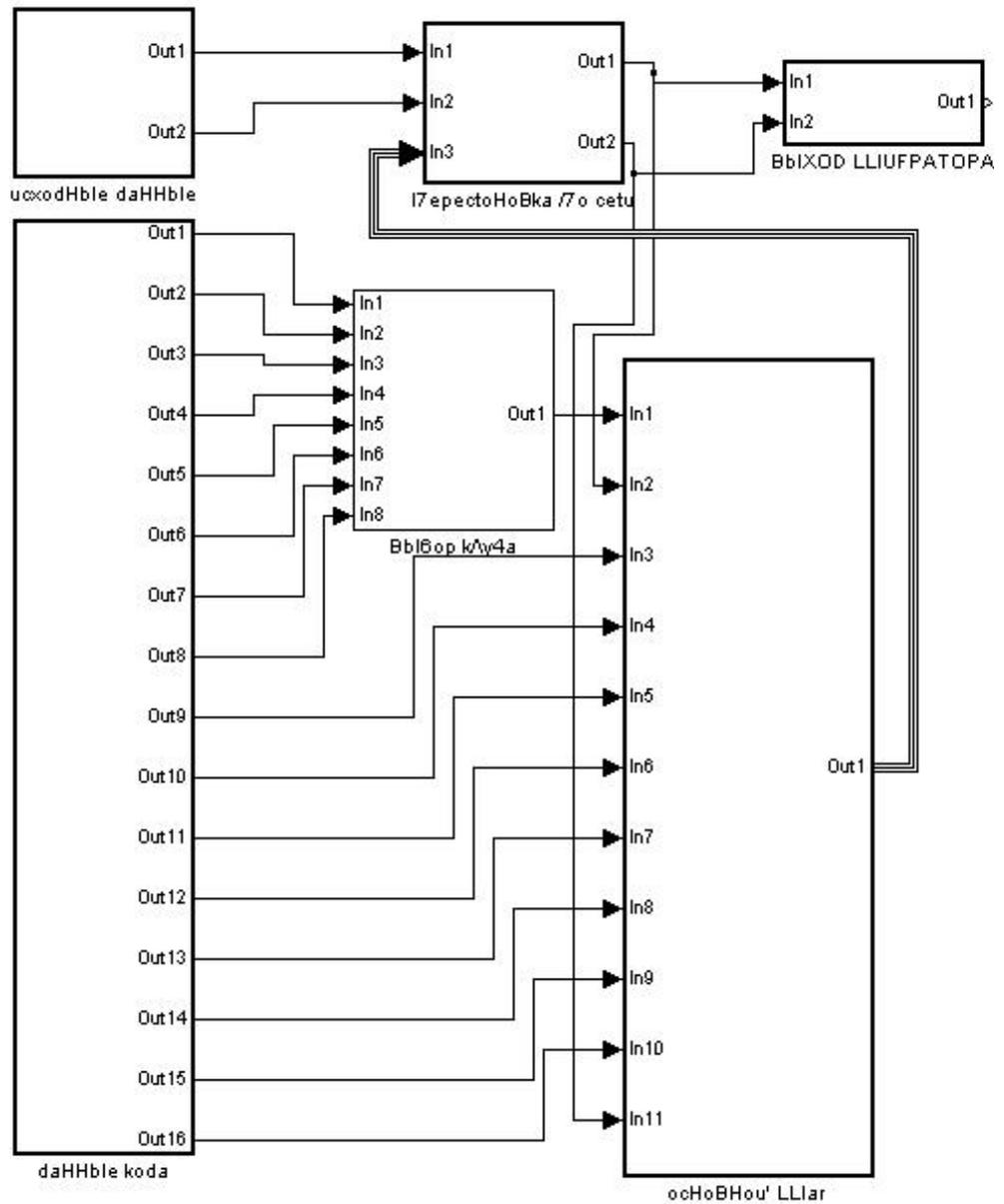


Рис. 1. Структурная схема режима простой замены

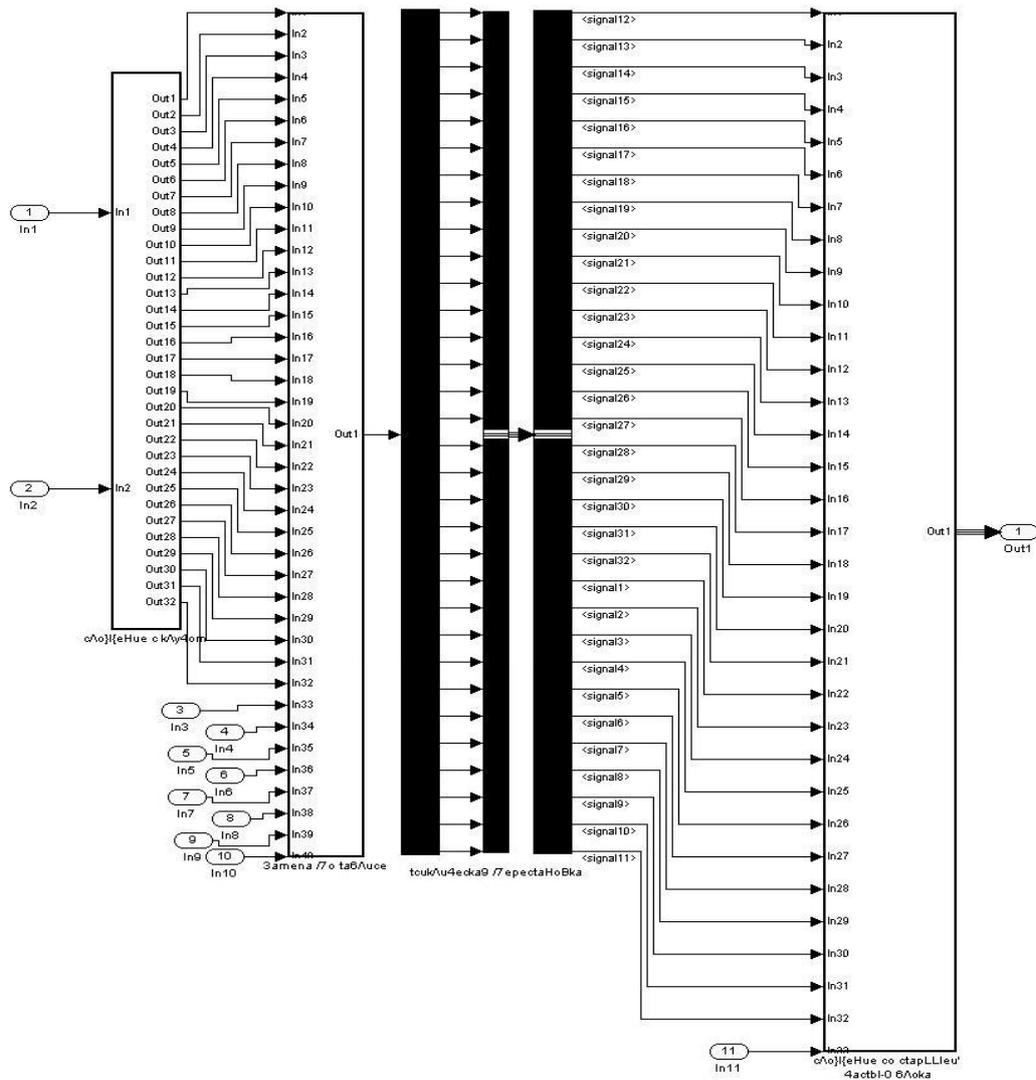


Рис. 2. Структурная схема основного шага криптопреобразования

В дальнейшем планируется создание программно-аппаратных шифраторов на базе цифрового сигнального процессора или ПЛИС (рис. 2), не уступающих по своим характеристикам шифровальным комплексам «Криптон». Также планируется рассмотрение возможности использования ГОСТа для создания поточного сетевого шифратора.

Литература

1. ГОСТ 28147–89 / Группа П85 / Государственный стандарт Союза ССР / Системы обработки информации. Защита криптографическая / Алгоритм криптографического преобразования / ОКП 40 4000 / Дата введения: 07.01.1990
2. Понасенко С.П. Комплексная защита информации на базе аппаратных шифраторов // Вопросы защиты информации. 2003. №4.

**ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ СКРЕМБЛИРОВАНИЯ
И СТЕГАНОГРАФИИ И ИХ АППАРАТНО-ПРОГРАММНАЯ
РЕАЛИЗАЦИЯ В СРЕДЕ MATLAB**

Н.Н. Нестеренко, А.М. Голиков

Производится проектирование скремблера на базе сигнального процессора и программного обеспечения MATLAB, рассматривается аппаратно-программная реализация алгоритмов стеганографии.

Ключевые слова: скремблер, стеганография, сигнальный процессор, фазовое кодирование, стегосообщения, цифровые водяные знаки.

Скремблирование цифрового сигнала. Суть скремблирования заключается в побитном изменении проходящего через систему потока данных. Практически единственной операцией, используемой в скремблерах, является XOR – «побитное исключающее ИЛИ». Параллельно прохождению информационного потока в скремблере по определенному правилу генерируется поток бит – кодирующий поток. Как прямое, так и обратное шифрование осуществляется наложением по XOR кодирующей последовательности на исходную.

Генерация кодирующей последовательности бит производится циклически из небольшого начального объема информации – ключа по следующему алгоритму. Из текущего набора бит выбираются значения определенных разрядов и складываются по XOR между собой. Все разряды сдвигаются на 1 бит, а только что полученное значение («0» или «1») помещается в освободившийся самый младший разряд. Значение, находившееся в самом старшем разряде до сдвига, добавляется в кодирующую последовательность, становясь очередным ее битом (рис. 1).

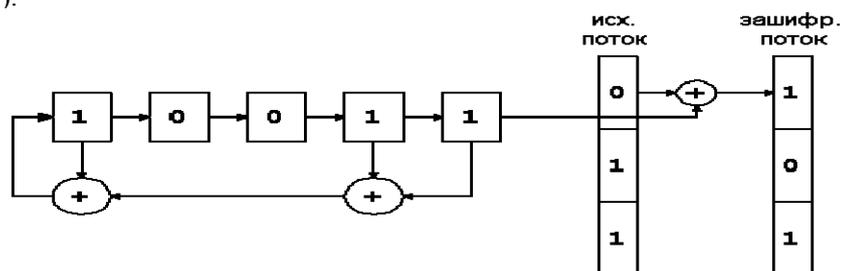


Рис. 1. Схема скремблирования

Из теории передачи данных криптография заимствовала для записи подобных схем двоичную систему записи. По ней изображенный на рисунке скремблер записывается комбинацией «10011₂» – единицы соответствуют разрядам, с которых снимаются биты для формирования обратной связи.

Как видим, устройство скремблера предельно просто. Его реализация возможна как на электронной, так и на программной базе, что и обеспечило его широкое применение. Более того, тот факт, что каждый бит выходной последовательности зависит только от одного входного бита, еще более упрочило положение скремблеров в защите потоковой передачи данных. Это связано с неизбежно возникающими в канале передаче помехами, которые могут исказить в этом случае только те биты, на которые они приходятся, а не связанную с ними группу байт, как это имеет место в блочных шифрах.

Декодирование заскремблированных последовательностей происходит по той же самой схеме, что и кодирование. Именно для этого в алгоритмах применяется результирующее кодирование по «исключающему ИЛИ» – схема, однозначно восстанавливаемая при раскодировании без каких-либо дополнительных вычислительных затрат. Произведем декодирование полученного фрагмента.

Главная проблема шифров на основе скремблеров – синхронизация передающего (кодирующего) и принимающего (декодирующего) устройств. При пропуске или ошибочном вставлении хотя бы одного бита вся передаваемая информация необратимо теряется. Поэтому в системах шифрования на основе скремблеров очень большое внимание уделяется методам синхронизации. На практике для этих целей обычно применяется комбинация двух методов:

а) добавление в поток информации синхронизирующих битов, заранее известных приемной стороне, что позволяет ей при ненахождении такого бита активно начать поиск синхронизации с отправителем;

б) использование высокоточных генераторов временных импульсов, что позволяет в моменты потери синхронизации производить декодирование принимаемых битов информации «по памяти» без синхронизации.

Число бит, охваченных обратной связью, т.е. разрядность устройства памяти для порождающих кодирующую последовательность бит, называется разрядностью скремблера. Изображенный выше скремблер имеет разрядность 5. В отношении параметров криптостойкости данная величина полностью идентична длине ключа блочных шифров, который будет проанализирован далее. На данном же этапе важно отметить, что чем больше разрядность скремблера, тем выше криптостойкость системы, основанной на его использовании.

При достаточно долгой работе скремблера неизбежно возникает его закливание. По выполнении определенного числа тактов в ячейках скремблера создается комбинация бит, которая в нем уже однажды оказывалась, и с этого момента кодирующая последовательность начнет циклически повторяться с фиксированным периодом. Данная проблема неустранима по своей природе, так как в N разрядах скремблера не может пребывать более 2^N комбинаций бит, и, следовательно, максимум через $2^N - 1$ циклов повтор комбинации обязательно произойдет. Комбинация «все нули» сразу же исключается из цепочки графа состояний скремблера – она приводит скремблер к такому же положению «все нули». Это указывает еще и на то, что ключ «все нули» неприменим для скремблера. Каждый генерируемый при сдвиге бит зависит только от нескольких бит хранимой в данный момент скремблером комбинации. Поэтому после повторения некоторой ситуации, однажды уже встречавшейся в скремблере, все следующие за ней будут в точности повторять цепочку, уже прошедшую ранее в скремблере.

Общая структурная схема скремблера на базе сигнального процессора

Источником информации для нашего скремблера может быть аналоговый сигнал (звуковой сигнал) стандартной полосы 3,1 кГц. Он оцифровывается АЦП, которое встроено в плату EZ-KIT Lite, с частотой 8 кГц и выборкой 8 бит на отсчет. Таким образом, получаем стандартный цифровой поток 64 кГц, который поступает на регистр R1. Возможен вариант обработки цифрового сигнала, который поступает на вход скремблера, минуя АЦП. Цифровой сигнал может поступать со скоростями 64, 128, 256 кГц. Скорость обработки определяется на начальном этапе после включения, в момент синхронизации. АЦП также можно настроить на преобразование с выходным сигналом 128, 256 кГц, но в этом случае необходим программный переход на другой режим работы.

Итак, мы имеем цифровой сигнал, с которым и будет осуществляться алгоритм скремблирования. Алгоритм скремблирования будет проходить в два этапа. На первом этапе с помощью ключа, хранящегося в памяти программы генерируется псевдослучайная последовательность. Генератор псевдослучайной последовательности построен на регистре RG0 по принципу, описанному ранее. Длина регистра 36, обратные связи осуществлены с ячейками 14, 17, 21, 25, 33. Длина периода повторения псевдослучайной последовательности примерно 10^{10} бит. Таким образом, при скорости передачи 64 Кбит/с время периода последовательности 12 дней, при скорости передачи 256 Кбит/с – 3 дня. При том что передача данных будет в реальном времени и будет носить сеансовый характер, такая длина последовательности достаточна. Блок кодирования K1 задает параметры обратных связей и начальное состояние регистра, обеспечивая криптозащиту передачи.

На втором этапе скремблирования данные DATA и сопровождающий их сигнал синхронизации CLK поступают на вход регистра RG1. Фронты сигнала CLK (моменты T0, T1, ..., T18 на рис.1) соответствуют границам между битовыми интервалами сигнала данных DATA. По фронтам сигнала CLK изменяется содержимое регистра RG1 (диаграмма сигнала SDATA), генератор F переходит в новое состояние. При этом формируется очередной псевдослучайный бит RND, который складывается по модулю два с битом данных DATA и преобразуется в скремблированный бит данных SCRD. По окончании переходных процессов в момент формирования спада сигнала CLK бит SCRD принимается в триггер D3 (диаграмма сигнала DLINE) и через усилитель D6 передается в линию связи. Подробно работа регистров описана ранее. Усилитель D6 (D7) предназначен для передачи (приема) скремблированного сигнала данных в линию (из линии). Параметры усилителей D6 и D7 определяются типом линии связи, которая может быть выполнена в виде витой пары проводов, коаксиального или оптоволоконного кабеля и т.п.

На приемном конце происходит организация обратного алгоритма. Общая структурная схема скремблера представлена на рис. 2.

Применение предлагаемой системы «скремблер–дескремблер» позволяет повысить скорость передачи полезных данных и уменьшить их потери при восстановлении нарушенной синхронизации благодаря исключению из потока данных служебной синхронизирующей информации.

Цифровая стеганография – направление классической стеганографии, основанное на сокрытии или внедрении дополнительной информации в цифровые объекты, вызывая при этом некоторые искажения этих объектов. Но, как правило, данные объекты являются мультимедиа-объектами (изображения, видео, аудио, текстуры 3D-объектов) и внесение искажений, которые находятся ниже порога чувствительности среднестатистического человека, не приводит к заметным изменениям этих объектов. Кроме того, в оцифрованных объектах, изначально имеющих аналоговую природу, всегда присутствует шум квантования; далее, при воспроизведении этих объектов появляется дополнительный аналоговый шум и нелинейные искажения аппаратуры, все это способствует большей незаметности сокрытой информации.

Из рамок цифровой стеганографии вышло наиболее востребованное легальное направление – встраивание цифровых водяных знаков (ЦВЗ) (watermarking), являющееся основой для систем защиты авторских прав и DRM (Digital rights

management) систем. Методы этого направления настроены на встраивание скрытых маркеров, устойчивых к различным преобразованиям контейнера (атакам).

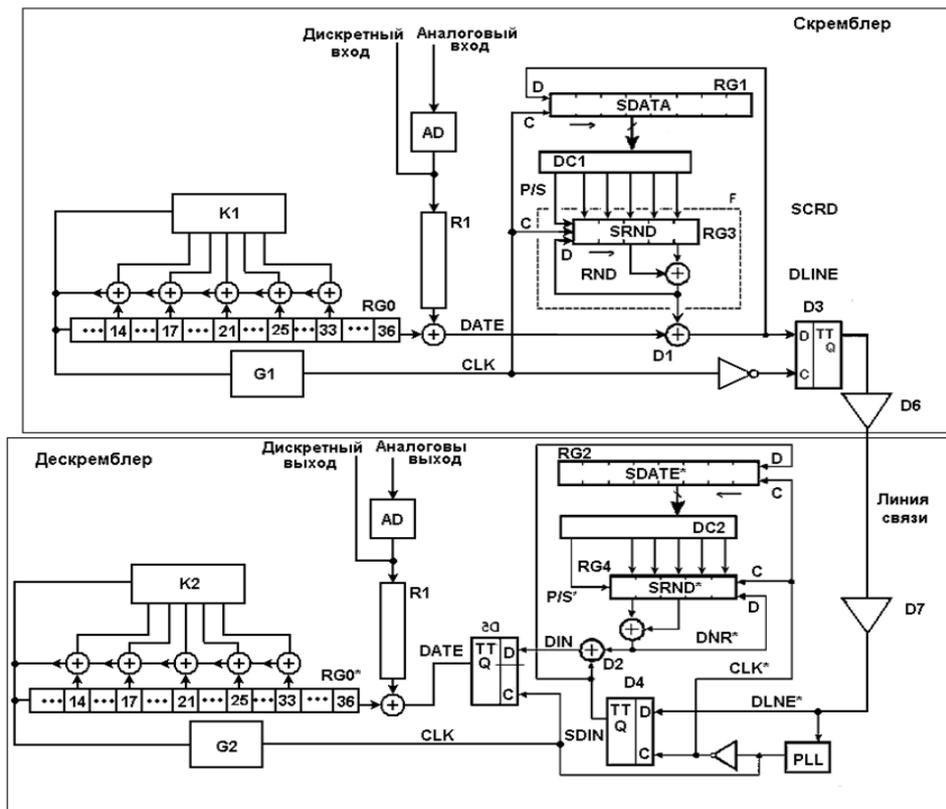


Рис. 2. Структурная схема скремблера

Полухрупкие и хрупкие ЦВЗ используются в качестве аналоговой ЭЦП, обеспечивая хранение информации о передаваемой подписи и попытках нарушения целостности контейнера (канала передачи данных). Например, разработки Digimarc в виде плагинов к редактору Adobe Photoshop позволяют встроить в само изображение информацию об авторе. Однако такая метка неустойчива, впрочем, как и абсолютное их большинство. Программа Stirmark, разработчиком которой является ученый Fabien Petitcolas, с успехом атакует подобные системы, разрушая стеговложения.

Все алгоритмы встраивания скрытой информации можно разделить на несколько подгрупп:

- Работающие с самим цифровым сигналом. Например, метод LSB.
- «Впаивание» скрытой информации. В данном случае происходит наложение скрываемого изображения (звука, иногда текста) поверх оригинала. Часто используется для встраивания ЦВЗ.
- Использование особенностей форматов файлов. Сюда можно отнести запись информации в метаданные или в различные другие не используемые резервированные поля файла.

По способу встраивания информации стегоалгоритмы можно разделить на линейные (аддитивные), нелинейные и др. Алгоритмы аддитивного внедрения

информации заключаются в линейной модификации исходного изображения, а ее извлечение в декодере производится корреляционными методами. При этом ЦВЗ обычно складывается с изображением-контейнером либо «вплавляется» (fusion) в него. В нелинейных методах встраивания информации используется скалярное либо векторное квантование. Среди других методов определенный интерес представляют методы, использующие идеи фрактального кодирования изображений. К аддитивным алгоритмам можно отнести: 1) A17 (Cox); 2) A18 (Barni); 3) L18D (Lange); 4) A21 (J. Kim); 5) A25 (C. Podilchuk).

Метод LSB (Least Significant Bit, наименьший значащий бит) – суть этого метода заключается в замене последних значащих битов в контейнере (изображения, аудио- или видеозаписи) на биты скрываемого сообщения. Разница между пустым и заполненным контейнерами должна быть не ощутима для органов восприятия человека.

Суть метода заключается в следующем. Допустим, имеется 8-битное изображение в градациях серого. 00h (0000000b) обозначает черный цвет, FFh (1111111b) – белый. Всего имеется 256 градаций (2^8). Также предположим, что сообщение состоит из 1 байта – например 01101011b. При использовании 2 младших бит в описаниях пикселей нам потребуется 4 пикселя. Допустим, они черного цвета. Тогда пиксели, содержащие скрытое сообщение, будут выглядеть следующим образом: 00000001 00000010 00000010 00000011. Тогда цвет пикселей изменится: первого – на $1/255$, второго и третьего – на $2/255$ и четвертого – на $3/255$. Такие градации, мало того что незаметны для человека, могут вообще не отобразиться при использовании низкокачественных устройств вывода.

Методы LSB являются неустойчивыми ко всем видам атак и могут быть использованы только при отсутствии шума в канале передачи данных.

Обнаружение LSB-кодированного стего осуществляется по аномальным характеристикам распределения значений диапазона младших битов отсчетов цифрового сигнала. Все методы LSB являются, как правило, аддитивными (A17, L18D).

Другие методы скрытия информации в графических файлах ориентированы на форматы файлов с потерей, к примеру JPEG. В отличие от LSB, они более устойчивы к геометрическим преобразованиям. Это получается за счёт варьирования в широком диапазоне качества изображения, что приводит к невозможности определения источника изображения.

Эхо-методы применяются в цифровой аудиостеганографии и используют неравномерные промежутки между эхо-сигналами для кодирования последовательности значений. При наложении ряда ограничений соблюдается условие незаметности для человеческого восприятия. Эхо характеризуется тремя параметрами: начальной амплитудой, степенью затухания, задержкой. При достижении некоего порога между сигналом и эхом они смешиваются. В этой точке человеческое ухо не может уже отличить эти два сигнала. Наличие этой точки сложно определить, и она зависит от качества исходной записи, слушателя. Чаще всего используется задержка около $1/1000$, что вполне приемлемо для большинства записей и слушателей. Для обозначения логического нуля и единицы используются две различные задержки. Они обе должны быть меньше, чем порог чувствительности уха слушателя к получаемому эху. Эхо-методы устойчивы к амплитудным и частотным атакам, но неустойчивы к атакам по времени.

Фазовое кодирование (phase coding, фазовое кодирование) – также применяется в цифровой аудиостеганографии. Происходит замена исходного звукового

элемента на относительную фазу, которая и является секретным сообщением. Фаза подряд идущих элементов должна быть добавлена таким образом, чтобы сохранить относительную фазу между исходными элементами. Фазовое кодирование является одним из самых эффективных методов скрытия информации.

Метод расширенного спектра. Метод встраивания сообщения заключается в том, что специальная случайная последовательность встраивается в контейнер, затем, используя согласованный фильтр, данная последовательность детектируется. Данный метод позволяет встраивать большое количество сообщений в контейнер, и они не будут создавать помехи друг другу. Метод заимствован из широкополосной связи.

Атаки на стегосистемы. Под атакой на стегосистему понимается попытка обнаружить, извлечь, изменить скрытое стеганографическое сообщение. Такие атаки называются стегоанализом по аналогии с криптоанализом для криптографии. Наиболее простая атака – субъективная. Внимательно рассматривается изображение, прослушивается звукозапись в попытках найти признаки существования в нем скрытого сообщения. Такая атака имеет успех лишь для совсем незащищенных стегосистем. Обычно это первый этап при вскрытии стегосистемы. Выделяются следующие типы атак:

- Атака по известному заполненному контейнеру.
- Атака по известному встроенному сообщению.
- Атака на основе выбранного скрытого сообщения.
- Адаптивная атака на основе выбранного скрытого сообщения.
- Атака на основе выбранного заполненного контейнера.
- Атака на основе известного пустого контейнера.
- Атака на основе выбранного пустого контейнера.
- Атака по известной математической модели контейнера.

Рассмотрим некоторые из них:

Атака по известному заполненному контейнеру – у взломщика имеется одно или несколько стего. В случае нескольких стего считается, что запись скрытой информации проводилась отправителем одинаковым способом. Задача взломщика заключается в обнаружении факта наличия стегоканала, а также доступа к нему или определения ключа. Имея ключ, можно раскрыть другие стегосообщения.

Атака по известной математической модели контейнера – взломщик определяет отличие подозрительного послания от известной ему модели. К примеру, пусть биты внутри отсчета изображения коррелированы. Тогда отсутствие корреляции может служить сигналом о наличии скрытого сообщения. При этом задача внедряющего сообщения состоит в том, чтобы не нарушить статистических закономерностей в контейнере.

Атака на основе известного пустого контейнера – если злоумышленнику известен пустой контейнер, то, сравнивая его с предполагаемым стего, можно установить наличие стегоканала. Несмотря на кажущуюся простоту метода, существует теоретическое обоснование эффективности этого метода. Особый интерес представляет случай, когда контейнер нам известен с некоторой погрешностью (такое возможно при добавлении к нему шума).

Цифровые водяные знаки (ЦВЗ) используются для защиты от копирования, сохранения авторских прав. Невидимые водяные знаки считываются специальным устройством, которое может подтвердить либо опровергнуть корректность. ЦВЗ могут содержать различные данные: авторские права, идентификационный

номер, управляющую информацию. Наиболее удобными для защиты с помощью ЦВЗ являются неподвижные изображения, аудио- и видеофайлы.

Технология записи идентификационных номеров производителей очень похожа на ЦВЗ, но отличие состоит в том, что на каждое изделие записывается свой индивидуальный номер (так называемые «отпечатки пальцев»), по которому можно вычислить дальнейшую судьбу изделия. Невидимое встраивание заголовков иногда используется, к примеру, для подписей медицинских снимков, нанесения пути на карту и т.п. Скорее всего, это единственное направление стеганографии, где нет нарушителя в явном виде.

Основные требования, предъявляемые к водяным знакам: надёжность и устойчивость к искажениям, незаметности, робастности к обработке сигналов (робастность – способность системы к восстановлению после воздействия на нее внешних/внутренних искажений, в том числе умышленных). ЦВЗ имеют небольшой объём, но для выполнения указанных выше требований при их встраивании используются более сложные методы, чем для встраивания обычных заголовков или сообщений. Такие задачи выполняют специальные стегосистемы.

Перед помещением ЦВЗ в контейнер водяной знак нужно преобразовать к подходящему виду. К примеру, если в качестве контейнера используется изображение, то и ЦВЗ должны быть представлена как двумерный битовый массив.

Для повышения устойчивости к искажениям часто применяют помехоустойчивое кодирование или используют широкополосные сигналы. Начальную обработку скрытого сообщения делает прекодер. Важная предварительная обработка ЦВЗ – вычисление его обобщенного Фурье-преобразования. Это повышает помехоустойчивость. Первичную обработку часто производят с использованием ключа – для повышения секретности. Потом водяной знак «укладывается» в контейнер (например, путем изменения младших значащих бит). Здесь используются особенности восприятия изображений человеком. Широко известно, что изображения имеют огромную психовизуальную избыточность. Глаза человека подобны низкочастотному фильтру, который пропускает мелкие элементы изображения. Наименее заметны искажения в высокочастотной области изображений. Внедрение ЦВЗ также должно учитывать свойства восприятия человека.

Во многих стегосистемах для записи и считывания ЦВЗ используется ключ. Он может предназначаться для ограниченного круга пользователей или же быть секретным. Например, ключ нужен в DVD-плеерах для возможности прочтения ими содержащихся на дисках ЦВЗ. Как известно, не существует таких стегосистем, в которых бы при считывании водяного знака требовалась другая информация, нежели при его записи. В стегодетекторе происходит обнаружение ЦВЗ в защищённом им файле, который, возможно, мог быть изменён. Эти изменения могут быть связаны с воздействиями ошибок в канале связи либо преднамеренными помехами. В большинстве моделей стегосистем сигнал-контейнер можно рассмотреть как аддитивный шум. При этом задача обнаружения и считывания стегосообщения уже не представляет сложности, но не учитывает двух факторов: неслучайности сигнала контейнера и запросов по сохранению его качества. Учет этих параметров позволит строить более качественные стегосистемы. Для обнаружения факта существования водяного знака и его считывания используются специальные устройства – стегодетекторы. Для вынесения решения о наличии или отсутствии водяного знака используют, к примеру, расстояние по Хэммингу, взаимокорреляцию между полученным сигналом и его оригиналом. В случае отсутствия исходного сигнала в дело вступают более изощренные статистиче-

ские методы, которые основаны на построении моделей исследуемого класса сигналов.

В наше время информация является ценнейшим из ресурсов, спрос на нее неуклонно растет, остро встает проблема защиты информации. С развитием технологий и программного комплекса рынок предоставления услуг защиты информации неуклонно развивается, вследствие этого появляются различные средства защиты. Появляется потребность в их изучении. Скремблеры – программные или аппаратные реализации алгоритма, позволяющего шифровать побитно непрерывные потоки информации. Скремблеры на базе DSP являются современным средством защиты информации. Они способны удовлетворить потребность в конфиденциальности при большой скорости передачи данных на высоком уровне.

Литература

1. <http://ess.ru/publications/articles/steganos/>
2. <http://www.jjtc.com/Steganography/>

УДК 004

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ ВИДЕОИНФОРМАЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФРАКТАЛЬНЫХ И ВЕЙВЛЕТ- ПРЕОБРАЗОВАНИЙ ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОЙ ЕЕ ПЕРЕДАЧИ ПО ЗАЩИЩЕННЫМ IP КАНАЛАМ

Е.А. Рябинин, Д.В. Уваровский, А.М. Голиков

Предлагается использовать вейвлет- и фрактал-сжатие видеопоследовательностей по нескольким направлениям: декодирование принимаемого изображения, используя свойство масштабируемости фрактального преобразования. Исключив из передаваемого ряда данных информацию о размере изображения, производится увеличивающее декодирование видеоряда. С соответствующим сохранением качества и улучшением разрешающей способности графики применяемых в современных интерполяторах и аналогичными свойствами фрактал- и вейвлет-преобразований; использование для передачи видеоизображения современных видеоформатов, применяющих технологию вейвлет- и фрактал-преобразования; использование виртуальных вычислительных комплексов таких как LabView и IMAQ Vision для обработки видеоизображения с использованием вейвлет- и фрактал-преобразований.

Ключевые слова: вейвлет- и фрактал-преобразования, LabVIEW, IMAQ Vision, вейвлетное сжатие; алгоритмы JPEG и MPEG, фрактальное сжатие, треугольник Серпинского.

Фрактал (лат. fractus – дробленный, сломанный, разбитый) – сложная геометрическая фигура, обладающая свойством самоподобия, т.е. составленная из нескольких частей, каждая из которых подобна всей фигуре целиком. В более широком смысле под фракталами понимают множества точек в евклидовом пространстве, имеющие дробную метрическую размерность (в смысле Минковского или Хаусдорфа) либо метрическую размерность, строго большую топологической. **Фрактал** – это бесконечно самоподобная геометрическая фигура, каждый фрагмент которой повторяется при уменьшении масштаба. **Фрактал** – самоподобное множество нецелой размерности. **Вейвлеты** (от англ. wavelet) – всплески (гораздо реже – вэйвлеты) – это математические функции, позволяющие анали-

зировать различные частотные компоненты данных. Однако это частное определение – в общем случае анализ сигналов производится в плоскости вейвлет-коэффициентов (масштаб – время – уровень) (Scale-Time-Amplitude). Вейвлет-коэффициенты определяются интегральным преобразованием сигнала. Полученные вейвлет-спектрограммы принципиально отличаются от обычных спектров Фурье тем, что дают четкую привязку спектра различных особенностей сигналов ко времени [1].

Следует отметить, что слово «фрактал» не является математическим термином и не имеет общепринятого строгого математического определения. Оно может употребляться, когда рассматриваемая фигура обладает какими-либо из перечисленных ниже свойств:

1. Обладает нетривиальной структурой на всех шкалах. В этом отличие от регулярных фигур (таких, как окружность, эллипс, график гладкой функции): если мы рассмотрим небольшой фрагмент регулярной фигуры в очень крупном масштабе, он будет похож на фрагмент прямой. Для фрактала увеличение масштаба не ведёт к упрощению структуры, на всех шкалах мы увидим одинаково сложную картину.

2. Является самоподобной или приближённо самоподобной.

3. Обладает дробной метрической размерностью или метрической размерностью, превосходящей топологическую.

Многие объекты в природе обладают фрактальными свойствами, например побережья, облака, кроны деревьев, кровеносная система и система альвеол человека или животных.

Фракталы, особенно на плоскости, популярны благодаря сочетанию красоты с простотой построения при помощи компьютера.

Вейвлетное сжатие – общее название класса методов кодирования изображений, использующих двумерное вейвлет-разложение кодируемого изображения или его частей. Обычно подразумевается сжатие с потерей качества.

Существенную роль в алгоритмах вейвлетной компрессии играет концепция представления результатов вейвлет-разложения в виде нуль-дерева (zero-tree).

Упорядоченные в нуль-дереве битовые плоскости коэффициентов вейвлет-разложения огрубляются и кодируются далее с использованием алгоритмов сжатия без потерь.

Вейвлетная компрессия в современных алгоритмах компрессии изображений позволяет значительно (до двух раз) повысить степень сжатия чёрно-белых и цветных изображений при сравнимом визуальном качестве по отношению к алгоритмам предыдущего поколения, основанным на дискретном косинусном преобразовании, таких, например, как JPEG.

Непрерывное вейвлет-преобразование (англ. continuous wavelet transform, CWT) – вейвлет-преобразование, определяемое как

$$\gamma(\tau, s) = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{x(t)1}{\sqrt{s}} \psi \left(\frac{t-\tau}{s} \right) dt,$$

где τ – трансляция, s – масштаб и $\psi(t)$ – вейвлет-родитель (mother wavelet).

Изначальная функция может быть восстановлена с помощью обратного преобразования

$$x(t) = \frac{1}{C_\psi} \int \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\gamma(\tau, s)1}{\sqrt{s}} \psi \left(\frac{t-\tau}{s} \right) dt \frac{ds}{|s|^2},$$

где $C_\Psi = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|\Psi(\zeta)|^2}{|\zeta|} d\zeta$ называется постоянной допустимости; Ψ – преобразование

Фурье от ψ . Для того, чтобы обратное преобразование было успешным, постоянная допустимости должна соответствовать критерию допустимости

$$C_\Psi < +\infty.$$

Также следует отметить, что критерий допустимости подразумевает, что $\Psi(0) = 0$, так что интеграл от вейвлета должен быть равен нулю.

Для работы с дискретными изображениями используется вариант вейвлет-преобразования, известный как алгоритм Малла, названный в честь его изобретателя Стефана Малла (фр. Stephane Mallat). Исходное изображение раскладывается на две составляющие – высокочастотные детали (состоящие в основном из резких перепадов яркости), и сглаженную уменьшенную версию оригинала. Это достигается применением пары фильтров, причём каждая из полученных составляющих вдвое меньше исходного изображения. Как правило, используются фильтры с конечным импульсным откликом, в которых пиксели, попавшие в небольшое «окно», умножаются на заданный набор коэффициентов, полученные значения суммируются, и окно сдвигается для расчёта следующего значения на выходе. Между вейвлетами и фильтрами есть тесная связь. Вейвлеты непосредственно не фигурируют в алгоритмах, но если итерировать соответствующие фильтры на изображениях, состоящих из единственной яркой точки, то на выходе будут все отчётливей проступать вейвлеты.

Поскольку изображения двумерны, фильтрация производится и по вертикали, и по горизонтали. Этот процесс повторяется многократно, причём каждый раз в качестве входа используется сглаженная версия с предыдущего шага, так как изображения «деталей» состоят обычно из набора резких границ, и содержат обширные участки, где интенсивность близка к нулю. Если допустимо пренебречь некоторым количеством мелких деталей, то все эти значения можно просто обнулить. В результате получается версия исходного изображения, хорошо поддающаяся сжатию. Для восстановления оригинала снова применяется алгоритм Малла, но с парой фильтров, обратной к исходным.

Алгоритмы JPEG и MPEG, в отличие от вейвлетного, сжимают по отдельности каждый блок исходного изображения размером 8 на 8 пикселей. В результате за счёт потери данных при сжатии на восстановленном изображении может быть заметна блочная структура. При вейвлетном сжатии такой проблемы не возникает, но могут появляться искажения другого типа, имеющие вид «призрачной» ряби вблизи резких границ. Считается, что такие артефакты в среднем меньше бросаются в глаза наблюдателю, чем «квадратики», создаваемые JPEG.

Для работы с различными классами изображений могут использоваться различные фильтры. Возможно, поэтому всё ещё не существует единого стандарта для вейвлетного сжатия.

Фрактальное сжатие. Фрактальная архивация основана на том, что с помощью коэффициентов системы итерируемых функций изображение представляется в более компактной форме. В 1981 г. Джон Хатчинсон опубликовал статью «Фракталы и самоподобие», в которой была представлена теория построения фракталов с помощью системы итерируемых функций (IFS, Iterated Function System).

Прежде чем рассматривать процесс архивации, разберем, как IFS строит изображение.

Строго говоря, IFS – это набор трехмерных аффинных преобразований, переводящих одно изображение в другое. Преобразованию подвергаются точки в трехмерном пространстве (x – координата, y – координата, яркость). Наиболее наглядно этот процесс продемонстрировал сам Барнели в своей книге «Фрактальное сжатие изображения». В ней введено понятие фотокопировальной машины, состоящей из экрана, на котором изображена исходная картинка, и системы линз, проецирующих изображение на другой экран. Каждая линза проецирует часть исходного изображения. Расставляя линзы и меняя их характеристики, можно управлять получаемым изображением. На линзы накладывается требование – они должны уменьшать в размерах проектируемую часть изображения. Кроме того, они могут менять яркость фрагмента и проецируют не круги, а области с произвольной границей.

Существующие алгоритмы фрактального сжатия, как правило, придерживаются следующей схемы кодирования. Кодированное изображение разбивается на множество неперекрывающихся блоков (ранговых областей), для каждого из которых, в пределах этого же изображения, ищется блок большего размера (домен), пиксели которого путём некоторого преобразования, задаваемого несколькими коэффициентами, переводились бы в пиксели ранговой области. При этом для поиска оптимального соответствия ранговых областей и доменов необходим полный перебор вариантов, что влечёт за собой значительные вычислительные затраты. Из преобразований, переводящих домены в ранговые области, формируется отображение, переводящее изображение в изображение. При этом кодом изображения будут являться местоположение и размеры ранговых областей, а также коэффициенты преобразований, описывающих самоподобие внутри изображения. Количество бит, необходимых для описания кода, будет существенно меньше количества бит, необходимых для описания исходного изображения. Коэффициентом сжатия называется отношение битового представления изображения к битовому представлению кода. В известных фрактальных методах сжатия изображений значение этого коэффициента может достигать 100 при приемлемом качестве восстановления.

Для восстановления закодированного таким образом изображения используется принцип сжатых отображений, который гласит, что сжимающее отображение, действующее в полном метрическом пространстве, имеет единственную неподвижную точку. Отображение, действующее на полном метрическом пространстве изображений, формируется из преобразований, переводящих домены в ранговые области. Неподвижной точкой такого отображения (при условии, что оно является сжимающим) будет восстановленное полутоновое изображение.

Итак, пусть полутоновое изображение разбито на N ранговых областей R_i , для каждой из которых найден соответствующий домен D_i , и преобразование w_i , задаваемое коэффициентами $(c_{i1}, c_{i2}, \dots, c_{iK})$, такое что для каждого $r_j \in R_i$ существует $d_j \in D_i$ такое, что $r = w_i(d)$. Причём преобразования w_i должны являться сжимающими, т.е. такими, что для всех $d_i, d_k \in D_i$ выполняется

$$\|w_i[(d)_k] - w_i[(d)_i]\| \leq s \|d_k - d_i\|,$$

где $0 \leq s < 1$. Из N преобразований w_i сформируем отображение W , переводящее изображение F_j в изображение F_{j+1}

$$F_{j+1} = W(F_j) = \bigcup_{i=1}^N w_i(F_j).$$

Следует учесть, что преобразования w_i действуют только на соответствующие домены D_i изображения F . Доказано, что если преобразования w_i являются сжимающими, то и отображение W также является сжимающим.

Для восстановления изображения, закодированного таким образом, нужно запустить итерационный процесс, используя в качестве стартового любое изображение F_0 (соответствующего размера). Согласно принципу сжатых отображений отображение W будет иметь единственную неподвижную точку отображения (аттрактор), такую что $F' = W(F')$. Эта точка пространства изображений и будет восстановленным изображением, которое повторяет исходное с некоторой точностью. Задача построения оптимального кода изображения при использовании фрактального сжатия, как уже было сказано, требует значительных вычислительных затрат. Простейший путь ускорения вычислений заключается в использовании различных алгоритмов сужения поиска или вообще отказе от поиска. При использовании последнего алгоритма изображение разбивается на непрерывающиеся квадратные блоки, каждый из которых разбит на четыре одинаковых квадратных подблока. Каждый блок является доменом для своих подблоков, а подблоки – ранговыми областями. Задача кодирования изображения в этом случае сводится к проверке подобия ранговой области домену, содержащему эту область. В случае отсутствия подобия соответствующий подблок снова разбивается на четыре квадратных «подподблока» и сам становится доменом для своих подблоков (рис. 1).

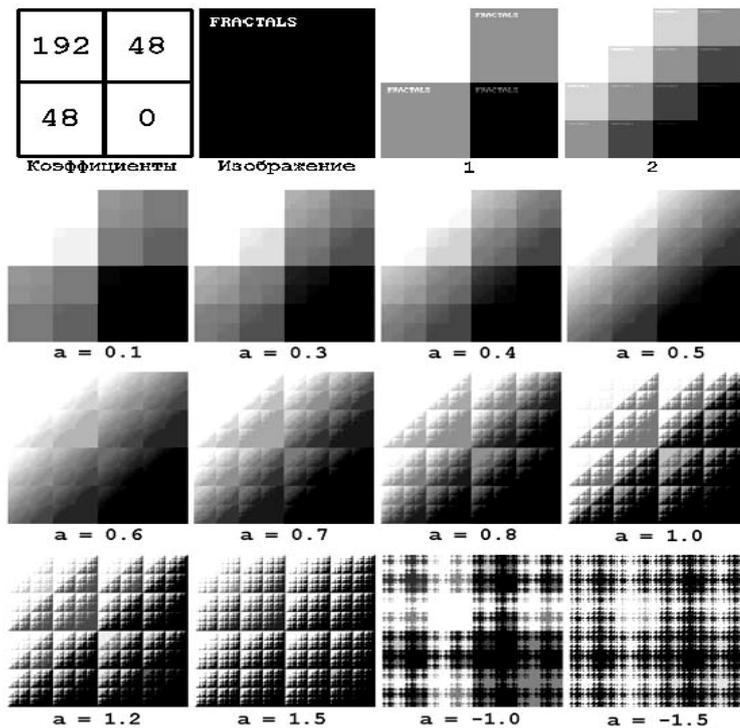
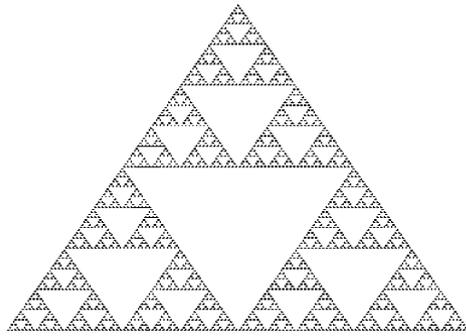


Рис. 1. Итерации восстановления изображения из кода



Процесс разбиений продолжается до тех пор, пока очередной подблок не будет состоять из одного пикселя. В качестве примера построения фрактального изображения приведем общеизвестный треугольник Серпинского (рис. 2).

Рис. 2. Треугольник Серпинского

Алгоритмический шаг машины состоит в построении с помощью проецирования по исходному изображению нового. Утверждается, что на некотором шаге изображение перестанет изменяться. Оно будет зависеть только от расположения и характеристик линз и не будет зависеть от исходной картинке. Это изображение называется неподвижной точкой или аттрактором данной IFS. Collage Theorem гарантирует наличие ровно одной неподвижной точки для каждой IFS. Поскольку отображение линз является сжимающим, каждая линза в явном виде задает самоподобные области в нашем изображении. Благодаря самоподобию мы получаем сложную структуру изображения при любом увеличении. Наиболее известны два изображения, полученных с помощью IFS, – треугольник Серпинского и папоротник Барнсли. Первое задается тремя, а второе – пятью аффинными преобразованиями (или, в нашей терминологии, линзами). Каждое преобразование задается буквально считанными байтами, в то время как изображение, построенное с их помощью, может занимать и несколько мегабайт. Становится понятно, как работает архиватор, и почему ему требуется так много времени. Фактически фрактальная компрессия – это поиск самоподобных областей в изображении и определение для них параметров аффинных преобразований. В худшем случае, если не будет применяться оптимизирующий алгоритм, потребуются перебор и сравнение всех возможных фрагментов изображения разного размера. Даже для небольших изображений при учете дискретности мы получим астрономическое число перебираемых вариантов. Даже резкое сужение классов преобразований, например за счет масштабирования только в определенное число раз, не позволит добиться приемлемого времени. Кроме того, при этом теряется качество изображения. Подавляющее большинство исследований в области фрактальной компрессии сейчас направлено на уменьшение времени архивации, необходимого для получения качественного изображения.

Формат сжатия MPEG 4. MPEG4 использует технологию так называемого фрактального сжатия изображений. Фрактальное (контурно-основанное) сжатие подразумевает выделение из изображения контуров и текстур объектов. Контурные представляются в виде так называемых сплайнов (полиномиальных функций) и кодируются опорными точками. Текстуры могут быть представлены в качестве коэффициентов пространственного частотного преобразования (например, дискретного косинусного или вейвлет-преобразования).

Диапазон скоростей передачи данных, который поддерживает формат сжатия видеоизображений MPEG 4, гораздо шире, чем в MPEG 1 и MPEG 2. Формат сжатия видеоизображений MPEG 4 поддерживает широкий набор стандартов и значений скорости передачи данных. MPEG 4 включает в себя методы прогрессивного и чересстрочного сканирования и поддерживает произвольные значения

пространственного разрешения и скорости передачи данных в диапазоне от 5 кбит/с до 10 Мбит/с. В MPEG 4 усовершенствован алгоритм сжатия, качество и эффективность которого повышены при всех поддерживаемых значениях скорости передачи данных.

Нами предлагается использовать вейвлет- и фрактал-сжатие видеопоследовательностей по нескольким направлениям.

Декодирование принимаемого изображения разрешением 640×480 в виде больших разрешений, таких как 860×640 или, например, 1024×768, использует свойство масштабируемости фрактального преобразования. Исключив из передаваемого ряда данных информацию о размере изображения производится увеличивающее декодирование видеоряда с соответствующим сохранением качества и улучшением разрешающей способности графики применяемых в современных интерполяторах и аналогичными свойствами фрактал- и вейвлет-преобразований.

Литература

1. Уэлстид С. Фракталы и вейвлеты для сжатия изображений в действии: Учеб. пособие. М.: Техносфера, 2003. 320 с.

УДК 621.396.2

ИССЛЕДОВАНИЕ МНОГОУРОВНЕВЫХ МЕТОДОВ МОДУЛЯЦИИ СИГНАЛОВ НА БАЗЕ АППАРАТУРЫ И ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ LABVIEW 2010

Д.В. Уваровский, А.М. Голиков

Применяя аппаратно-программные средства LabVIEW 2010, разработан обучающий комплекс, позволяющий исследовать спектры сигналов на выходе блока переноса на радиочастоту и на выходе канала с шумом для видов модуляции ООК, BPSK, MSK, GMSK, 16-QAM. Для видов модуляции ООК, BPSK, 16-QAM спектр измеряется без фильтра и с фильтром типа «приподнятый косинус», для модуляции MSK – без фильтра, для модуляции GMSK – с использованием Гауссова фильтра. Для видов модуляции ООК, BPSK, MSK, GMSK и QAM наблюдаются сигнальные созвездия.

Ключевые слова: LabVIEW, спектры сигналов, виды модуляции, сигнальные созвездия.

Цифровые виды модуляции (часто цифровая модуляция называется манипуляцией), как и аналоговые, могут быть амплитудными, фазовыми, частотными или комбинированными (например, амплитудно-фазовыми), в зависимости от того, какой из параметров немодулированного несущего колебания $s(t) = A(t)\cos(\omega(t)t + p(t))$ изменяется в соответствии с изменением информационного сигнала. Так как значения цифрового информационного сигнала являются дискретными (например, $\{0, 1\}$), дискретным является также и возможный набор значений каждого из параметров. Однако если информационный сигнал проходит через baseband-фильтр для ограничения спектра, его значения уже не являются дискретными, поэтому реально переход от одного дискретного значения параметра колебания (например, изменение амплитуды или фазы) происходит гладко и непрерывно.

Амплитудные виды модуляции (OOK, ASK, M-ASK)

Наиболее простым видом манипуляции сигнала является амплитудная манипуляция. Модулированный сигнал имеет вид

$$s(t) = A(c(t) + B) \cdot \cos(\omega t + \varphi_0), \quad (1)$$

где $c(t)$ – информационный цифровой сигнал; A , B и φ_0 – постоянные; $B \geq 0$, ω – несущая частота.

Пусть множество возможных значений $c(t)$ $\{0, 1\}$, $B = 0$. В этом случае модулированный сигнал имеет вид $s(t) = Ac(t) \cdot \cos(\omega t + \varphi)$, его амплитуда принимает значение 0 при нулевом значении информационного сигнала и A при единичном (рис. 1). Такой тип манипуляции называется OOK (On-Off Keying, Включено-Выключено) и часто используется в системах сигнализации и охранных системах.

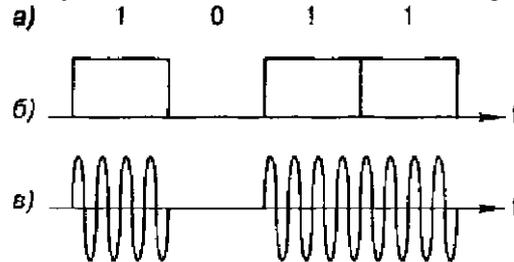


Рис. 1. Модуляция OOK: а – информационное сообщение; б – модулирующий цифровой сигнал; в – модулированный радиосигнал

Допустим теперь $B = 1$. В этом случае амплитуда модулированного сигнала принимает значение A при нулевом значении информационного сигнала и $2A$ при единичном. Вид модуляции, для которого $B > 0$, носит название ASK (Amplitude Shift Keying – амплитудная манипуляция). OOK является частным случаем ASK при $B=0$.

Существует два основных критерия сравнения эффективности различных видов модуляции. Это *критерии спектральной и энергетической эффективности*. Спектральная эффективность характеризует полосу частот, необходимую для передачи информации с определенной скоростью. Энергетическая эффективность описывает мощность, необходимую для передачи информации с заданной достоверностью (вероятностью ошибки).

Известно [1], что спектр модулированного сигнала на радиочастоте с точностью до постоянного множителя совпадает со спектром модулирующего (baseband) сигнала, однако центр спектра радиосигнала размещен на несущей частоте, а не на нулевой. Поэтому, как правило, анализируются спектральные плотности модулирующих сигналов, центрированные относительно нулевой частоты. Спектральные плотности мощности ASK сигналов для различных baseband-фильтров приведены на рис. 2. На рис. 3 показаны соответствующие формы импульсов модулирующего сигнала после прохождения baseband-фильтра. Из сравнения рис. 2 и 3 видно, что более гладкая форма импульса модулирующего сигнала приводит к расширению главного лепестка спектральной плотности мощности модулированного сигнала и более быстрому уменьшению амплитуды боковых лепестков.

Множество возможных значений квадратурных компонент $I(t)$ и $Q(t)$ называется *сигнальным созвездием*. Как правило, данное множество отображают на декартовой плоскости, где по оси абсцисс отложены значения синфазной состав-

ляющей $I(t)$, а по оси ординат – квадратурной $Q(t)$. Точка на плоскости с координатами (x, y) соответствует состоянию сигнала, в котором синфазная составляющая равна x , квадратурная равна y . Таким образом, сигнальное созвездие – это диаграмма возможных состояний сигнала. Для модуляций OOK и ASK сигнальное созвездие изображено на рис. 3.

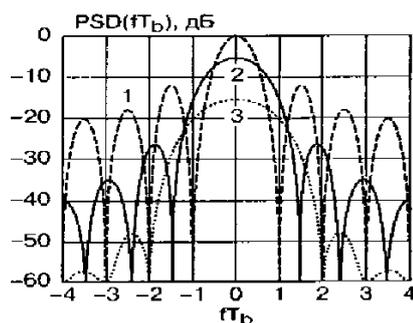


Рис. 2. Спектральная плотность мощности ASK-сигнала. Форма импульса модулирующего сигнала: 1 – прямоугольная; 2 – косинусоидальная; 3 – приподнятый косинус

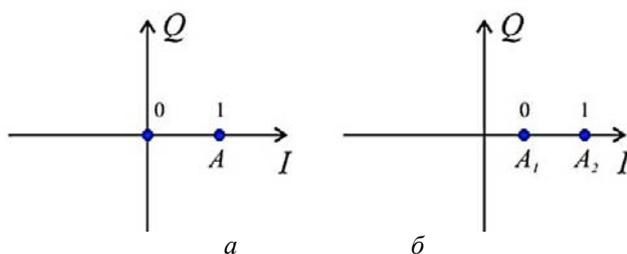


Рис. 3. Сигнальное созвездие модуляции OOK – a ; $б$ – сигнальное созвездие модуляции ASK

Выражение для спектральной плотности мощности сигнала OOK с прямоугольной формой импульсов имеет вид

$$PSD(f) = \left(A \uparrow 2T \downarrow b \right) / 4 \left\{ \sin \left[(\pi |f - f_c| T \downarrow b) \right] / (\pi |f - f_c| T \downarrow b) \right\} \uparrow 2 \left\{ 1 + 1/T \downarrow b \delta(f - f_c) \right\}. \quad (2)$$

Многопозиционная амплитудная модуляция (M-ASK)

При модуляции ASK множество возможных значений амплитуды радиосигнала ограничивается двумя значениями (без учета сглаживания baseband-фильтром). Спектральная эффективность может быть существенно повышена, если использовать большее количество значений амплитуды радиосигнала.

Сгруппируем биты исходного информационного сообщения в пары. Каждая такая пара называется *символом*. Если каждый бит имеет множество значений $\{0,1\}$, то каждый символ имеет четыре возможных значения из множества $\{00, 01, 10, 11\}$. Сопоставим каждому из возможных значений символа значение амплитуды радиосигнала из множества $\{0, A, 2A, 3A\}$.

Аналогичным образом можно группировать тройки, четверки и большее количество бит в одном символе. Получится *многоуровневый (многопозиционный)* сигнал M-ASK с размерностью множества возможных значений амплитуды сигнала $M = \log_2 k$, где k – число бит в одном символе. Например, сигнал с модуляцией 256-ASK имеет 256 возможных значений амплитуды сигнала и 8 бит в одном символе.

На рис. 4 изображены спектральная плотность мощности восьмиуровневого сигнала 8-ASK и спектральная плотность сигнала ASK с импульсами прямо-

угольной формы (без baseband-фильтрации). Многопозиционный сигнал имеет меньшую ширину главного лепестка (занимает меньшую полосу частот) и более низкий уровень боковых лепестков, т.е. имеет большую спектральную эффективность по сравнению с двухуровневым сигналом.

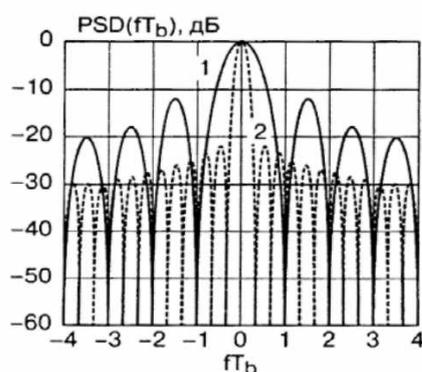


Рис. 4. Сравнение спектральных плотностей мощности двухуровневого и восьмиуровневого АМ-сигналов: 1 – сигнал ASK; 2 – сигнал 8-ASK

Амплитудные виды модуляции имеют невысокую энергетическую эффективность (так как средний уровень мощности существенно меньше максимального), требуют высокой линейности и большого динамического диапазона усилителя мощности. Ошибка в амплитуде сигнала из-за нелинейности усилителя приведет непосредственно к символической ошибке, т. к. значение символа определяется амплитудой сигнала. Отношение максимальной амплитуды сигнала к минимальной достаточно высоко и требует усилителя с большим динамическим диапазоном. Влияние аддитивного шума или помехи непосредственно изменяет амплитуду сигнала, поэтому амплитудные виды модуляции не обладают высокой помехоустойчивостью. Однако они достаточно просты в реализации. Сигнальное созвездие для 8-ASK приведено на рис. 5.

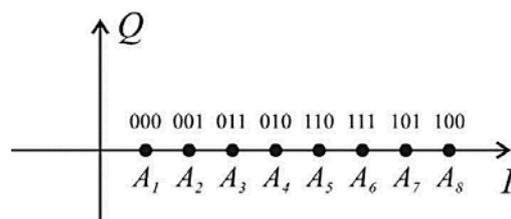


Рис. 5. Сигнальное созвездие модуляции 8-ASK

Фазовые виды модуляции (BPSK, QPSK, M-PSK)

Фазомодулированный сигнал имеет вид:

$$s(t) = A \cos(\omega t + \varphi(t) + \varphi_0), \quad (3)$$

где A и ω – постоянные, φ_0 – несущая частота.

Информация кодируется фазой $\varphi(t)$. Так как при когерентной демодуляции в приемнике имеется восстановленная несущая $s_c(t) = A \cos(\omega t + \varphi_0)$, то путем сравнения сигнала с несущей вычисляется текущий сдвиг фазы $\varphi(t)$. Изменение фазы $\varphi(t)$ взаимнооднозначно связано с информационным сигналом $c(t)$.

Двоичная фазовая модуляция (BPSK – Binary Phase Shift Keying)

Множеству значений информационного сигнала $\{0,1\}$ ставится в однозначное соответствие множество изменений фазы $\{0,\pi\}$. При изменении значения информационного сигнала фаза радиосигнала изменяется на 180° .

Временная форма сигнала и его созвездие показаны на рис. 6.

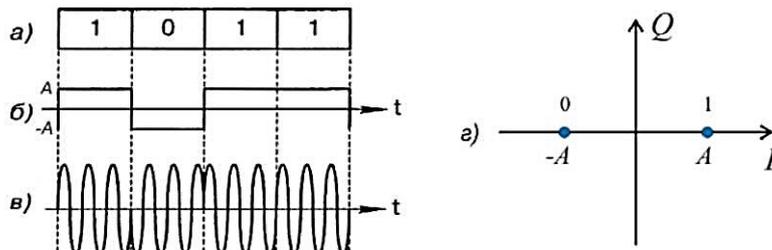


Рис. 6. Временная форма и сигнальное созвездие сигнала BPSK:
 а – цифровое сообщение; б – модулирующий сигнал;
 в – модулированное ВЧ-колебание; г – сигнальное созвездие

Спектральная плотность мощности сигнала BPSK совпадает с плотностью сигнала OOK за исключением отсутствия в спектре сигнала несущей частоты:

$$PSD(f) = \left(A^2 2T_b \right) / 4 \left\{ \sin^2 \left[(\pi |f - f_c| T_b) \right] / (\pi |f - f_c| T_b) \right\}^2. \quad (4)$$

Квадратурная фазовая модуляция (QPSK – Quadrature Phase Shift Keying)

Квадратурная фазовая модуляция является четырехуровневой фазовой модуляцией ($M = 4$), при которой фаза высокочастотного колебания может принимать 4 различных значения с шагом, кратным $\pi / 2$.

Соотношение между сдвигом фазы модулированного колебания из множества $\{\pm\pi/4, \pm3\pi/4\}$ и множеством символов (двух битов) цифрового сообщения $\{00, 01, 10, 11\}$ устанавливается в каждом конкретном случае стандартом на радиоканал и отображается сигнальным созвездием, аналогичным рис. 7. Стрелками показаны возможные переходы из одного фазового состояния в другое.

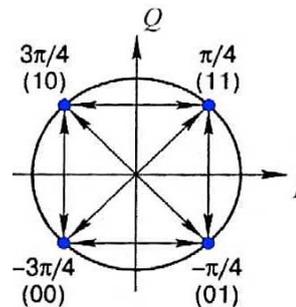


Рис. 7. Сигнальное созвездие модуляции QPSK

Из рисунка видно, что соответствие между значениями символов и фазой сигнала установлено таким образом, что в соседних точках сигнального созвездия значения соответствующих символов отличаются лишь в одном бите. При передаче в условиях шума наиболее вероятной ошибкой будет определение фазы соседней точки созвездия. При указанном кодировании, несмотря на то, что произошла ошибка в определении значения символа, это будет соответствовать ошибке в одном (а не двух) бите информации. Таким образом, достигается снижение вероятности ошибки на бит. Указанный способ кодирования называется *кодом Грея*.

Каждому значению фазы модулированного сигнала соответствует 2 бита информации, и поэтому изменение модулирующего сигнала при QPSK-модуляции происходит в 2 раза реже, чем при BPSK-модуляции при одинаковой скорости передачи информации. Известно [1], что спектральная плотность мощности многоуровневого сигнала совпадает со спектральной плотностью мощности бинарного сигнала при замене битового интервала T_b на символичный интервал $T_s = T_b \log_2 M$. Для четырехуровневой модуляции $M = 4$ и, следовательно, $T_s = 2T_b$.

Спектральная плотность мощности QPSK-сигнала при модулирующем сигнале с импульсами прямоугольной формы на основании (5) определяется выражением

$$PSD(f) = [2A] \uparrow 2T \downarrow b \left\{ \sin \left[(\pi |f \downarrow c - f | 2T \downarrow b) / (\pi |f \downarrow c - f | 2T \downarrow b) \right] \right\} \uparrow 2. \quad (5)$$

Из данной формулы видно, что расстояние между первыми нулями спектральной плотности мощности сигнала QPSK равно $Af = 1/T_b$, что в 2 раза меньше, чем для сигнала BPSK. Другими словами, спектральная эффективность квадратурной модуляции QPSK в 2 раза выше, чем бинарной модуляции BPSK.

Многопозиционная фазовая модуляция (M-PSK)

M-PSK формируется, как и другие многопозиционные виды модуляции, путем группировки $k = \log_2 M$ бит в символы и введением взаимнооднозначного соответствия между множеством значений символа и множеством значений сдвига фазы модулированного колебания. Значения сдвига фазы из множества отличаются на одинаковую величину. Для примера на рис. 8 приведено сигнальное созвездие для 8-PSK с кодированием Грея.

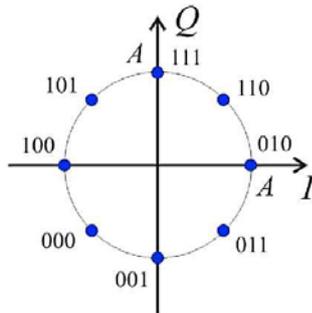


Рис. 8. Сигнальное созвездие модуляции 8-PSK

Амплитудно-фазовые виды модуляции (QAM)

Модуляция, при которой происходит одновременное изменение двух параметров несущего колебания – амплитуды и фазы, называется амплитудно-фазовой модуляцией.

Минимальный уровень символьных ошибок будет достигнут в случае, если расстояние между соседними точками в сигнальном созвездии будет одинаковым, т.е. распределение точек в созвездии будет равномерным на плоскости. Следовательно, сигнальное созвездие должно иметь решетчатый вид. Модуляция с подобным видом сигнального созвездия называется квадратурной амплитудной модуляцией (QAM – Quadrature Amplitude Modulation).

QAM является многопозиционной модуляцией. При $M = 4$ она соответствует QPSK, поэтому формально считается для QAM $M > 8$ (т.к. число бит на символ $k = \log_2 M$, $k \in N$, то M может принимать только значения степеней 2: 2, 4, 8, 16 и т.д.). Для примера на рис. 9 приведено сигнальное созвездие 16-QAM с кодированием Грея.

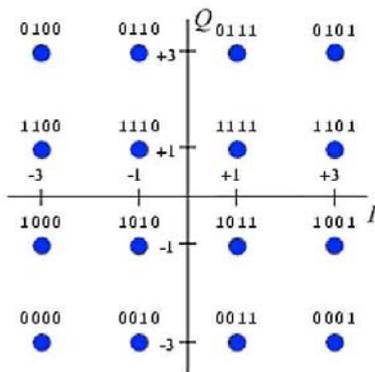


Рис. 9. Сигнальное созвездие модуляции 16-QAM

На практике используются большие значения M , вплоть до 1024-QAM. Такие виды модуляции позволяют достичь исключительно высокой спектральной эффективности. Однако, как видно из сигнального созвездия, так как информация кодируется в том числе амплитудой и изменения амплитуды велики, то QAM предъявляет высокие требования к линейности усилителя мощности и его динамическому диапазону, особенно для больших M .

Практическое осуществление QAM-модуляции выполняется следующим образом. В памяти процессора хранится таблица значений квадратурных компонент $I(t)$ и $Q(t)$, имеющих в сигнальном созвездии и расположенных в порядке возрастания значения соответствующего символа. Процессор анализирует входную последовательность битов, разбивает ее на символы и для каждого символа выбирает соответствующие значения квадратурных компонент из таблицы. Затем выполняется baseband-фильтрация сигналов $I(t)$ и $Q(t)$.

Программа LabVIEW представляет собой среду высокоэффективного графического программирования, разработанную специально для инженеров и научных работников. В данной работе проинсталлированы патчи 2009.v9.0.VSS.Module-TBE, 2009.v9.0.Mobile.Module-TBE. Производится наблюдение временной формы сигналов, измерение спектра сигналов и сравнение спектральных эффективностей. Используя установленные точки измерений, а также добавляя новые при необходимости, можно зарисовать спектры сигналов на выходе блока переноса на радиочастоту и на выходе канала с шумом для видов модуляции OOK, BPSK, MSK, GMSK, 16-QAM. Для видов модуляции OOK, BPSK, 16-QAM спектр измеряется без фильтра и с фильтром типа «приподнятый косинус», для модуляции MSK – без фильтра, для модуляции GMSK с использованием Гауссова фильтра. Для видов модуляции OOK, BPSK, MSK, GMSK и QAM наблюдаются сигнальные созвездия.

Литература

1. Шахнович И. Современные технологии беспроводной связи. М.: Техносфера, 2004. 288 с.
2. Галкин В.А. Цифровая мобильная радиосвязь. М.: Горячая линия – Телеком, 2007. 432 с.

УДК 621.376.9

ВЕКТОРНЫЙ АНАЛИЗАТОР OFDM СИГНАЛА

О.В. Кононов, А.В. Максимов, Н.С. Рябцунов

Предложена реализация векторного анализатора (ВА) OFDM сигнала, предназначенного для работы в составе учебного лабораторного комплекса по изучению системы беспроводного широкополосного доступа (БШД) на основе WiMiC-6000, разработанной НПФ «Микран».

Ключевые слова: векторный анализатор, мультиплексирование с ортогональным частотным разделением (OFDM), буферный усилитель, аналого-цифровой преобразователь (АЦП), драйвер АЦП, программируемая логическая интегральная схема (ПЛИС).

Постановка задачи разработки векторного анализатора OFDM сигнала

В настоящее время технологии WiMAX и WiFi получили широкое распространение во всем мире, в этой связи для проектирования и качественной экс-

платации этих систем необходимы углубленные знания в области проектирования систем с новыми принципами модуляции и демодуляции сигналов OFDM.

Наблюдение и анализ сигналов OFDM возможны только с применением векторного анализатора (ВА) сигнала.

Описание базовой станции аппаратуры беспроводной передачи данных WiMIC-6000

Аппаратура беспроводной передачи данных WiMIC-6000, использующая стандарт 802.16-2004, предназначена для подключения локальных сетей и отдельных компьютеров к сетям передачи данных по радиоканалу. Аппаратура обеспечивает построение беспроводных сетей типа «точка – много точек» (рис. 1) с количеством абонентских станций до 200 и скоростью передачи данных до 37,67 Мбит/с на 1 сектор (до 226 Мбит/с в базовой станции из шести секторов).

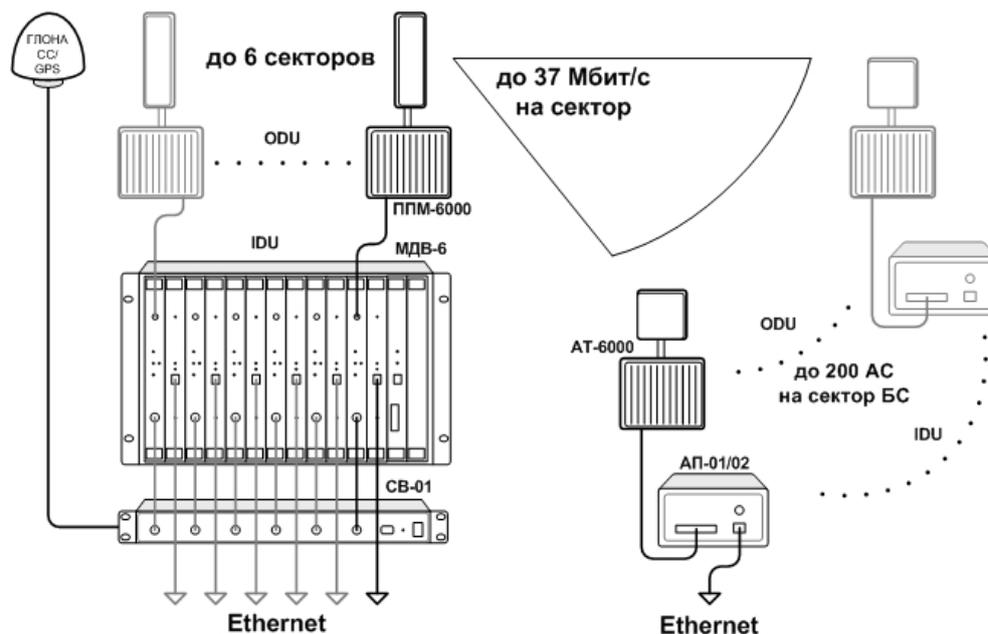


Рис. 1. Структурная схема аппаратуры системы БЩД WiMIC-6000

Базовая станция выпускается в двух модификациях: многосекторная и компактная односекторная.

Много секторная базовая станция состоит из модуля доступа МДВ-6 (нижнее оборудование), приемопередающих модулей ППМ-6000 (внешнее оборудование) и секторных антенн.

Ёмкость многосекторной базовой станции может наращиваться до 6 секторов.

Один сектор БС образуется двумя блоками: БСО-1 и БМВ-1.

Блок сетевой обработки БСО-1 в соответствии с рекомендацией IEEE 802.16-2004 обрабатывает входящий трафик для соответствия MAC уровню, обеспечивает качество обслуживания (QoS) и работу подуровня безопасности.

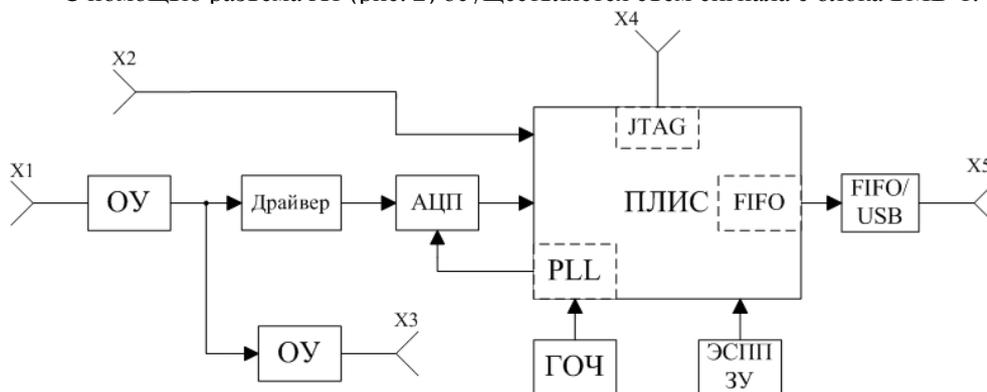
Блок модема БМВ-1 обеспечивает радио интерфейс с профилем OFDM-256, адаптивно переключаемой модуляцией, программно изменяемой полосой пропускания, выполняет телеметрию и телеуправление приемопередатчиками [1, 2].

Описание векторного анализатора

ВА OFDM сигнала представляет собой блок цифровой обработки сигналов (ЦОС), осуществляющий съем информации с восходящего (uplink) канала базовой станции, блока БМВ-1, с последующей цифровой обработкой принимаемых OFDM сигналов.

Последующая обработка информации осуществляется с помощью программы в ЭВМ, где происходит просмотр информационной составляющей каждой поднесущей OFDM сигнала, и вывод диаграммы созвездия QAM-X модуляции каждой поднесущей.

С помощью разъема X1 (рис. 2) осуществляется съем сигнала с блока БМВ-1.



- ОУ** (Операционный усилитель) – Выполняет роль буферного усилителя
- Драйвер** – дифференциальный АЦП драйвер
- АЦП** – Аналого-цифровой преобразователь
- ПЛИС** – Программируемая логическая интегральная схема
- PLL** (Phase-Locked Loop) – Программируемый цифровой синтезатор частоты
- ГОЧ** – Генератор опорной частоты
- ЭСППЗУ** – Электрически стираемое перепрограммируемое постоянное запоминающее устройство (EEPROM (Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory))
- JTAG** (Joint Test Action Group) – Разъем аппаратного интерфейса стандарта IEEE 1149.1
- FIFO** (First In, First Out) – ОЗУ с параллельным интерфейсом
- FIFO/USB** – Контроллер USB (Universal Serial Bus) универсальной последовательной шины с параллельным интерфейсом FIFO
- X1, X2, X3** – разъемы с сопротивлением 50 Ом
- X4** – JTAG разъем
- X5** – USB разъем

Рис. 2. Структурная схема векторного анализатора OFDM сигнала

С разъема X2 осуществляется синхронизация блока ВА с блоком БМВ-1.

К разъему X3 подключается анализатор спектра для непосредственного наблюдения спектра OFDM сигнала.

Буферные усилители (ОУ) предназначены для согласования входного сопротивления источника сигнала с входным сопротивлением нагрузки.

Преобразование аналогового сигнала в цифровой сигнал осуществляется аналого-цифровым преобразователем (АЦП). Основные параметры АЦП: параллельная шина; разрядность 10–12 бит; частота дискретизации 40 МГц и выше.

Основную функцию ЦОС осуществляет программируемая логическая интегральная схема (ПЛИС) типа FPGA (*field-programmable gate array* (программируемая пользователем вентиляционная матрица (ППВМ))).

ПЛИС включает в себя внутренний блок PLL (программируемый цифровой синтезатор частоты), который представляет собой генератор, управляемый напряжением (ГУН) и систему фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) с внешним генератором опорной частоты (ГОЧ).

Блок ЭСПЗУ – энергонезависимая память, в которой хранится программа-прошивка ПЛИС.

Блок JTAG – последовательный аппаратный интерфейс, применяемый для тестирования интегральных схем (с использованием стандарта IEEE 1149.1). Обычно применяется при периферийном сканировании. Результатом периферийного сканирования является информация о наличии типичных неисправностей, возникающих при производстве печатных плат: коротких замыканий (bridges), непропаев (opens), западаний на 0 или 1 (stuck at 0, stuck at 1), обрывов дорожек.

Разъем X5 – порт JTAG.

Блок FIFO (First in, First Out (первый вошел, первый вышел)) является внутренним блоком оперативного запоминающего устройства (ОЗУ) имеющего структуру данных в виде очереди, с дисциплиной доступа к элементам FIFO.

Блок FIFO/USB – контроллер универсальной последовательной шины (USB), осуществляет считывание данных из блока FIFO, организуя поток этих данных в последовательном интерфейсе USB.

Разъем X6 – USB порт, с которого осуществляется считывание данных ЦОС для последующей обработки с помощью программы в ЭВМ.

Проведенный анализ структурной схемы BA OFDM позволяет осуществить его физическую реализацию в составе базовой станции WiMIC-6000, блока БМВ-1.

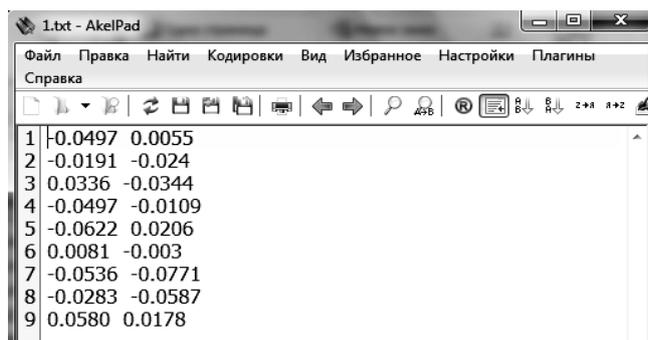
Описание взаимодействия программных продуктов

Сигнал принимается с восходящего потока (uplink) канала базовой станции. После оцифровки он подвергается цифровой обработке в ПЛИС, с помощью программного обеспечения, предоставляемого фирмой ALTERA, производителем ПЛИС. Программное обеспечение ALTERA взаимодействует с ПЛИС через интерфейс JTAG.

На выходе мы получаем текстовый файл (рис. 3), содержащий в себе ряд комплексных чисел, в виде двух столбцов, в первом столбце содержится реальная часть, а во втором – мнимая.

Дальнейшая обработка информации осуществляется с использованием среды моделирования MATLAB, где с помощью разработанного программного обеспечения осуществляется построение диаграммы созвездия полного сигнала, диаграммы созвездия конкретной поднесущей, спектра символа и самого сигнала.

На рис. 4 представлена структурная схема взаимодействия программных продуктов.



1	-0.0497	0.0055
2	-0.0191	-0.024
3	0.0336	-0.0344
4	-0.0497	-0.0109
5	-0.0622	0.0206
6	0.0081	-0.003
7	-0.0536	-0.0771
8	-0.0283	-0.0587
9	0.0580	0.0178

Рис. 3. Содержимое обрабатываемого файла

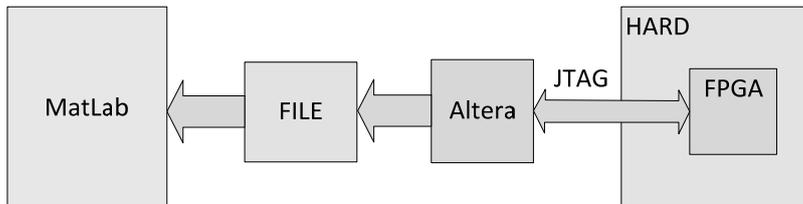


Рис. 4. Структурная схема взаимодействия программных продуктов

Описание интерфейса пользователя

Используя встроенные в MatLab средства визуального программирования GUI, создаем четыре окна для вывода графиков, четыре выпадающих меню и четыре управляющих кнопки. Заполняем выпадающее меню нужными нам конструкциями (рис. 5).

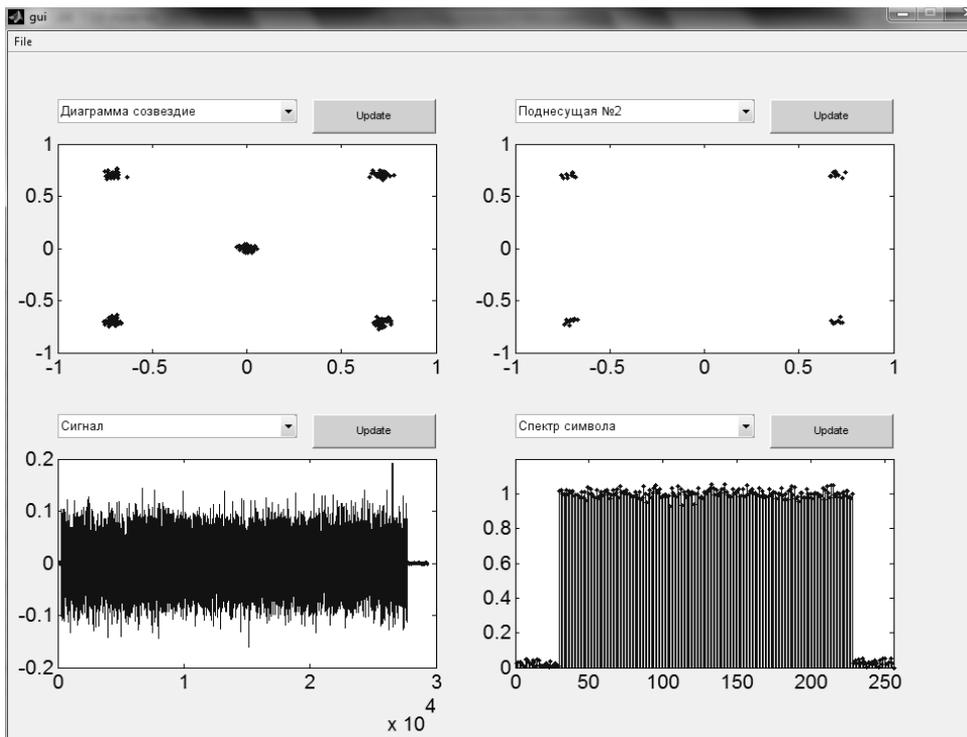


Рис. 5. Вид окна интерфейса пользователя

Далее идет построение графика в зависимости от того, что выбрано в выпадающем меню: если выбрана первая строка, то после нажатия кнопки построится диаграмма созвездия полного сигнала, если вторая – сам сигнал, третья – спектр символа, 4–259 поднесущая 1–256.

На рис. 6 представлен вид выпадающего окна.

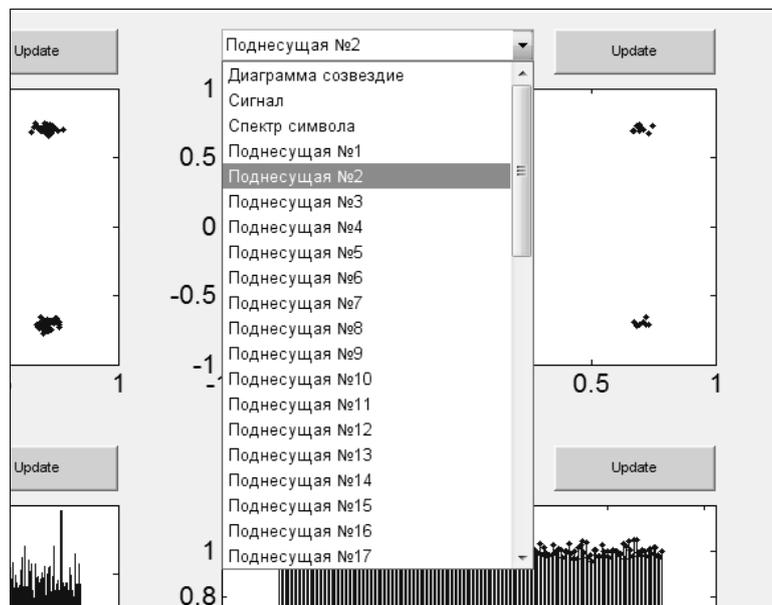


Рис. 6. Вид выпадающего окна

Литература

1. Проспект НПФ «Микран». Аппаратура беспроводных систем связи 2010.
2. Руководство по эксплуатации «Аппаратура беспроводной передачи данных WiMIC-6000», версия 1011.

УДК 001.891: 004.94

КВАЗИСТАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МОДАЛЬНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ В МНОГОПРОВОДНЫХ СТРУКТУРАХ

П.Е. Орлов

Приведены результаты квазистатического моделирования распространения импульсного сигнала в многопроводной структуре. Показаны модальные искажения форм сигнала при различных неоднородностях в одном из пассивных проводников.

Ключевые слова: квазистатический анализ, модальные явления, многопроводные структуры.

Возможности современной контрольно-измерительной и диагностической техники во многом определяются использованием новых способов и принципов. При этом важное место занимают способы зондирования (обнаружения, идентификации, диагностики), в частности, многопроводных структур. В работе [1] рассмотрены модальные искажения импульса. Данные явления могут быть применимы для диагностики многопроводных структур, поскольку при распространении импульса в многопроводной структуре с неоднородным диэлектрическим заполнением из N проводников (не считая опорного) он может подвергаться модальным искажениям, вплоть до разложения на N импульсов меньшей амплитуды.

ды из-за различия погонных задержек мод в линии. Таким образом, если зондируемые проводники имеют различные электрические и магнитные связи с зондирующим проводником (что приводит к различию задержек мод), то по форме сигнала в зондирующей линии можно получить информацию о зондируемых проводниках без контакта с ними. Однако для более глубокого изучения и применения на практике этой возможности необходимо тщательное моделирование, в частности того, как влияют неоднородности в зондируемых линиях на форму искажений сигнала в зондирующей линии.

Цель данной работы – на примере результатов квазистатического моделирования распространения импульсного сигнала в многопроводной структуре продемонстрировать возможность определения типов неоднородностей в зондируемых проводниках по форме искажения импульсного сигнала в зондирующей линии.

Моделирование проводилось в системе *TALGAT*, потери не учитывались. На рис. 1 приведены поперечное сечение структуры и графическое отображение подключений элементов. Структура состоит из модального зонда, выполненного в виде печатных проводников на подложке из стеклотекстолита и зондируемых проводников в изоляции. Параметры структуры: толщина диэлектрика 0,29 мм; $\epsilon_r = 5$; толщина полосок 0,105 мм; ширина полосок 0,3 мм; расстояние между краями полосок 0,4 мм; расстояние между краями полосок и диэлектрика 0,2 мм; для проводов – радиус жилы 0,1 мм; $\epsilon_r = 3$; толщина изоляции 0,1 мм; высота центров относительно верхнего края полосок 0,6 мм.

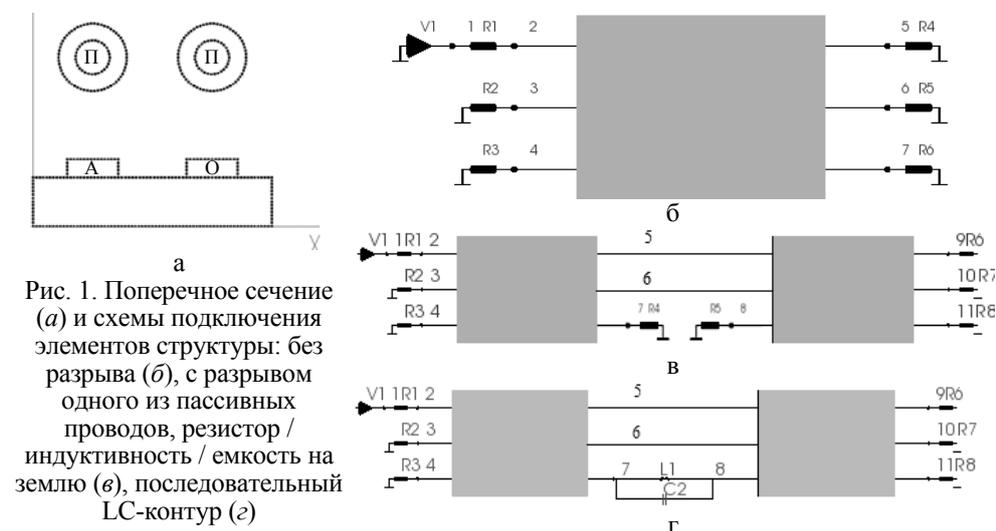


Рис. 1. Поперечное сечение (а) и схемы подключения элементов структуры: без разрыва (б), с разрывом одного из пассивных проводов, резистор / индуктивность / емкость на землю (в), последовательный LC-контур (г)

Рассмотрены 4 случая: без разрыва, разрыв, представленный резистором / емкостью / индуктивностью на землю, последовательный LC-контур в одном из пассивных проводников. Импульсный сигнал (длительность фронтов и плоской вершины 100 пс) с ЭДС 2 В подавался между активным и опорным проводниками структуры длиной 1 м с сопротивлениями на концах 100 Ом, значения резисторов 10 МОм, емкостей и индуктивностей 50 пФ и 50 пГн соответственно. Неоднородности находятся на расстоянии 0,5 м от начала линии. Результаты моделирования приведены на рис. 2–6.

На рис. 2 показаны формы сигналов в активной линии структуры без разрыва пассивного провода (см. рис. 1, б). К концу активной линии приходят два импульса, хотя может наблюдаться и три, поскольку погонные задержки мод равны 3,7; 3,9; 4,8 нс/м. Однако к концу линии приходит первый и третий импульсы, тогда как второй сливается с первым. К началу линии, с двойной задержкой по распространению, приходят отражения первого и третьего импульсов.

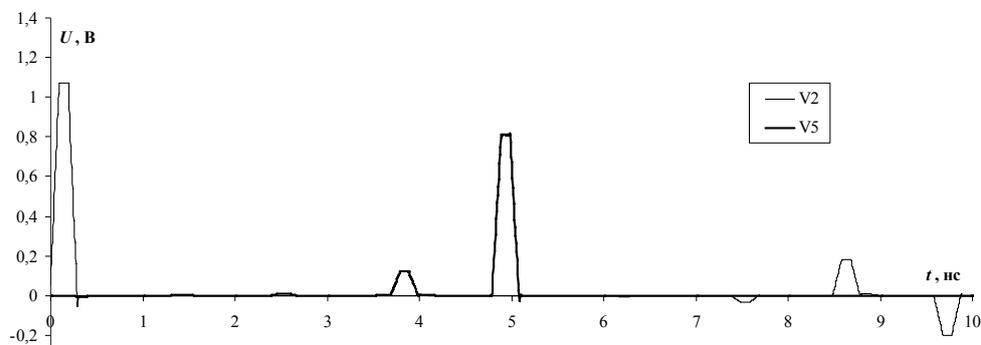


Рис. 2. Формы сигналов в начале ($V2$) и в конце активной линии ($V5$) структуры без разрыва (см. рис. 1, б)

На рис. 3 показаны формы сигналов в активной линии с резисторами ($R=10$ МОм) между пассивным и опорным проводниками. К концу активной линии приходят два импульса (так же, как и в случае без разрыва), наблюдается изменение формы сигнала самой быстрой моды. Примечательно, что формы отраженных сигналов также изменили свою форму: в начало активной линии приходят отраженные импульсы от места, где находятся неоднородности в пассивной (в районе 4 нс).

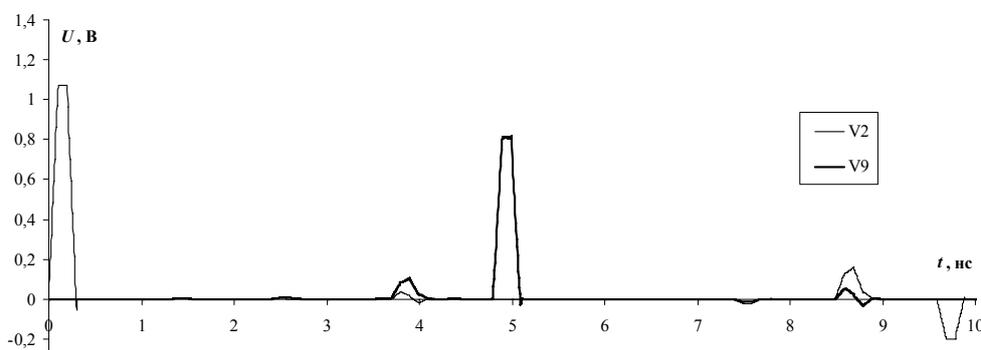


Рис. 3. Формы сигналов в начале ($V2$) и в конце активной линии ($V9$) с разрывом одного из пассивных проводников (см. рис. 1, в)

На рис. 4 показаны формы сигналов в активной линии с емкостями между пассивным и опорным проводниками. К концу линии приходят три импульса, вместо двух, как в случае без разрыва, либо разрывом, представленным резистором на землю (см. рис. 2, 3). Стоит отметить, что отражения в активной линии от места повреждения в пассивной (см. рис. 4) ярко выражены (к началу линии приходят три импульса), в отличие от рассмотренных выше случаев.

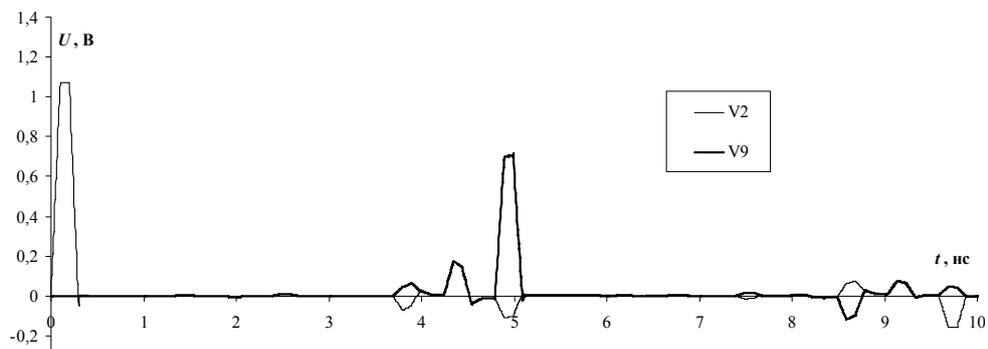


Рис. 4. Формы сигналов в начале (V_2) и в конце активной линии (V_9) с разрывом одного из пассивных проводников с емкостями (рис. 1, в)

На рис. 5 показаны формы сигналов в активной линии с индуктивностями между пассивным и опорным проводниками. Картина аналогична емкостному случаю (см. рис. 4). Однако завал плоской вершины импульса выражен не так ярко.

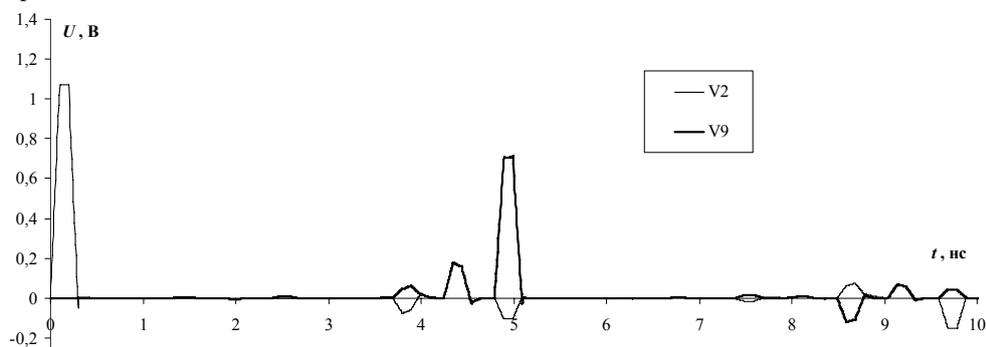


Рис. 5. Формы сигналов в начале (V_2) и в конце активной линии (V_9) с разрывом одного из пассивных проводников с индуктивностями (см. рис. 1, в)

На рис. 6 показаны формы сигналов в активной линии с последовательно подсоединенным LC-контуром к пассивному проводу. Отклик аналогичен случаю без разрыва (см. рис. 2). Причиной является очень малое значение L , по существу, сводящее LC-контур к КЗ.

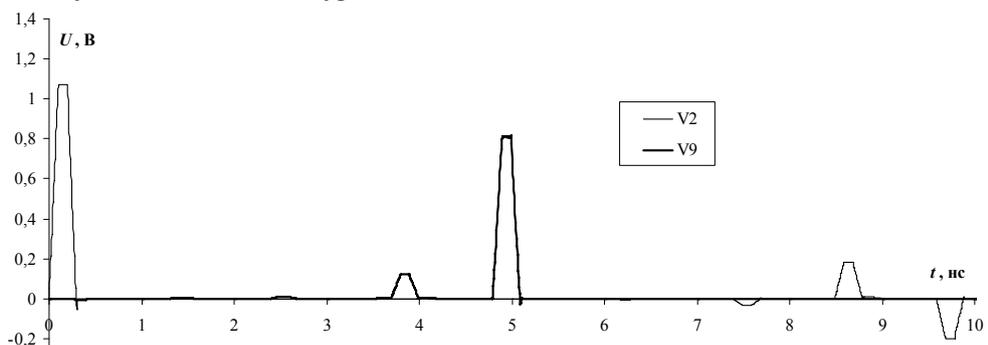


Рис. 6. Формы сигналов в начале (V_2) и в конце активной линии (V_9) без разрыва пассивных проводников с индуктивностями и емкостями (см. рис. 1, з)

Приведенные результаты показывают, что формы сигналов в активной линии меняются в зависимости от наличия и типа неоднородностей в пассивном проводнике. Это свидетельствует о возможности идентификации неоднородностей в пассивной линии без прямого контакта с ней.

Литература

1. Газизов Т.Р., Заболоцкий А.М., Кузнецова-Таджибаева О.М. Исследование модальных искажений импульсного сигнала в многопроводных линиях с неоднородным диэлектрическим заполнением // Электромагнитные волны и электронные системы (Москва). 2004. Т. 11, №11. С. 18–22.

УДК 621.382.2/3

**МОНОЛИТНЫЕ ИНТЕГРАЛЬНЫЕ СХЕМЫ ПАССИВНЫХ
УДВОИТЕЛЕЙ ЧАСТОТЫ S- И С-ДИАПАЗОНОВ
НА ОСНОВЕ GaAs pHEMT-ТЕХНОЛОГИИ**

В.С. Арыков, А.А. Баров, А.В. Кондратенко, А.А. Фоминых, Д.С. Хохол

Представлены результаты разработки монолитных интегральных схем пассивных удвоителей частоты S- и С-диапазонов, выполненных на основе 0,25 мкм GaAs pHEMT-технологии ЗАО «НПФ «Микран».

Ключевые слова: СВЧ, монолитная интегральная схема, удвоитель частоты, коэффициент преобразования, подавление гармоник, измерение параметров на пластине.

Применение СВЧ монолитных интегральных схем (МИС) в приемопередающих модулях современных радиоэлектронных систем позволяет в значительной степени снизить трудоемкость сборки и настройки модулей и, как следствие, уменьшить их себестоимость. При крупносерийном выпуске применение МИС собственного производства может дать дополнительный выигрыш по экономическим показателям. В данной статье представлены результаты разработки пассивных удвоителей частоты S- и С-диапазонов, предназначенных для замещения аналогов зарубежного производства, которые в больших количествах применяются в различной аппаратуре СВЧ-диапазона, производимой ЗАО «НПФ «Микран».

Удвоители частоты S-диапазона (обозначение по классификатору – МР702) и С-диапазона (МР701) выполнены на основе 0,25 мкм GaAs pHEMT-технологии НПФ «Микран». За основу была выбрана мостовая схема, что позволило получить подавление первой, третьей и четвертой гармоник входного сигнала без применения дополнительных внешних частотно-селективных цепей. Эквивалентные схемы разработанных устройств представлены на рис. 1.

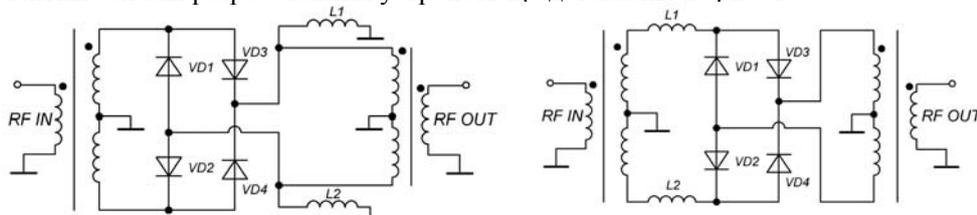


Рис. 1. Эквивалентные схемы удвоителей частоты МР701 (слева) и МР702 (справа)

Индуктивности $L1$ и $L2$ в выходной цепи МР701, а также во входной цепи МР702 обеспечивают равномерность коэффициента преобразования, а также вносят вклад в подавление побочных продуктов преобразования частоты. В качестве нелинейных элементов используются диоды Шоттки, выполненные по транзисторной технологии. Основное достоинство данного решения заключается в получении малого рельефа топологии в областях перехода от нелинейного эле-

мента к трансформатору. Недостаток применения планарных диодов, выполненных по транзисторной технологии, состоит в более высоком паразитном последовательном сопротивлении последних (в сравнении с вертикальными структурами), что приводит к большим потерям преобразования [1].

На рис. 2 представлены фотографии кристаллов, размер $2,0 \times 1,5 \times 0,1$ мм.

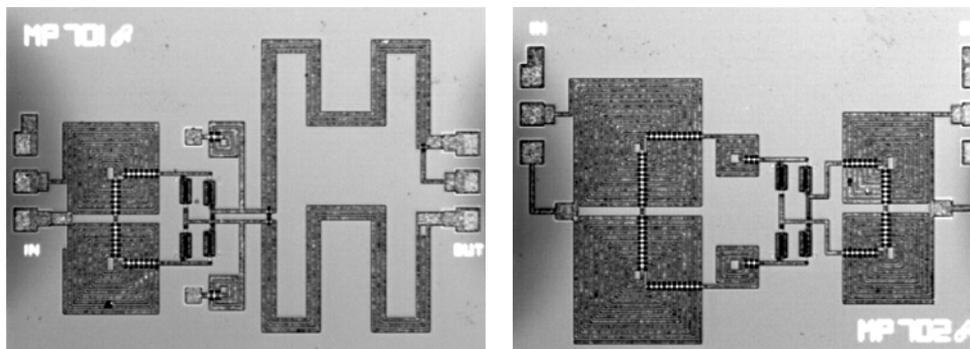


Рис. 2. Фотографии кристаллов удвоителей частоты MP701 (слева) и MP702 (справа)

Выходной трансформатор МИС MP701 представляет собой мост Маршанда на основе связанных микрополосковых линий, в то время как входной трансформатор МИС MP701, а также оба трансформатора МИС MP702 выполнены на основе связанных спиральных катушек для удовлетворения требования по габаритным размерам кристаллов [2].

Измерение радиочастотных характеристик проводилось непосредственно на пластине на участке выходного контроля МИС НПФ «Микран», а также в лаборатории НОЦ «Нанотехнологии» ТУСУРа. На рис. 3 и 4 представлены экспериментальные частотные зависимости коэффициентов преобразования МИС MP701 и MP702 при различных уровнях входной мощности.

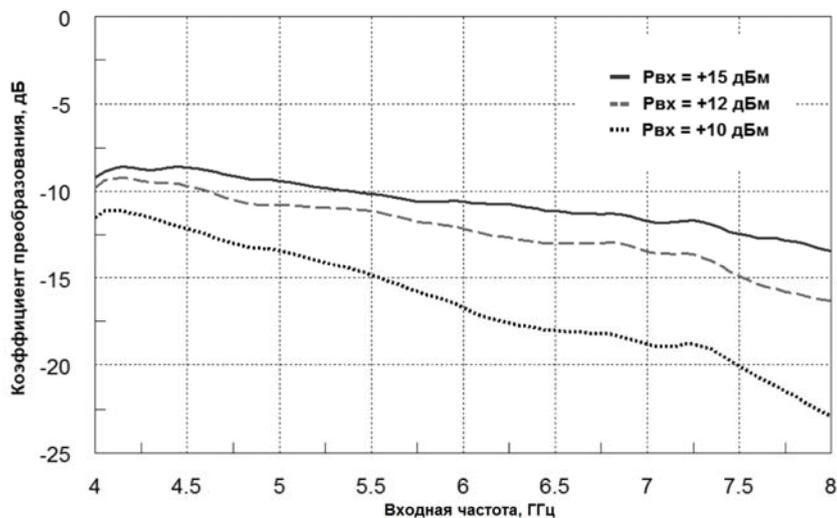


Рис. 3. Частотные зависимости коэффициента преобразования МИС MP701

На рис. 5 и 6 для МИС MP701 и MP702 соответственно представлены экспериментальные частотные зависимости подавления различных гармоник на выхо-

де относительно уровня входного сигнала (все характеристики соответствуют входной мощности 15 дБм).

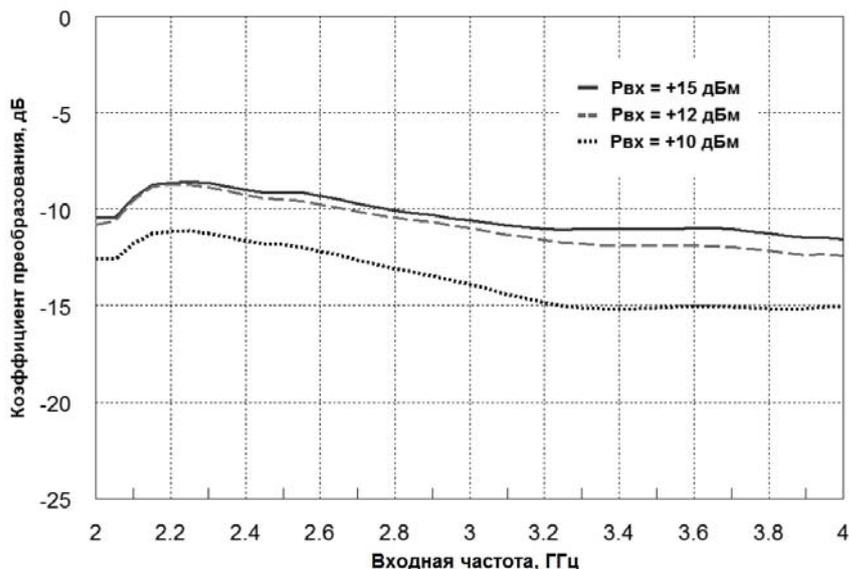


Рис. 4. Частотные зависимости коэффициента преобразования МИС МР702

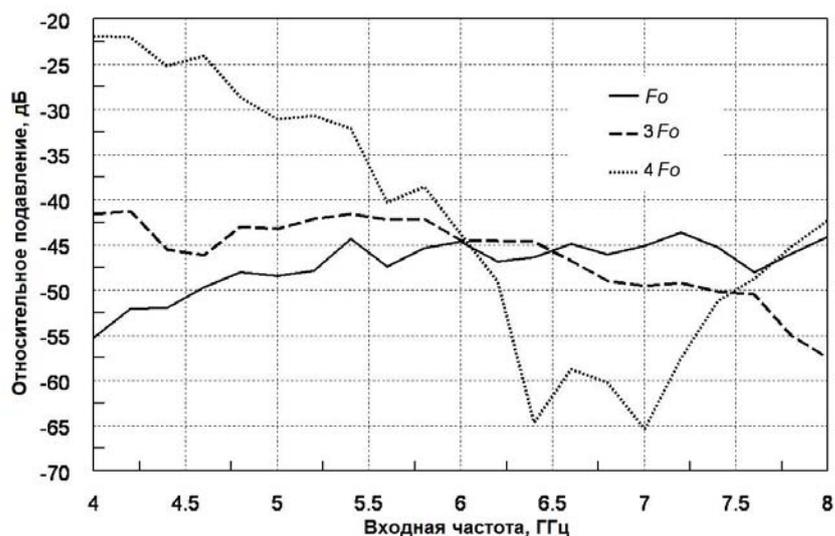


Рис. 5. Частотные зависимости подавления различных гармоник на выходе МИС МР701

Ближайшими зарубежными широко известными аналогами разработанных МИС МР701 и МР702 являются МИС удвоителей частоты НМС204 и НМС189 компании Nittite [3]. Сравнительный анализ характеристик показал, что единственный параметр, по которому новые разработки значительно уступают аналогам компании Nittite, – это подавление четвертой гармоники на выходе в нижней части рабочего диапазона частот. Что касается коэффициента преобразования, который во многих случаях является определяющей характеристикой умножителя, то

при одинаковой мощности входного сигнала разработанные микросхемы по данному параметру превосходят зарубежные аналоги.

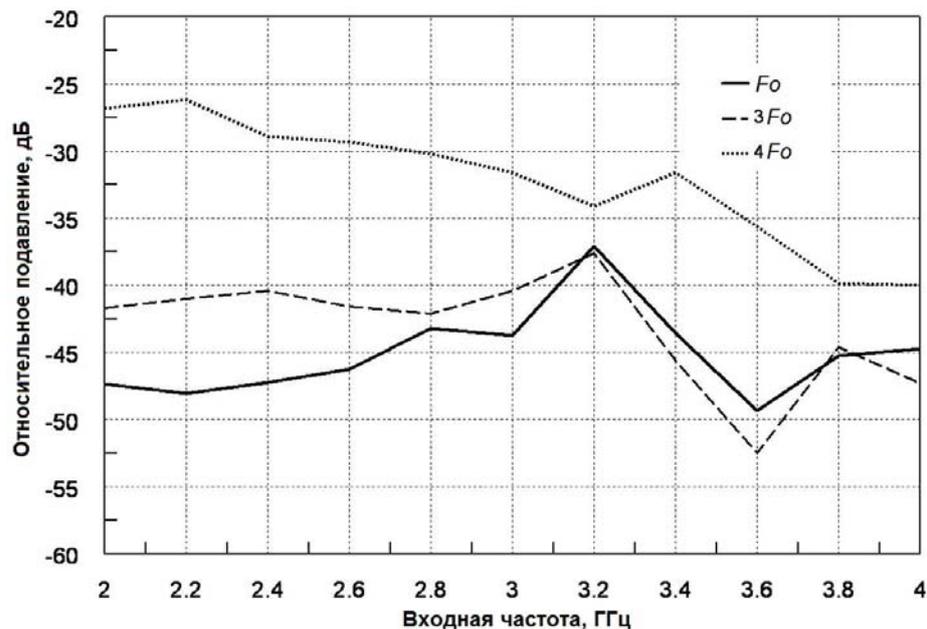


Рис. 6. Частотные зависимости подавления различных гармоник на выходе МИС МР702

Сравнение основных электрических параметров разработанных МИС с соответствующими параметрами МИС компании Hittite представлено в табл. 1 и 2.

Таблица 1
Сравнение основных параметров удвоителей МР701 и НМС204 ($P_{вх} = 15$ дБм)

Наименование параметра, единицы измерения	Значение	
	МР701	НМС204
Диапазон входных частот, ГГц	4–8	4–8
Диапазон выходных частот, ГГц	8–16	8–16
Потери преобразования, дБ, не более	14	18
Подавление 1-й гармоники, дБ, не менее	40	41
Подавление 3-й гармоники, дБ, не менее	40	42
Подавление 4-й гармоники, дБ, не менее	22	35

Таблица 2
Сравнение основных параметров удвоителей МР702 и НМС189 ($P_{вх} = 15$ дБм)

Наименование параметра, единицы измерения	Значение	
	МР702	НМС189
Диапазон входных частот, ГГц	2–4	2–4
Диапазон выходных частот, ГГц	4–8	4–8
Потери преобразования, дБ, не более	12	14
Подавление 1-й гармоники, дБ, не менее	35	30
Подавление 3-й гармоники, дБ, не менее	35	35
Подавление 4-й гармоники, дБ, не менее	25	32

Заключение

В результате проделанной работы были разработаны и изготовлены МИС пассивных удвоителей частоты MP701 и MP702 для замены аналогов зарубежного производства, которые в больших количествах применяются в различной аппаратуре, производимой НПФ «Микран». Данные микросхемы могут быть предложены и стороннему заказчику.

На основе полученного опыта в настоящее время ведется разработка преобразовательных устройств (умножителей и смесителей частоты) для других частотных диапазонов. Кроме того, ведутся работы по корпусированию микросхем. Это позволит их эффективно применять в модулях, выполненных как по гибридно-интегральной технологии, так и технологии монтажа печатных плат на основе органических диэлектриков.

Литература

1. Хохол Д.С. GaAs МИС широкополосного двойного балансного смесителя / Д.С. Хохол, Е.В. Дмитриченко, А.А. Баров и др. // Сб. трудов Всерос. науч.-техн. конф. Научная сессия ТУСУР-2011. Томск: В-Спектр, 2011. Ч. 2. С. 256–259.
2. Yoon Y.J. Design and characterization of multilayer spiral transmission-line baluns / Y.J. Yoon, L. Yicheng, R.C. Frye // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. 1999. Vol. 47, No 9. P. 1841–1847.
3. Сайт компании Hittite [Электронный ресурс]. Режим доступа свободный: <http://www.hittite.com/>, (дата обращения: 21.09.2011).

УДК 621.382.2/3

МОНОЛИТНАЯ ИНТЕГРАЛЬНАЯ СХЕМА МАЛОШУМЯЩЕГО УСИЛИТЕЛЯ ДИАПАЗОНА 8-12 ГГц НА ОСНОВЕ GaAs РНЕМТ-ТЕХНОЛОГИИ

В.С. Арыков, А.А. Баров, А.В. Кондратенко

Представлены результаты разработки монолитной интегральной схемы СВЧ малошумящего усилителя, выполненной на основе 0,25 мкм GaAs рНЕМТ-технологии ЗАО «НПФ «Микран». Полоса рабочих частот 8–12 ГГц, коэффициент усиления 27 дБ, коэффициент шума не более 2 дБ, возвратные потери по входу и выходу не менее 10 дБ, однополярное напряжение питания 5 В, ток потребления 45 мА.

Ключевые слова: СВЧ, монолитная интегральная схема, малошумящий усилитель, полевой транзистор с высокой подвижностью электронов, коэффициент усиления, коэффициент шума, измерение параметров на пластине.

Одним из приоритетных направлений ЗАО «НПФ «Микран» являются разработка и производство монолитных интегральных схем (МИС) СВЧ-диапазона. Данное направление призвано удовлетворить собственные потребности в современной элементной базе, а также предложить некоторые функциональные компоненты сторонним заказчикам. В статье представлены результаты разработки малошумящего усилителя (МШУ) X-диапазона частот, предназначенного для применения в составе приемопередающей аппаратуры, производимой НПФ «Микран» [1].

Среди публикаций в последнее время появились первые работы, посвященные созданию GaAs МШУ, выполненных на основе отечественных гетероструктурных технологий [2–4]. Авторы данной работы ни в коем случае не претендуют на какое-либо место в хронологии отечественных работ по созданию МШУ X-диапазона, а просто представляют полученные результаты как этап систематизации и документирования полученного опыта в данном направлении.

Расчет усилителя проводился согласно методике совмещенного согласования [5]. МИС содержит три каскада на полевых транзисторах с высокой подвижностью электронов (рНЕМТ) с интегрированными цепями согласования, коррекции амплитудно-частотной характеристики, а также ввода и блокировки питания. Эквивалентная схема МШУ приведена на рис. 1.

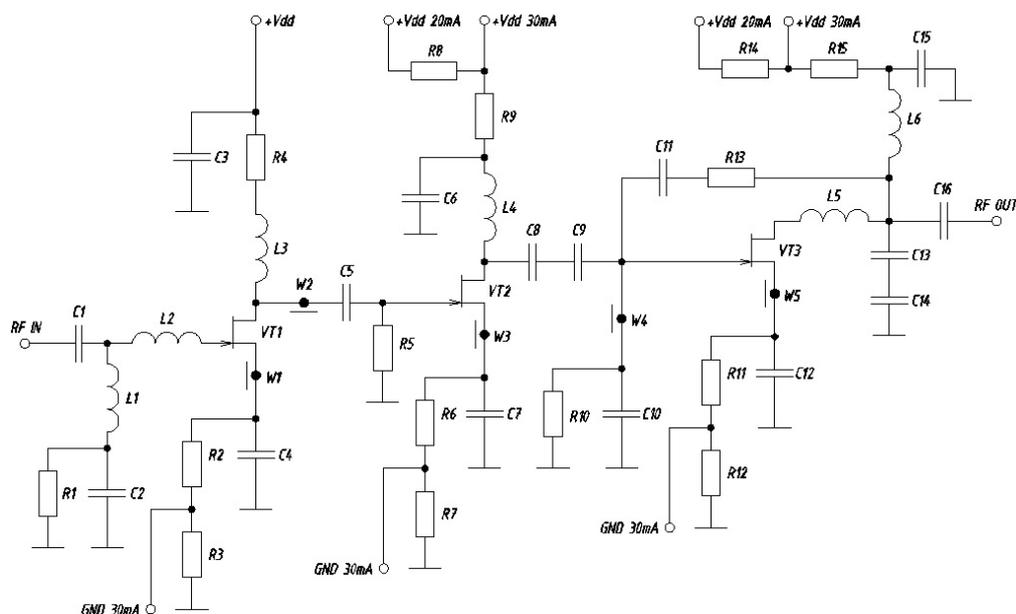


Рис. 1. Эквивалентная схема МШУ

В первом и втором каскадах применено классическое решение – последовательная обратная связь в виде высокоомного отрезка линии передачи в истоке транзистора. В первом каскаде величина обратной связи выбиралась исходя из реализации устойчивости и сближения условия оптимального согласования по шуму и условия комплексно-сопряженного согласования на входе транзистора. Во втором каскаде величина обратной связи выбиралась тоже исходя из реализации устойчивости, а также трансформации входного сопротивления транзистора второго каскада для возможности реализации согласующей цепи между первым и вторым каскадом с минимальным количеством элементов. Выбор параллельной резистивной обратной связи в третьем каскаде обусловлен требованиями обеспечения равномерного коэффициента усиления в рабочем диапазоне частот, а также согласования выхода МИС с трактом СВЧ. Для организации требуемого режима по постоянному току во всех каскадах используется схема автосмещения. Фотография кристалла МИС МШУ на пластине представлена на рис. 2, размер $2,5 \times 1,5 \times 0,1$ мкм.

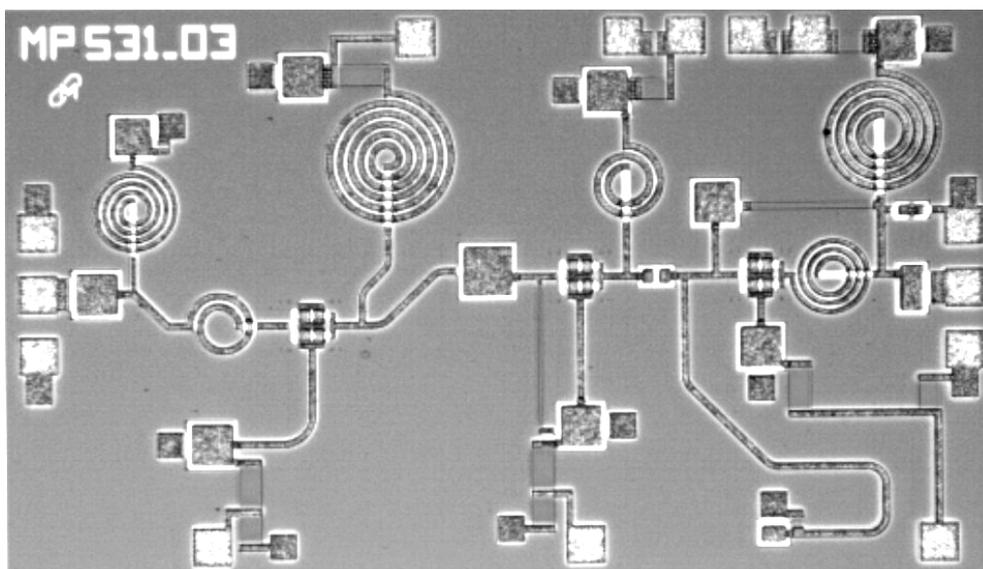


Рис. 2. Топология МИС МШУ

Работа по созданию МИС включала в себя три итерации. В качестве базового материала для изготовления МИС использовались гетероструктуры на основе GaAs с двойным дельта-легированием, полученные методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Первоначально кристаллы были изготовлены на технологической линии МИС ЗАО «НПФ «Микран» с использованием контактной ультрафиолетовой фотолитографии, позволяющей получать длину затвора 0,35 мкм. Данный этап можно характеризовать низкой повторяемостью основных параметров МИС (коэффициент усиления, коэффициент шума) от кристалла к кристаллу на пластине, а также реализованным коэффициентом шума порядка 3 дБ.

Заложенные схемные решения позволили провести оптимизацию конструкции гетероструктуры, а также уменьшить длину затворов транзисторов, прорисовка которых выполнялась методом электронно-лучевой литографии на установке Raith-150^{TWO}. Изменение конструкции гетероструктуры, а также переход к Т-образной форме затвора с длиной основания 0,25 мкм позволили в рабочей полосе частот увеличить коэффициент усиления на 6 дБ при увеличении тока потребления всего на 20%, а также реализовать коэффициент шума не более 2 дБ, что удовлетворяет требованиям технического задания [1].

В процессе третьей итерации были скорректированы номиналы тонкопленочных резисторов цепей автосмещения для снижения суммарного тока потребления (требование главного конструктора аппаратуры первоочередного применения МИС). Кроме того, была проведена оптимизация конструкции транзистора с целью повышения пробивных напряжений. Это позволило включить данную МИС в перспективную работу по интеграции МШУ, высокочастотных усилителей, а также управляющих схем коммутационного типа (аттенюатор, фазовращатель и переключатели) на одном кристалле.

Измерение радиочастотных характеристик производилось непосредственно на пластине с помощью зондовой станции CASCADE Summit 11000, векторного анализатора цепей Rohde & Schwarz ZVA 40 и анализатора спектра Agilent E4448A (оборудование лаборатории НОЦ «Нанотехнологии» ТУСУРа). Резуль-

тирующие экспериментальные частотные характеристики МИС МШУ представлены на рис. 3.

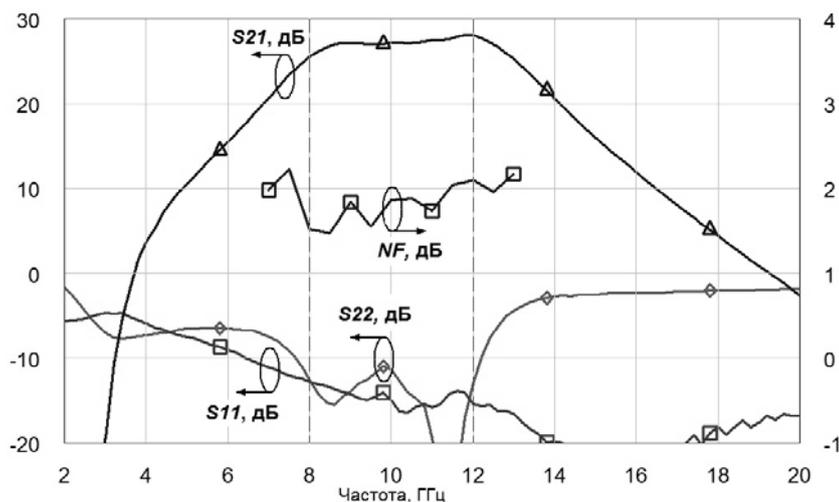


Рис. 3. Экспериментальные частотные характеристики МИС МШУ

Основные электрические параметры разработанного устройства представлены в таблице.

Основные электрические параметры усилителя

Наименование параметра	Значение
Диапазон рабочих частот, ГГц	8–12
Коэффициент усиления (КУ), дБ	27±1
Коэффициент шума, дБ, не более	2
Возвратные потери по входу / выходу, дБ, не менее	10
Выходная мощность при сжатии КУ на 1 дБ, дБм, не менее	12
Типовое значение тока потребления при питании 5 В, мА	45

Заключение

Разработана и изготовлена МИС малошумящего усилителя X-диапазона на основе GaAs pHEMT-технологии с параметрами на уровне современных аналогов. В настоящее время ведется подготовка к серийному производству данной микросхемы.

Отработанная методология проектирования, а также технология производства позволяют создавать более высокочастотные МИС. В свою очередь реализация малошумящего усилителя на основе транзисторов с достаточно высоким пробивным напряжением (не менее 14 В в триодном включении) позволила транслировать полученные наработки на перспективную работу по созданию системы на кристалле, которая включает в себя как МШУ, так и высокочастотные усилители.

Литература

1. Арыков В.С. GaAs pHEMT МИС малошумящего усилителя X-диапазона / В.С. Арыков, А.А. Баров, А.В. Кондратенко // Сб. трудов 21-й Междунар. Крымской конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». Севастополь: Вебер, 2011. Т. 1. С. 159–160.

2. Крутов А.В. Монолитные малошумящие усилители X-диапазона / А.В. Крутов, А.С. Ребров // Сб. трудов 16-й Междунар. Крымской конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». Севастополь: Вебер, 2006. Т. 1. С. 183–184.
3. Мокеров В.Г. Разработка комплекта монолитных малошумящих усилителей X-диапазона на основе 0,15 мкм GaAs pHEMT-технологии / В.Г. Мокеров, Л.И. Бабак, Ю.В. Федоров и др. // Доклады ТУСУРа. 2010. № 2 (22). С. 105–117.
4. Ющенко А.Ю. Исследование характеристик МШУ X-диапазона с защитой по входу / А.Ю. Ющенко, Г.И. Айзенштат, В.Г. Божков и др. // Сб. трудов 21-й Междунар. Крымской конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». Севастополь: Вебер, 2011. Т. 1. С. 161–162.
5. Текшев В.Б. Двухтранзисторный СВЧ-усилитель с минимальным коэффициентом шума и согласованным входом и выходом // Общие вопросы радиоэлектроники. 1990. Вып. 15. С. 16–23.

УДК 621.372

ЭКСТРАКЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ЭКВИВАЛЕНТНЫХ СХЕМ ПАССИВНЫХ КОМПОНЕНТОВ СВЧ МИС В КОПЛАНАРНОМ ТРАКТЕ

И.М. Добуш

В диапазоне частот до 40 ГГц представлены результаты экстракции параметров эквивалентных схем пассивных сосредоточенных компонентов СВЧ монолитных интегральных схем в копланарном исполнении – GaAs-резистора, МДМ-конденсатора и квадратной спиральной катушки индуктивности. Компоненты изготовлены по отечественной 0,13–0,15 мкм GaAs pHEMT/mHEMT технологии.

Ключевые слова: СВЧ монолитная интегральная схема, модели элементов, эквивалентная схема, копланарная линия.

Введение. В миллиметровом диапазоне волн копланарное исполнение монолитных интегральных схем (МИС) имеет ряд преимуществ по сравнению с микрополосковым [1, 2]. Однако в связи со сложностью процессов, происходящих в копланарных линиях (КПЛ) (возбуждение нечетной моды и др. [1, 3]), остается открытым вопрос о наличии адекватных быстродействующих моделей копланарных элементов МИС в популярных САПР СВЧ-устройств – таких, например, как ADS фирмы Agilent или Microwave Office фирмы AWR. Поэтому для анализа неоднородностей в КПЛ и сосредоточенных элементов на основе КПЛ часто приходится использовать мощные средства моделирования, в том числе электромагнитный анализ, что приводит к существенным временным затратам. Указанное обстоятельство является одной из причин выполнения СВЧ МИС в микрополосковой технологии, элементы которой могут быть легче и надежнее промоделированы [4].

В настоящей работе представлены результаты построения моделей пассивных сосредоточенных компонентов СВЧ МИС в КПЛ тракте в виде эквивалентных схем (ЭС) с использованием разработанных методик экстракции (аналитической и комбинированной [5]) и программного обеспечения (ПО) на этой основе [6, 7]. Пассивные компоненты изготовлены по 0,13–0,15 мкм GaAs pHEMT/mHEMT-технологии, разработанной в Институте СВЧ полупроводниковой электроники РАН (ИСВЧПЭ РАН, г. Москва). Исходные данные (S-параметры) в диапазоне частот 0,1–40 ГГц для построения моделей копланарных

элементов получены при помощи зондовых измерений на полупроводниковой пластине в НОЦ «Нанотехнологии» (ТУСУР, г. Томск).

Экстракция элементов ЭС копланарного GaAs-резистора. На рис. 1, *а* приведена фотография копланарного резистора в активном слое GaAs с размерами 7×12 мкм, а на рис. 2 – его измеренные S -параметры. Для представления резистора выберем простейшую ЭС (рис. 1, *б*), используемую в библиотеке моделей для GaAs рHEMT-технологии ED02AH, близкой к технологии ИСВЧПЭ РАН. Экстракцию такой ЭС выполним на основе аналитической методики [5], используя значения параметров рассеяния резистора на частоте 20 ГГц. Найденные значения элементов ЭС показаны на рис. 1, *б*.

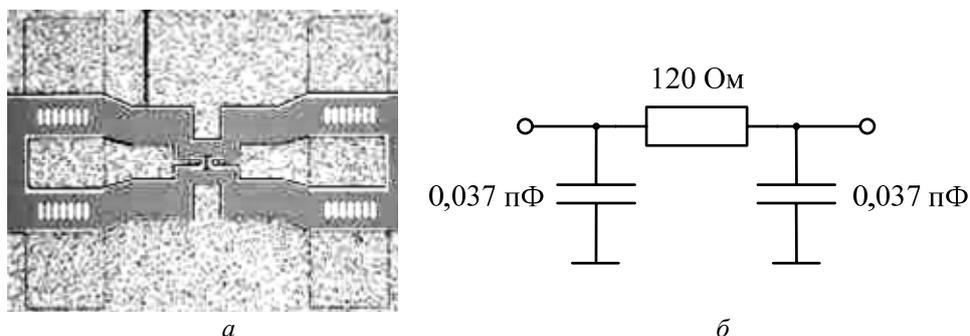


Рис. 1. Копланарный резистор в активном слое GaAs (*а*) и его схема замещения (*б*)

На рис. 2 представлено сравнение в диапазоне 0,1–40 ГГц частотных зависимостей параметров рассеяния копланарного резистора, полученных при измерениях, с рассчитанными по ЭС.

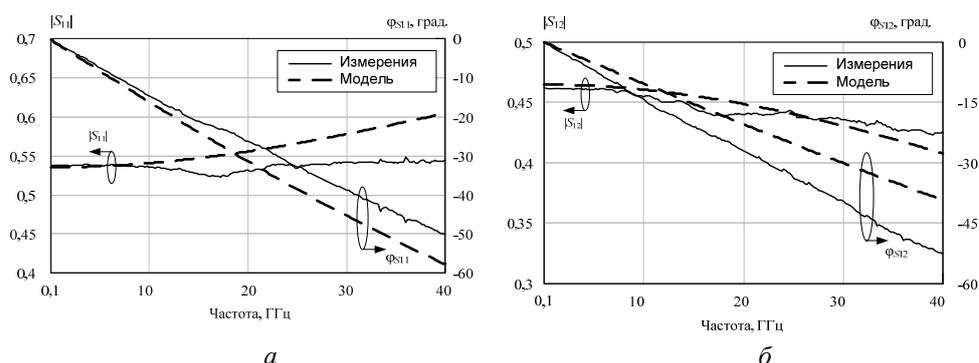


Рис. 2. Частотные зависимости параметров рассеяния копланарного GaAs-резистора и его ЭС-модели (см. рис. 1, *б*)

Из графиков видно, что измеренные и рассчитанные по модели параметры рассеяния копланарного резистора (в особенности фазовая составляющая) значительно различаются, особенно в конце частотного диапазона. На частоте 40 ГГц максимальная ошибка параметров рассеяния составляет 12% по модулю и 13° по фазе.

Исследования показали, что параметрическая оптимизация элементов выбранной ЭС резистора (см. рис. 1, *б*) не приводит к существенному снижению погрешности модели. Можно предположить, что различие частотных характери-

стик объясняется неудачным выбором структуры ЭС для данной топологии копланарного резистора.

В связи с этим используем для представления резистора более сложную ЭС (рис. 3). Формулы для экстракции такой ЭС с помощью аналитической методики приведены в [5]. Для построения модели использовались измеренные S-параметры копланарного резистора в той же частотной точке (20 ГГц). Рассчитанные значения элементов приведены на рис. 3.

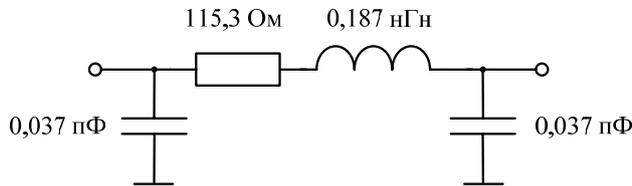


Рис. 3. Эквивалентная электрическая схема копланарного GaAs-резистора

На рис. 4 представлены частотные зависимости параметров рассеяния измеренного резистора и полученной ЭС в диапазоне 0,1–40 ГГц.

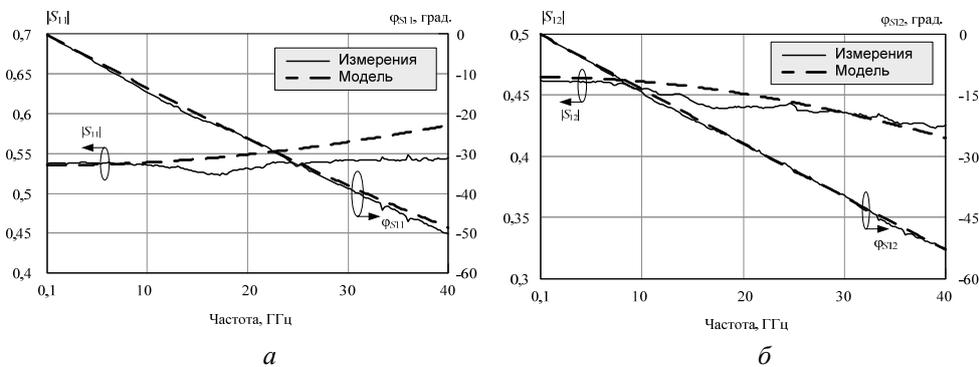


Рис. 4. Частотные зависимости параметров рассеяния копланарного GaAs-резистора и его ЭС-модели (см. рис. 3)

Видно, что измеренные и рассчитанные по более сложной модели параметры рассеяния копланарного резистора хорошо совпадают. На частоте 40 ГГц максимальная ошибка параметров рассеяния не превышает 8% по модулю и 2° по фазе.

Таким образом, распространенная модель GaAs-резистора, используемая в библиотеке ED02АН, не обеспечивает хорошей точности для копланарного резистора, выполненного в технологии ИСВЧПЭ РАН. Применение аналитической методики экстракции [5] позволило получить более точную модель этого элемента.

Экстракция элементов ЭС копланарного МДМ-конденсатора. Построим модель копланарного межслойного (МДМ) конденсатора с геометрическими размерами 10×15 мкм (рис. 5, а). Для представления такого конденсатора используем ЭС, изображенную на рис. 5, б.

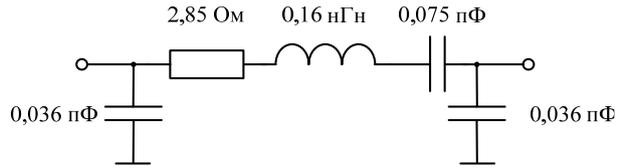
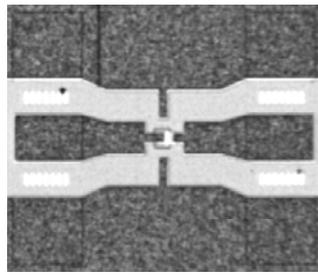


Рис. 5. Копланарный межслойный конденсатор (а) и его ЭС (б)

Измеренные параметры рассеяния МДМ-конденсатора приведены на рис. 6 и в табл. 1. Способ экстракции ЭС на рис. 5, б с помощью комбинированной методики рассмотрен в [5]. Для нахождения элементов ЭС были взяты значения измеренных S-параметров на частоте 2 ГГц, полученные величины элементов представлены на рис. 5, б. На рис. 6 и в табл. 1 представлено сравнение в диапазоне 0,1–40 ГГц частотных зависимостей параметров рассеяния МДМ-конденсатора, полученных при измерениях, с рассчитанными по ЭС.

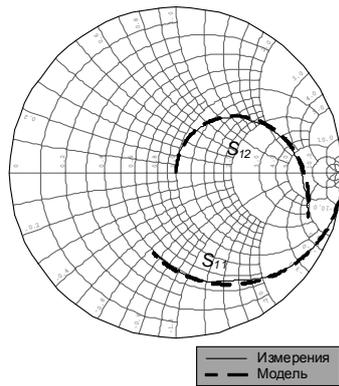


Рис. 6. Частотные зависимости параметров рассеяния копланарного МДМ-конденсатора и его ЭС-модели

Таблица 1

Параметры рассеяния копланарного МДМ-конденсатора и его ЭС-модели

Частота, ГГц	$ S_{11} $		$\varphi(S_{11})$, град		$ S_{12} $		$\varphi(S_{12})$, град	
	Измер.	Модель	Измер.	Модель	Измер.	Модель	Измер.	Модель
0,1	0,99789	0,99856	-4,3939	-4,4198	0,00464	0,00476	86,62	89,58
10	0,89753	0,89983	-38,568	-38,162	0,42058	0,42416	50,63	51,05
20	0,71901	0,73397	-65,884	-66,938	0,6467	0,6597	21,63	21,51
30	0,59339	0,60171	-88,508	-88,388	0,7598	0,7744	-1,17	-0,73
40	0,49555	0,49634	-106,38	-105,87	0,8282	0,8397	-17,03	-19,20

Из приведенных результатов видно, что в диапазоне частот до 40 ГГц отличие измеренных и рассчитанных по модели параметров рассеяния копланарного конденсатора достаточно мало. На частоте 40 ГГц максимальная ошибка по модулю параметров рассеяния не превышает 2% и по фазе 3°.

Экстракция элементов ЭС копланарной спиральной катушки индуктивности. Построим ЭС-модель для квадратной спиральной катушки индуктивности на основе КПЛ (рис. 7, б). Геометрические размеры катушки индуктивности следующие: ширина проводника – 15 мкм, длина спирали – 615 мкм, зазор – 10 мкм. Для представления спиральной катушки индуктивности выберем простейшую ЭС (см. рис. 7, б). Параметры рассеяния катушки, полученные в результате измерений, приведены на рис. 8 и в табл. 2.

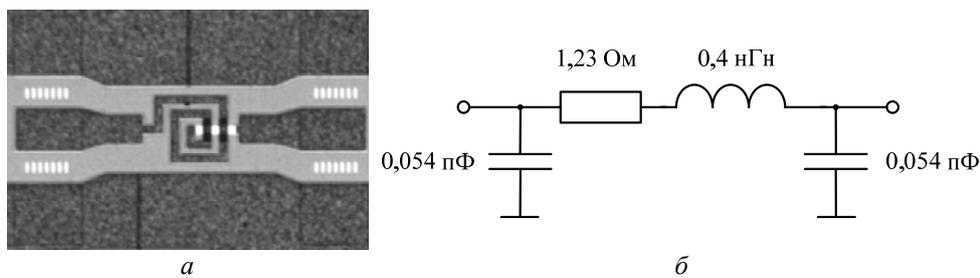


Рис. 7. Копланарная катушка индуктивности (а) и её ЭС (б)

Рис. 8. Частотные зависимости параметров рассеяния копланарной катушки индуктивности и её ЭС-модели

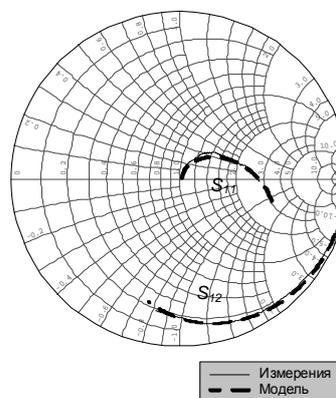


Таблица 2

Параметры рассеяния спиральной катушки индуктивности и ее ЭС-модели

Частота, ГГц	$ S_{11} $		$\varphi(S_{11})$, град		$ S_{12} $		$\varphi(S_{12})$, град		$f_{рез}$, ГГц	
	Измер.	Модель	Измер.	Модель	Измер.	Модель	Измер.	Модель	Измер.	Модель
0,1	0,0086	0,0121	6,9	3,55	0,994	0,987	-0,24	-0,24	34	33
10	0,112	0,089	59,25	57,50	0,972	0,983	-25,3	-24,46		
20	0,229	0,214	41,22	36,53	0,94	0,96	-50,03	-49,92		
30	0,342	0,39	18,66	10,53	0,88	0,90	-75,97	-77,46		
40	0,47	0,61	-1,44	-17,42	0,79	0,77	-100,12	-106,12		

Для экстракции модели по аналитической методике [5] были взяты значения S -параметров на частоте 20 ГГц, найденные значения элементов ЭС представлены на рис. 7, б. Сравнение измеренных и рассчитанных по модели параметров рассеяния копланарной катушки индуктивности (см. рис. 8 и табл. 2) показывает, что они удовлетворительно совпадают лишь до частоты 30 ГГц, где ошибка параметров рассеяния не превышает 15% по модулю и 8° по фазе. Свыше 30 ГГц ошибка по модулю и фазе коэффициента отражения резко увеличивается, это связано с тем, что в большинстве случаев простые модели в виде ЭС работают до частоты первого параллельного резонанса (см. табл. 2).

Заключение. Применение разработанных методик экстракции ([5]) и ПО на этой основе [6, 7] позволило построить модели пассивных сосредоточенных компонентов СВЧ МИС в КПЛ тракте. Исследование показало, что методики экстракции ЭС эффективны и обеспечивают хорошую точность моделей.

Работа выполнялась в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы по направлениям «Создание электронной компонентной базы» (14.740.11.1261), «Микроэлектроника» (П669,

Литература

1. Simons N. Coplanar Waveguide Circuits, Components, and Systems // John Wiley & Sons. 2001. P. 439.
2. Добуш И.М. Моделирование и экспериментальное исследование копланарных элементов для проектирования СВЧ монолитных интегральных схем / И.М. Добуш, А.А. Коколов, Л.И. Бабак // Сб. трудов 20-й Междунар. Крымской конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». 2010. Т. 1. С. 208–209.
3. Wolff I. Coplanar microwave integrated circuits // Wiley-Interscience. 2006. P. 545.
4. Marsh S. Practical MMIC Design // London: Artech House. 2006. P. 356.
5. Разработка методов, алгоритмов и интеллектуального программного обеспечения для синтеза микроволновых СВЧ-устройств с использованием точных моделей интегральных элементов: Отчет о НИР №П669 (3 этап) / ТУСУР; Руководитель А.Н. Сычев. 2010. 247 с.
6. Степачева А.В. Программный модуль для экстракции параметров эквивалентных схем пассивных компонентов СВЧ МИС в системе INDESYS-MS / А.В. Степачева, И.М. Добуш // Наст. сб.
7. Добуш И.М. Программа экстракции эквивалентных схем пассивных компонентов СВЧ монолитных интегральных схем SYMODEL / И.М. Добуш, М.В. Черкашин, Л.И. Бабак // Наст. сб.

УДК 621.382

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПОНЕНТОВ СВЧ МИС НА ОСНОВЕ GaAs НЕМТ-ТЕХНОЛОГИЙ *И.М. Добуш, А.Ю. Ющенко*

Представлены экспериментальные температурные зависимости параметров рассеяния активных и пассивных компонентов СВЧ монолитных интегральных схем (МИС), изготовленных по отечественным GaAs рНЕМТ- и мНЕМТ-технологиям. Определены зависимости от температуры элементов эквивалентных схем СВЧ-компонентов. Результаты могут быть использованы при проектировании термостабильных СВЧ МИС.

Ключевые слова: GaAs, НЕМТ, монолитная интегральная схема, СВЧ-компонент, параметры рассеяния, модель, температурная зависимость.

Введение. Как известно, температура является одним из основных дестабилизирующих факторов для радиоэлектронной аппаратуры. Все физико-химические свойства материалов, применяемых в радиоэлектронике, в большей или меньшей степени зависят от температуры. В то же время к комплексам военной, космической, бортовой и измерительной аппаратуры предъявляются жесткие требования по температурной стабильности [1]. Таким образом, при разработке устройств подобного класса возникает необходимость учета зависимостей электрических параметров используемых электронных компонентов от температуры. Эти зависимости можно разделить на две группы – линейные и нелинейные [1], вид которых определяется экспериментально.

В настоящей работе проведены экспериментальные исследования температурных зависимостей параметров рассеяния активных и пассивных компонентов СВЧ монокристаллических интегральных схем (МИС), изготовленных по отечественным GaAs рНЕМТ- и мНЕМТ-технологиям. На этой основе определены зависимости от температуры элементов эквивалентных схем (ЭС) СВЧ-компонентов. Результаты могут использоваться при построении температурных моделей компонентов МИС, необходимых для проектирования термостабильных СВЧ-устройств.

Температурные измерения параметров рассеяния СВЧ-компонентов. В качестве экспериментальных образцов использовались пассивные и активные компоненты МИС на полупроводниковой пластине, изготовленные по 0,15 мкм GaAs рНЕМТ/мНЕМТ-технологии ИСВЧПЭ РАН (г. Москва) [2] и 0,3 мкм GaAs рНЕМТ-технологии ОАО «НИИПП» (г. Томск) [3] соответственно. Зондовые измерения параметров рассеяния компонентов в диапазоне частот от 0,1 до 40 ГГц и диапазоне температур от 0 до 85 °С выполнены в НОЦ «Нанотехнологии» (ТУСУР, г. Томск) [4]. Для температурных измерений зондовая станция была дооснащена разработанным термостолком на основе термоэлектрического преобразователя Пельтье и температурным датчиком.

Копланарный GaAs-резистор в активном слое. На рис. 1 приведены результаты измерений S-параметров полупроводникового GaAs-резистора с сопротивлением около 100 Ом при температурах 0, 23 и 85 °С. Конструктивно резистор выполнен в копланарном тракте [2]. Как видно, модули параметров рассеяния полупроводникового резистора существенно изменяются под влиянием температуры. Это объясняется тем, что резистивный слой на основе материала GaAs обладает высоким положительным температурным коэффициентом сопротивления (ТКС).

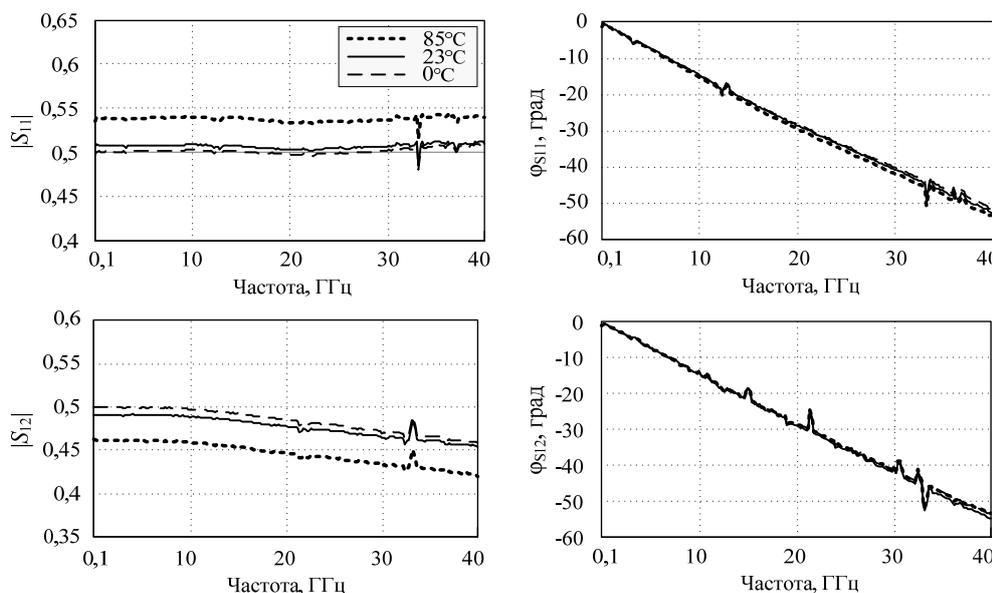


Рис. 1. Частотные зависимости параметров рассеяния GaAs-резистора при разных температурах

Используя измеренные параметры рассеяния, произведем расчет параметров эквивалентной схемы (ЭС) копланарного GaAs-резистора (рис. 2, а) при температурах 0, 23 и 85 °С с помощью программного модуля экстракции пассивных СВЧ-компонентов Extraction-P [4]. Результаты представлены на рис. 2, б.

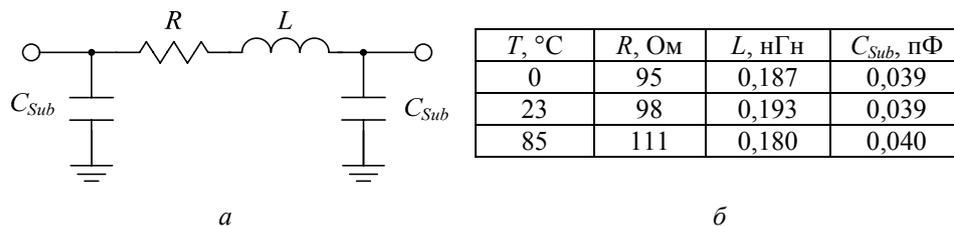


Рис. 2. Эквивалентная электрическая схема копланарного GaAs-резистора (а) и её параметры при разных температурах (б)

На рис. 3 показаны температурные зависимости параметров ЭС GaAs-резистора.

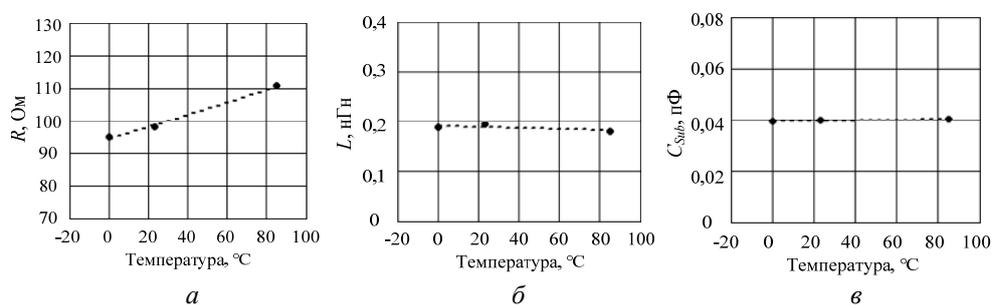


Рис. 3. Температурные зависимости параметров ЭС GaAs-резистора

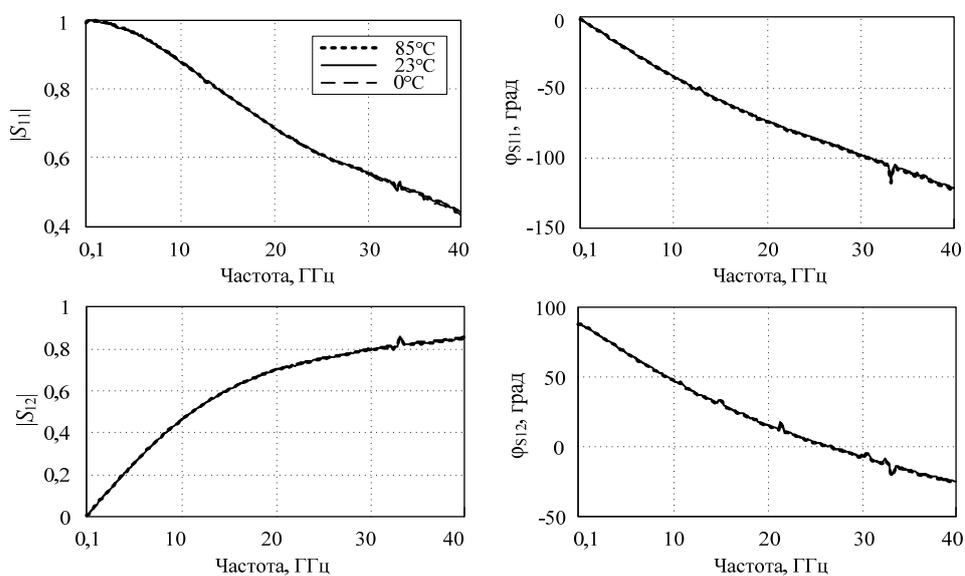


Рис. 4. Частотные зависимости параметров рассеяния МДМ-конденсатора при разных температурах

Очевидно, эти зависимости могут быть аппроксимированы линейным законом

$$P(T) = P(T_0) \cdot [1 + B \cdot (T - T_0)], \quad (1)$$

где B – температурный коэффициент (ТК); T_0 и T – опорная (например, комнатная) и заданная температуры соответственно; $P(T_0)$ и $P(T)$ – значения элемента ЭС при опорной и заданной температуре.

Используя (1), найдем величину ТК GaAs-резистора для технологии ИСВЧПЭ РАН: $B_R = 1,98 \times 10^{-3} \text{ 1/}^\circ\text{C}$. Параметры паразитных элементов ЭС (L и C_{Sub}) от температуры изменяются незначительно, поэтому их ТК можно пренебречь.

Копланарный МДМ-конденсатор. На рис. 4 представлены результаты измерений для копланарного МДМ-конденсатора емкостью 0,075 пФ [2]. Из них видно, что параметры рассеяния МДМ-конденсатора в диапазоне температур от 0 до 85 °С изменяются незначительно, максимальное изменение составляет по модулю 5% и по фазе 2°.

Копланарная спиральная катушка индуктивности. На рис. 5 приведены измеренные S-параметры копланарной квадратной спиральной катушки индуктивности (0,4 нГн). Изменения параметров при вариации температуры также незначительные: 5% по модулю и 3° по фазе.

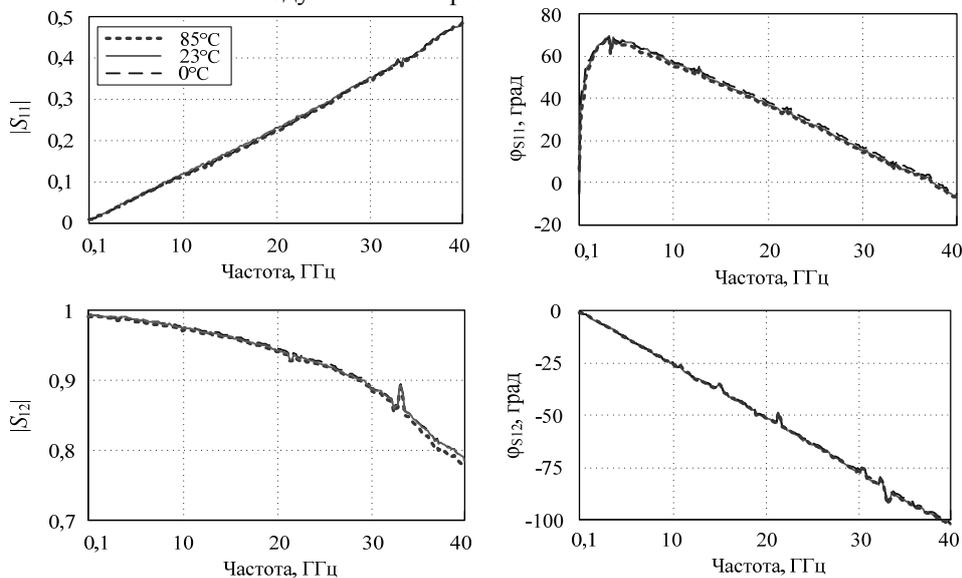


Рис. 5. Частотные зависимости параметров рассеяния спиральной катушки индуктивности при разных температурах

GaAs pHEMT-транзистор. Был исследован транзистор АП399А-5, изготовленный по 0,3 мкм GaAs pHEMT-технологии ОАО «НИИПП» [3]. На рис. 6 представлены результаты измерений S-параметров транзистора при температурах 0, 23 и 85 °С.

Из результатов измерений параметров рассеяния в заданном температурном диапазоне следует, что наибольшему влиянию подвержен коэффициент усиления ($|S_{21}|$). При увеличении температуры от 0 до 85 °С коэффициент усиления транзистора падает на 1 дБ во всем частотном диапазоне.

Для расчета параметров малосигнальной ЭС (рис. 7) транзистора АП399А-5 при температурах 0, 23 и 85 °С воспользуемся программой построения линейных моделей СВЧ полевых транзисторов Extraction-L [5].

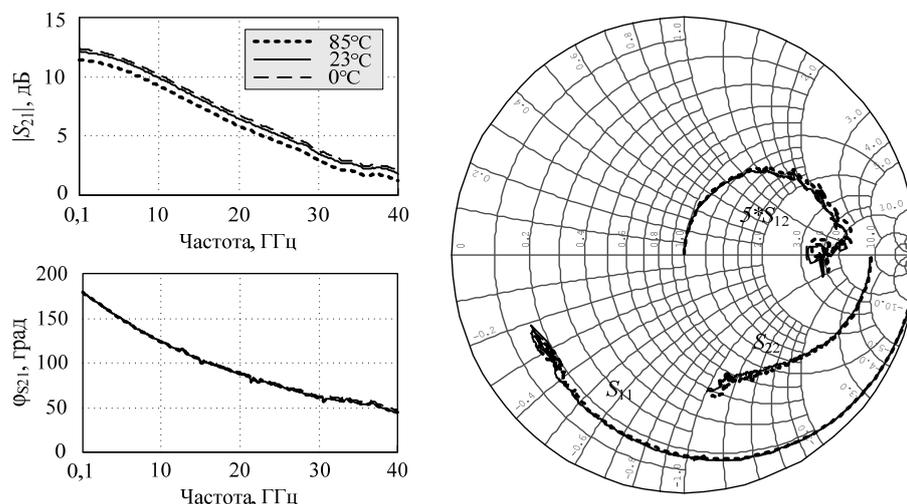


Рис. 6. Частотные зависимости параметров рассеяния транзистора АП399А-5 при разных температурах

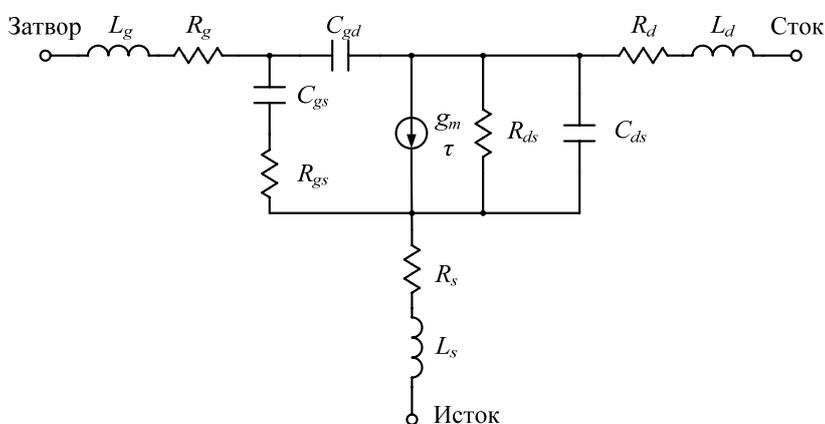


Рис. 7. Малосигнальная ЭС полевого транзистора

ЭС транзистора состоит из внутренней и внешней частей, представляющих сам транзистор и элементы его корпуса. Во внутреннюю часть входят: R_{gs} – сопротивление затвора; C_{gs} – емкость затвор-исток; C_{gd} – емкость затвор-сток; C_{ds} – емкость сток-исток; R_{ds} – сопротивление сток-исток; I_{ds} – источник тока стока, управляемый напряжением затвор-исток; g_m – крутизна; τ – постоянная времени частотной зависимости источника тока. Паразитные элементы внешней части представлены индуктивностями L_g, L_s, L_d и сопротивлениями R_g, R_s, R_d .

Известно, что температурные изменения паразитных элементов внешней части транзистора при экстракции приводят к незначительным изменениям элементов его внутренней части [6]. Поэтому для расчета элементов внешнего транзистора (табл. 1) использовались S -параметры транзистора при комнатной температуре (23 °C).

Таблица 1

Внешние элементы ЭС транзистора АП399А-5

Температура	R_{g_2} , Ом	R_{d_1} , Ом	R_{s_2} , Ом	L_{g_2} , нГн	L_{d_2} , нГн	L_{s_2} , нГн
23°C	1,61	2,45	2,42	0,019	0,0294	0,0045

Для экстракции параметров внутреннего транзистора (табл. 2) использовались малосигнальные S-параметры при температурах 0, 23 и 85 °С, а также найденные значения паразитных элементов ЭС (см. табл. 1).

Таблица 2

Внутренние элементы ЭС транзистора АП399А-5 при разных температурах

Температура, °С	R_{gs} , Ом	C_{gd} , пФ	C_{gs} , пФ	g_m , мСм	τ , пс	R_{ds} , Ом	C_{ds} , пФ
0	7,39	0,0200	0,1849	52,27	0,6248	395,9	0,0388
23	7,40	0,0203	0,1868	50,74	0,6799	398,9	0,0397
85	7,32	0,0206	0,1816	46,19	0,8190	411,6	0,0398

На рис. 8 показаны температурные зависимости параметров ЭС транзистора АП399А-5, которые могут быть аппроксимированы линейным законом (1).

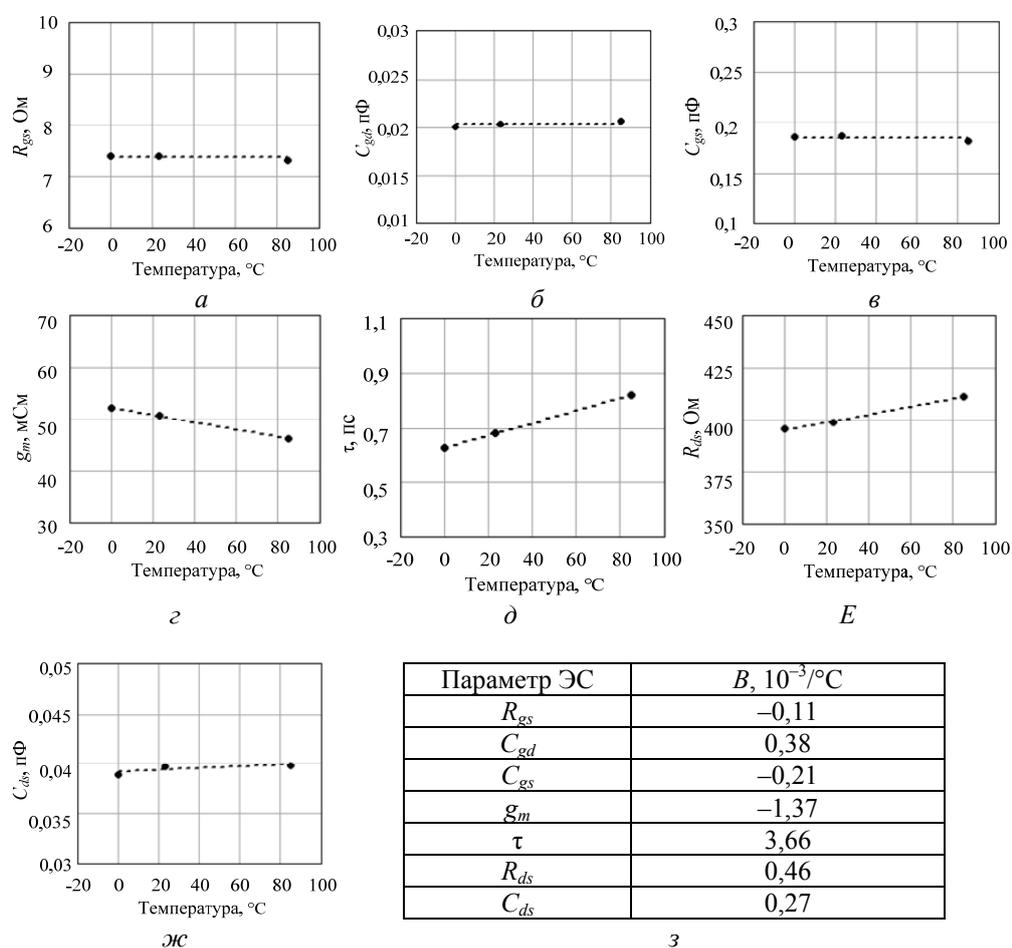


Рис. 8. Температурные зависимости значений элементов ЭС транзистора АП399А-5

Используя выражение (1) и значения параметров ЭС из табл. 2, можно найти ТК для каждого элемента внутренней части транзистора (рис. 8, з).

Из рассчитанных ТК видно, что для исследуемого транзистора наиболее сильному влиянию температуры подвержены параметры g_m , τ и R_{ds} ; для остальных параметров ЭС влияние температуры является незначительным.

Заключение. Результаты, полученные в данной работе, позволяют создавать температурные модели активных и пассивных компонентов СВЧ МИС, изготовленных по отечественным GaAs pHEMT- и mHEMT-технологиям, с целью дальнейшего их использования при проектировании термоустойчивых СВЧ МИС.

Работа выполнялась в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы по направлениям «Создание электронной компонентной базы» (14.740.11.1261), «Микроэлектроника» (П669, П499, 16.740.11.0092, 14.740.11.1136) и «Проведение исследований коллективами НОЦ по направлению «Микроэлектроника» (14.740.11.0135).

Литература

1. Алексеев В.П. Системное проектирование термоустойчивых радиотехнических устройств и систем. Томск: Изд-во Ин-та оптики атмосферы СО РАН, 2004. 316 с.
2. Добуш И.М. Экстракция параметров эквивалентных схем пассивных компонентов СВЧ МИС в копланарном тракте // Наст. сб.
3. СВЧ псевдоморфный транзистор с высокой подвижностью электронов / А.Ю. Ющенко, Г.И. Айзенштат, В.Г. Божков и др. // Доклады ТУСУРа. 2010. № 2(22), ч. 1. С. 59–61.
4. Степачева А.В. Программный модуль для экстракции параметров эквивалентных схем пассивных компонентов СВЧ МИС на основе среды INDESYS-MS / А.В. Степачева, И.М. Добуш. Наст. сб.
5. Программы для автоматизации измерений, деэмбеддинга и построения линейных моделей СВЧ полевых транзисторов / И.М. Добуш, А.В. Степачева, А.С. Сальников и др. // Сб. трудов 21-й Междунар. Крымской конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». 2011. Т. 1. С. 214–215.
6. Anholt R.E. Experimental Investigation of the Temperature Dependence of GaAs FET Equivalent Circuits // IEEE Transactions on Electron Devices. 1992. Vol. 39, № 9. P. 2029–2036.

УДК 658.562

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СРЕДСТВ СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ СВЧ МОНОЛИТНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ

А.С. Сальников, Е.П. Каратаев

Проведен обзор основных средств статистического анализа, используемых для контроля качества при производстве СВЧ монолитных интегральных схем (МИС). Рассмотрены общие принципы организации производства и роль информационных систем при контроле качества. Кратко описаны такие средства статистического анализа, как коэффициенты пригодности, гистограмма, контрольная карта и распределение параметров МИС по подложке.

Ключевые слова: контроль качества, статистический анализ, производство, СВЧ, монолитные интегральные схемы.

Введение. Монолитные интегральные схемы (МИС) СВЧ-диапазона находят всё более широкое применение в современной радиоэлектронной аппаратуре. Задача разработки высококачественных СВЧ МИС является комплексной и

включает вопросы технологии, измерения, моделирования и проектирования. Технология производства МИС должна обеспечивать получение хороших и предсказуемых характеристик электронных компонентов с учетом разброса всех параметров. Большое количество проводимых технологических операций (несколько сотен), каждая из которых оказывает влияние на характеристики конечного устройства, обуславливает необходимость строгого контроля качества. Кроме того, ввиду высокой стоимости оборудования для массового производства СВЧ МИС, для его окупаемости требуется значение выхода годных изделий не ниже 90–95%. Всё это делает задачу контроля технологического процесса крайне важной при изготовлении СВЧ МИС.

Контроль технологического процесса позволяет операторам и инженерам выявлять проблемы на ранней стадии, чтобы свести к минимуму их воздействие. Экономический эффект от использования продуманной системы контроля увеличивается по мере возрастания сложности производственного процесса. Для проведения контроля полупроводникового производства применяют довольно сложное метрологическое оборудование, позволяющее оценивать как параметры материалов и технологических процессов, так и состояние технологических установок.

С точки зрения процесса производства полупроводниковых ИС наиболее важным аспектом качества является то, насколько хорошо получаемые количественные характеристики соответствуют номинальной величине и укладываются ли в указанные допуски. Допуски указываются производителем и учитываются разработчиками при проектировании ИС. Одним из важнейших понятий для совершенствования качества технологии является такая статистическая величина, как среднее квадратичное отклонение. Улучшение качества может быть определено как снижение отклонений в технологических процессах.

Термин «статистический контроль процессов» (СКП) обозначает использование методов математической статистики для контроля технологического процесса и улучшения качества отдельных операций. Собирая информацию об этапах процесса и проводя статистический анализ, инженер способен принять необходимые превентивные меры для того, чтобы процесс оставался управляемым, а продукция удовлетворяла установленным требованиям. СКП включает контроль процессов, выявление отклонений, поиск методов для уменьшения отклонения и их апробацию, оптимизацию технологического процесса, повышение надежности и другие аналитические операции.

Значительные достижения в области контроля качества в полупроводниковом производстве достигаются с использованием возможностей вычислительной техники. Фактически появление высокоавтоматизированного производства интегральных схем (ИС-СІМ) было направлено на повышение эффективности производства схем в той же мере, в которой системы автоматизированного проектирования (САПР) значительно повлияли на их проектирование.

В настоящей статье проведен обзор основных средств статистического анализа, используемых для контроля качества при производстве СВЧ МИС. При обзоре учитывался опыт одного из ведущих производителей МИС СВЧ – компании ОММІС, Франция [1].

Контроль качества на полупроводниковом производстве. Организация полупроводникового производства с высоким выходом годных изделий требует проведения целого ряда мероприятий:

- 1) Организация работы фабрики, управление экономическими процессами.

2) Организация технологического процесса, включая методологию процесса в целом, требования и методики проведения отдельных технологических операций, настройку и использование системы автоматизированного управления (САУ).

3) Контроль технологии. Он включает отслеживание состояния оборудования, параметров отдельных процессов, а также измерение параметров специальных тестовых структур и готовых устройств. Для анализа параметров также привлекаются методы СКП. Мероприятия контроля качества также могут проводиться в автоматическом режиме с использованием САУ.

4) Контроль чистоты производственных помещений, в которых проводятся критические операции (чистых комнат).

5) Контроль исходных материалов, включая подложки и технологические среды.

На входе технологического процесса изготовления ИС имеется полупроводниковая подложка, пригодная для обработки. Весь технологический процесс состоит из большого количества последовательных операций, на которые влияет значительное число параметров. Поэтому для контроля процесса требуется проведение большого количества измерений тестовых модулей.

На выходе технологического процесса получают готовые устройства. В ходе технологических операций могут возникнуть сбои или отклонения от заданных требований. В связи с этим требуется комплекс мероприятий, включающих статистический анализ и межоперационный контроль, а ошибки в технологическом процессе должны быть выявлены и устранены как можно быстрее.

САУ должна обеспечивать ряд возможностей по управлению технологическим процессом. В системе должна присутствовать информация об исходных материалах. Информация о технологическом процессе, измеренных параметрах этого процесса и материалах должна добавляться по мере проведения технологических операций. Выходные данные также должны сохраняться по окончании процесса.

Как правило, для хранения всей информации о ходе процесса используется база данных, содержащая подробную информацию обо всём технологическом процессе. Центральная база данных является ядром САУ и хранит информацию обо всех параметрах проводимых операций и мероприятий. Место базы данных при организации производства полупроводниковых ИС, а также хранящиеся в ней данные показаны на рис. 1.



Рис. 1. Роль базы данных в организации производства полупроводниковых ИС

Для оценки процессов применяются такие основные статистические методы контроля качества, как различные контрольные карты (Шухарта, Парето и другие), анализ пригодности, анализ повторяемости и воспроизводимости, анализ надежности. Также используется набор методик DOE (design of experiments – планирование эксперимента), позволяющих эффективно и быстро провести эксперименты, направленные на повышение надёжности процесса или разработку нового процесса, а также на устранение имеющихся проблем. Применение этих методик позволяет довольно быстро выявить источник отклонения параметров процесса от установленных требований.

Важными качествами эффективной системы СКП являются возможность получения доступа к данным в режиме реального времени, централизованное хранение информации и наличие сетевого программного обеспечения, позволяющего обрабатывать данные и создавать отчеты [2]. Следует отметить, что на современном полупроводниковом производстве важную роль играют надежные информационные системы, охватывающие все производственные аспекты, а разработка и совершенствование таких систем повышают качество выпускаемой продукции.

Рассмотрим основные средства статистического анализа, используемые при производстве полупроводниковых ИС. Статистический контроль процессов основывается на предположении о том, что все измеряемые параметры являются случайными величинами с нормальным распределением. Это положение является следствием того, что на параметры процесса влияет большое число случайных факторов, что в соответствии с центральной предельной теоремой обуславливает нормальный закон распределения контролируемой величины.

Коэффициенты пригодности технологического процесса. Пусть имеется распределение некоторого контролируемого параметра, и оно близко к нормальному. На его основе могут быть рассчитаны коэффициенты пригодности технологического процесса. Введём обозначения LSL (Lower Specification Limit) и USL (Upper Specification Limit) – нижнее и верхнее граничные значения контролируемого параметра. Чтобы оценить стабильность процесса, используются коэффициенты пригодности процесса C_p и C_{pk} (второй из них учитывает возможную асимметрию распределения):

$$C_p = \frac{(USL - LSL)}{6\sigma}; \quad C_{pk} = \min\left(\frac{USL - \bar{x}}{3\sigma}; \frac{\bar{x} - LSL}{3\sigma}\right).$$

Для того чтобы технологический процесс мог обеспечить получение устройств с параметрами в заданном диапазоне, указанные коэффициенты пригодности процесса должны быть больше 1. На современных производствах эти коэффициенты обычно не менее двух.

Гистограмма. Термин «гистограмма» был впервые использован Пирсоном в 1895 г. Гистограммы являются графическими представлениями распределения частот выбранных переменных. Для каждого интервала (либо класса) рисуется столбец, высота которого пропорциональна частоте появления переменных, значения которых попадают в этот интервал (или принадлежащих выбранному классу) [3, 4].

Также при построении гистограммы полезно производить расчет и вывод на график среднего значения (\bar{x}), среднеквадратичного отклонения (σ), а также плотности вероятности нормального распределения непрерывной величины (гауссиана), которые рассчитываются по следующим формулам соответственно [4]:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i; \quad \sigma = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}; \quad f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}},$$

где n – количество элементов в выборке. Для расчета количества интервалов гистограммы можно воспользоваться формулой [5]

$$N = 1 + 3,322 \lg n,$$

где N – количество интервалов гистограммы.

Пример построения гистограммы с помощью программы статистического анализа Statistics в составе системы INDESYS-MS [6] приведён на рис. 2. На графике показано распределение граничной частоты гетероструктурного транзистора f_T , а также среднее значение и границы отклонения параметра от среднего значения на величину 3σ .

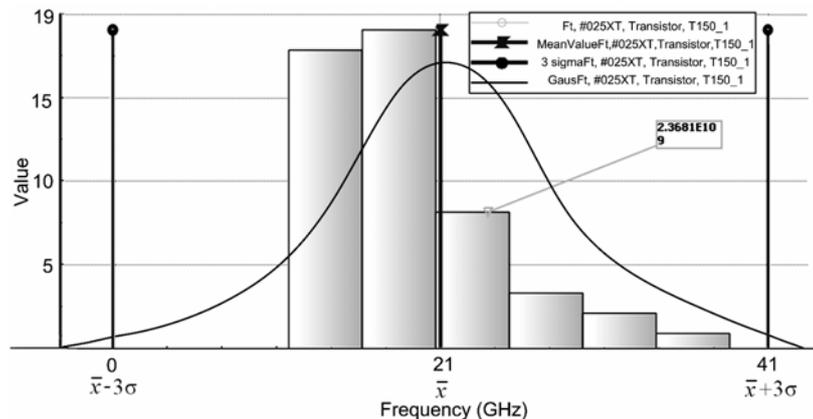


Рис. 2. Пример построения гистограммы

Контрольная карта. Наиболее распространённым инструментом статистического контроля являются различные виды контрольных карт. Контрольная карта, или карта Шухарта, – это график значений контролируемого параметра некоторого изделия в зависимости от порядкового номера изделия. Она имеет центральную линию (ЦЛ), соответствующую эталонному значению характеристики. При оценке того, находится ли процесс в статистически управляемом состоянии, эталонным обычно служит среднее арифметическое рассматриваемых данных. При управлении процессом эталонным служит долговременное значение характеристики, установленное в технических условиях, или ее номинальное значение, основанное на предыдущей информации о процессе, или намеченное целевое значение характеристики продукции или услуги. Карта Шухарта имеет две статистически определяемые контрольные границы относительно центральной линии, которые называются верхней контрольной границей (ВКГ) и нижней контрольной границей (НКГ).

Классификация типов контрольных карт часто осуществляется согласно типам величин, которые выбраны для отслеживания характеристик качества. Так, различают контрольные карты для непрерывных переменных (количественная характеристика) и контрольные карты по альтернативному признаку (качественная характеристика). В частности, для контроля по непрерывному признаку обычно строятся следующие контрольные карты.

\bar{X} -карта. На эту контрольную карту наносятся средние значения контролируемого параметра для того, чтобы контролировать отклонение от среднего значения непрерывной переменной.

R-карта. Для контроля за степенью изменчивости непрерывной величины в контрольной карте этого типа строятся значения размахов выборок.

S-карта. Для контроля за степенью изменчивости непрерывной переменной в контрольной карте данного типа рассматриваются значения выборочных стандартных отклонений.

Все типы карт допускают возможность построения кратких карт для производственных серий (краткие контрольные карты) и контрольных карт для нескольких процессов (многопоточные групповые карты) [3, 7].

Для контроля качества измеренных характеристик наиболее пригодны контрольные карты, используемые для количественных данных. Количественные данные представляют собой наблюдения, полученные с помощью измерения и записи значений некоторой характеристики для каждой единицы, рассматриваемой в подгруппе, например длина в метрах, сопротивление в омах, шум в децибелах и т.д. Карты для количественных данных и особенно простейшие из них (\bar{X} - и R-карты) – это классические контрольные карты, применяемые для управления процессами.

Для большей наглядности иногда контрольную карту делят на несколько зон по степени отдалённости от центральной линии. Каждая зона соответствует расстоянию от центральной линии, кратной среднеквадратичному отклонению. Обозначения границ и зон приведено на рис. 3. ВКГ и НКГ установлены на расстоянии 3σ над и под ЦЛ. Для удобства контрольная карта делится на шесть равных зон шириной σ . Эти зоны обозначаются А, В, С, С, В, А, причем зоны С расположены симметрично ЦЛ.

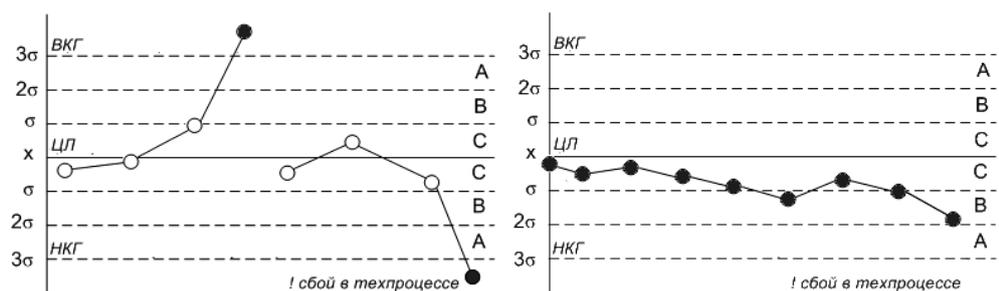


Рис. 3. Примеры контрольных карт потенциально нестабильных процессов

Карты для количественных данных отражают состояние процесса через разброс (изменчивость от единицы к единице) и через расположение центра (среднее процесса). Поэтому контрольные карты для количественных данных почти всегда применяют и анализируют парами – одна карта для расположения и одна – для разброса. Наиболее часто используют пару – \bar{X} - и R -карту. В государственном стандарте [8] приведены формулы расчёта контрольных границ для соответствующих карт.

Для интерпретации хода процесса по картам Шухарта существуют определённые критерии. Различные организации по стандартизации могут предлагать несколько различных наборов критериев, но в целом они схожи между собой. Набор критериев можно принять за основу, но пользователи должны обращать

внимание на любую необычную структуру точек, которая может указывать на проявление особых (неслучайных) причин. Поэтому эти критерии следует рассматривать только как примеры ситуаций, когда может быть установлено проявление неслучайных причин. Появление любого из случаев, описанных в этих критериях, – указание на присутствие особых причин, которые должны быть проанализированы и скорректированы. Государственный стандарт [8] также описывает восемь рекомендуемых критериев, два из которых приведены на рис. 3. Критерий на рис. 3, а соответствует отклонению параметра на величину, большую 3σ от среднего значения; рис. 3, б показывает случай, когда некоторое количество точек (в ГОСТ – девять точек) подряд находится по одну сторону от ЦЛ, что может свидетельствовать об изменении среднего значения.

Распределение параметров ИС по подложке. Рассмотренные выше карты Шухарта относятся к временному распределению наблюдаемой величины. Однако в полупроводниковой промышленности довольно большое число одинаковых элементов (например, несколько тысяч одинаковых кристаллов ИС) изготавливается на одной пластине одновременно. При этом обработке подвергается вся пластина целиком. Из-за возможности нестабильности некоторых технологических операций физические свойства обрабатываемой поверхности или наносимого материала могут оказаться неоднородными (например, могут возникнуть градиент температуры, неодинаковая толщина наносимого резиста, различная скорость травления и т.п.). Без сомнения, такие явления нежелательны, и производительное оборудование постоянно совершенствуется для устранения подобных дефектов. Однако как при отладке нового процесса, так и при поломке оборудования указанные явления могут всё же проявиться. Поэтому целесообразно проводить не только временной контроль параметров от одной пластины к другой, но и контроль пространственного распределения параметров ИС внутри одной пластины.

Простейший и эффективный метод, который может быть предложен для проведения анализа пространственного распределения, – это визуализация распределения исследуемого параметра ИС по подложке. Для этой цели используется специальный вид пространственного графика – «Подложка». Он представляет собой круговое поле пластины, на которой размещены квадраты, соответствующие измеренным элементам (кристаллам ИС). Для каждого элемента определенным образом (например, цифрами, цветом и т.д.) отмечается значение исследуемого параметра. В результате график наглядно показывает распределение значений

параметра ИС в пределах пластины, по нему можно сделать вывод о качестве и однородности технологического процесса.

Пример построения пространственного распределения по подложке граничной частоты f_T гетероструктурного транзистора с помощью программы статистического анализа Statistics в составе системы INDESYS-MS [6] приведён на рис. 4.

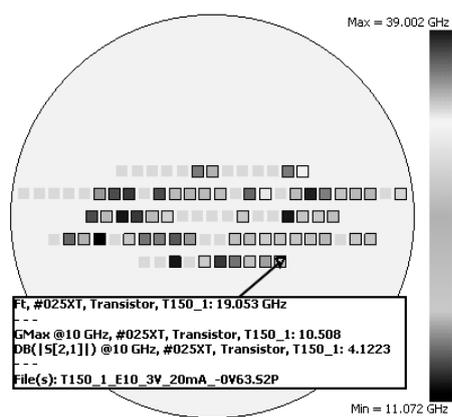


Рис. 4. Пространственное распределение по подложке параметра f_T транзистора с цветовой индикацией

Заключение. В обзоре рассмотрены основные средства статистического контроля процессов, используемые в полупроводниковом производстве. Современные системы контроля качества опираются на эти средства при привлечении аппарата математической статистики. При этом, как правило, средства контроля комбинируются и встраиваются в систему автоматизированного управления на предприятии-изготовителе ИС. Комплексное решение задач контроля качества является неотъемлемой частью организационного процесса на предприятии.

Литература

1. Официальный сайт компании OMMIC [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.ommic.com/>, свободный доступ (дата обращения: 01.09.2011).
2. Статистический контроль процессов (SPC) [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.statsoft.ru/home/portal/glossary/glossarytwo/S%5CStatisticalProcessControlSPC.htm>, свободный доступ (дата обращения: 20.02.2011).
3. Электронный учебник компании StatSoft : Контроль качества [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.statsoft.ru/home/textbook/default.htm>, свободный доступ (дата обращения: 14.04.2011).
4. Вентцель Е. С. Теория вероятностей: Учеб. для вузов. М.: Высшая школа, 1999. 575 с.
5. Гистограмма // Инструменты качества [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.tools-quality.ru/index.php/q7/histogram>, свободный доступ (дата обращения: 05.02.2011).
6. Программы для хранения и статистического анализа результатов измерений СВЧ монолитных интегральных схем / А.С. Сальников, Е.П. Каратаев, И.М. Добуш // Сб. трудов 21-й Междунар. Крымской конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». 2011. Т. 1. С. 212–213.
7. May G. Fundamentals of semiconductor manufacturing and process control / G. May, C. Spanos. Hoboken : John Wiley & Sons, Inc, 2006. 481 p.
8. ГОСТ Р 50779.42–99. Статистические методы. Контрольные карты Шухарта. Введ. 2000-01-01. М.: Изд-во стандартов, 1999. 37 с.

УДК 621.317

ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МАТЕРИАЛОВ С ПОМОЩЬЮ ТЕСТОВЫХ СТРУКТУР ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ГЕТЕРОСТРУКТУРНЫХ СВЧ МИС

А.С. Сальников, А.Ю. Ющенко

Описаны тестовые структуры для контроля электрофизических параметров СВЧ монолитных интегральных схем (МИС), выполняемых по отечественной гетероструктурной GaAs рНЕМТ-технологии. Приведены результаты экспериментального измерения с помощью этих структур ряда параметров МИС – поверхностного сопротивления и ухода размеров полупроводникового слоя, сопротивления омического контакта, поверхностного сопротивления слоев металлизации.

Ключевые слова: СВЧ монолитные интегральные схемы, электрофизические параметры материалов, зондовые измерения, контроль качества.

Введение. Задача контроля качества занимает крайне важное место при промышленном изготовлении СВЧ монолитных интегральных схем (МИС), так как

высокий выход годных изделий снижает издержки производства. Подобный контроль выполняется на основе математических методов статистического анализа [1]. Одной из важнейших задач, в частности, является контроль качества технологических процессов изготовления МИС. Для его осуществления широко применяются специальные тестовые модули (в англоязычной литературе РСМ – process control monitor, структуры для контроля технологического процесса). Указанные модули содержат несколько тестовых структур, включающих как функциональные элементы МИС, так и структуры для оценки электрофизических характеристик материалов.

В статье описаны тестовые структуры, разработанные для контроля СВЧ МИС, изготавливаемых по 0,3 мкм GaAs рНЕМТ-технологии Научно-исследовательского института полупроводниковых приборов (г. Томск). Приведены результаты зондовых измерений с помощью этих структур ряда электрофизических параметров материалов.

Общее описание тестовых структур. Конструкции и принципы использования тестовых структур, а также методики измерений с их помощью электрофизических параметров материалов приведены в [2]. Краткое перечисление разработанных структур и используемых методов измерения представлено в табл. 1.

Таблица 1

Тестовые структуры для контроля параметров материалов

Наименование структуры	Контролируемые параметры	Метод измерения
VDPWC	– Удельное поверхностное сопротивление R_S ; – уход размеров	Метод Ван дер Пау, четырёхзондовый метод измерения сопротивления
СВКР	– Сопротивление омических контактов; – сопротивление между слоями металлизации	Четырёхзондовый метод измерения сопротивления
GCME	Сопротивление первого уровня металлизации	Четырёхзондовый метод измерения сопротивления
GCTPM	Сопротивление второго уровня металлизации	Четырёхзондовый метод измерения сопротивления

После разработки фотошаблонов тестовые структуры были изготовлены на пластинах совместно с другими типами элементов СВЧ МИС в рамках одного технологического процесса. Это позволяет измерять электрофизические параметры материалов на конкретной пластине и сопоставлять данные с результатами испытаний других элементов и приборов на этой же пластине.

Далее приведены фотографии тестовых структур, а также результаты измерений на их основе параметров материалов для 0,3 мкм GaAs рНЕМТ-технологии НИИПП. Все измерения выполнялись непосредственно на полупроводниковой пластине с использованием зондовой станции.

Тестовая структура VDPWC. Внешний вид тестовой структуры VDPWC (Van der Pauw / Width Control) показан на рис. 1. Такая структура предназначена для измерения поверхностного сопротивления активного полупроводникового слоя R_S , а также оценки ухода размеров ΔW мезаструктуры в процессе технологических операций по сравнению с размером на фотошаблоне. Для измерения поверхностного сопротивления используется метод Ван дер Пау. Для оценки уxo-

да размеров измеряется сопротивление полупроводникового резистора с известной длиной.

Измерения структуры проводились на пластине с помощью зондов постоянного тока (последние применяются для подачи напряжения и измерения тока). В соответствии с методом Ван дер Пау сначала определяется сопротивление R_{meas} :

$$R_{\text{meas}} = \frac{V_{23}}{I_{14}}, \quad (1)$$

где V_{23} – напряжение между площадками 2 и 3, I_{14} – ток, протекающий между площадками 1 и 4.

Затем рассчитывается поверхностное сопротивление R_S :

$$R_S = \frac{\pi R_{\text{meas}}}{\ln 2}. \quad (2)$$

Для оценки ухода размеров сопротивление прямоугольного резистора в активном слое R_{res} измерялось четырехзондовым методом.

Уход размеров по сравнению с фотошаблоном ΔW рассчитывается по формуле

$$\Delta W = W_{\text{reticle}} - W_{\text{meas}} = W_{\text{reticle}} - \frac{R_S L}{R_{\text{res}}}, \quad (3)$$

где W_{reticle} – размер на фотошаблоне; W_{meas} – измеренный размер; L – длина резистора.

Измерения поверхностного сопротивления R_S были проведены для пяти тестовых модулей, расположенных в разных областях пластины. Результаты представлены в табл. 2 и на гистограмме (рис. 2).

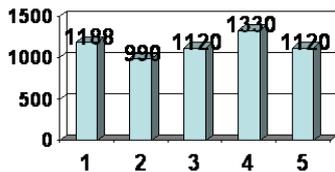


Рис. 2. Значения поверхностного сопротивления R_S для пяти тестовых модулей

По этим данным находим: среднее значение поверхностного сопротивления по пластине $R_S = 1100$ Ом/□; среднеквадратичное отклонение R_S по пластине $\sigma(R_S) = 130$ Ом/□.

Теперь, зная значение R_S , вычислим уход размеров ΔW для всех пяти тестовых модулей. Результаты вычислений приведены в табл. 3 и на рис. 3.

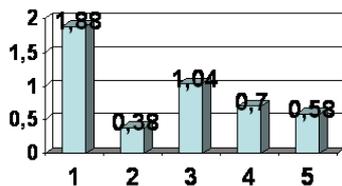


Рис. 3. Значения ухода размеров ΔW для пяти тестовых модулей

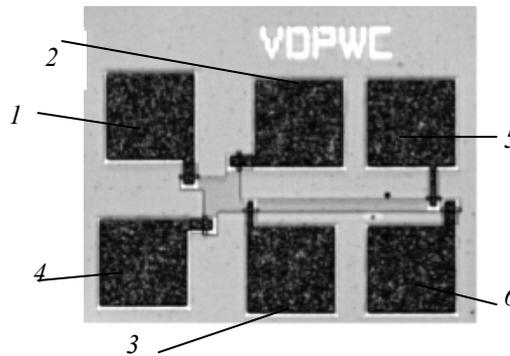


Рис. 1. Фотография структуры VDPWC

Таблица 2

Значения поверхностного сопротивления R_S для разных тестовых модулей

Номер теста	1	2	3	4	5
R_S , Ом/□	1188	990	1120	1330	1120
$\sigma(R_S)$, Ом/□	25	110	25	70	220

Таблица 3

Значения ухода размеров ΔW для разных тестовых модулей

Номер теста	1	2	3	4	5
ΔW , мкм	1,88	0,38	1,04	0,70	0,58

Среднее значение ухода размеров по пластине $\Delta W = 0,9$ мкм, среднее отклонение этого параметра по пластине $\sigma(\Delta W) = 0,6$ мкм.

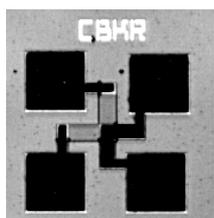


Рис. 4. Фотография структуры СВКР

Тестовая структура СВКР. Фотография структуры СВКР (Cross Bridge Kelvin Resistor) представлена на рис. 4. Данная структура предназначена для измерения приведенного контактного сопротивления омических контактов ρ_C четырехзондовым методом.

После измерений напряжения и тока значение сопротивления омического контакта R_{contact} было определено по формуле (1), а затем пересчитано в приведенное контактное сопротивление ρ_C [Ом·см²] в соответствии с соотношением:

$$R_{\text{contact}} = \rho_C \cdot S_C, \quad (4)$$

где S_C – площадь контакта.

Результаты вычислений ρ_C для пяти тестовых модулей, расположенных в разных областях пластины, представлены в табл. 4 и на рис. 5.

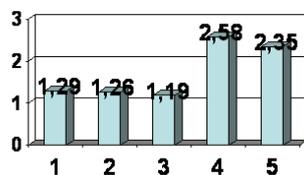


Рис. 5. Значения приведенного контактного сопротивления ($\rho_C \cdot 10^{-5}$) для пяти тестовых модулей

Таблица 4
Значения приведенного контактного сопротивления ρ_C для разных тестовых модулей

Номер теста	1	2	3	4	5
$\rho_C \cdot 10^{-5}$, Ом·см ²	1,29	1,26	1,19	2,58	2,35
$\sigma(\rho_C) \cdot 10^{-5}$, Ом·см ²	0,09	0,51	0,15	0,07	0,06

Среднее значение приведенного контактного сопротивления по пластине $\rho_C = 1,73 \cdot 10^{-5}$ Ом·см², среднее отклонение $\sigma(\rho_C) = 0,67 \cdot 10^{-5}$ Ом·см².

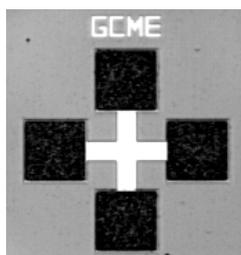


Рис. 6. Фотография структуры GCME

Тестовая структура GCME. Фотография структуры GCME (Greek Cross of Metal) изображена на рис. 6. Структура предназначена для измерения поверхностного сопротивления металлизации первого уровня («тонкой» металлизации) $R_{S\text{ME}}$. Как и в предыдущих структурах, для измерения малого сопротивления металлизированной области используется четырехзондовый метод.

После измерений тока и напряжения по формуле (1) определялось сопротивление R_{meas} , далее с использованием (2) рассчитывалось поверхностное сопротивление металлизации первого уровня. Результаты расчета для разных тестовых модулей на пластине приведены в табл. 5 и на рис. 7.

Таблица 5
Значения сопротивления металлизации первого уровня $R_{S\text{ME}}$ для разных тестовых модулей

Номер теста	1	2	3	4	5
$R_{S\text{ME}}$, Ом/□	0,042838	0,047649	0,054546	0,046844	0,037824

Среднее значение параметра по пластине $R_{S\text{ME}} = 0,046$ Ом/□, среднее отклонение $\sigma(R_{S\text{ME}}) = 0,006$ Ом/□.

Тестовая структура GCTPM. Фотография структуры GCTPM (Greek Cross of Thick Plated Metal) представлена на рис. 8. Эта структура предназначена для

измерения поверхностного сопротивления второго уровня металлизации $R_{S\text{ TP}}$, выращенного методом электрохимического осаждения (толщина 2–3 мкм). Для снижения потерь в полосковых линиях сопротивление металлизированной области должно быть минимальным, его измерение осуществляется четырехзондовым методом.

Как и ранее, вначале с помощью (1) определяется сопротивление R_{meas} , затем на основе (2) рассчитывается сопротивление $R_{S\text{ TP}}$. Его значения для разных тестовых модулей на пластине представлены в табл. 6 и на рис. 9.

Среднее значение сопротивления по пластине $R_{S\text{ TP}} = 0,0053 \text{ Ом/}\square$, среднее отклонение $\sigma(R_{S\text{ TP}}) = 0,0001 \text{ Ом/}\square$.

Таблица 6
Значения сопротивления металлизации первого уровня $R_{S\text{ ME}}$ для разных тестовых модулей

Номер теста	1	2	3	4	5
$R_{S\text{ ME}}$, Ом/□	0,005187	0,005411	0,005130	0,005455	0,005294

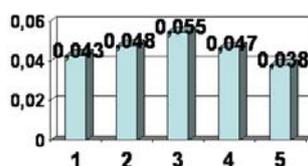


Рис. 7. Значения сопротивления металлизации первого уровня $R_{S\text{ ME}}$ для пяти тестовых модулей

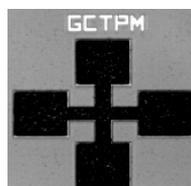


Рис. 8. Фотография структуры GCTPM

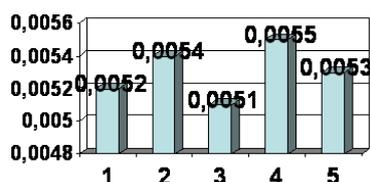


Рис. 9. Значения сопротивления металлизации второго уровня $R_{S\text{ TP}}$ для пяти тестовых модулей

Заключение. В статье описаны тестовые структуры для контроля СВЧ МИС, выполняемых по 0,3 мкм GaAs pHEMT-технологии НИИПП. Приведены результаты экспериментального измерения с помощью этих структур ряда электрофизических параметров материалов. Все тестовые структуры, за исключением используемых для определения малых значений сопротивления (порядка 10^{-5} Ом), показали удовлетворительную точность измерения (относительная ошибка не более 20%). Это доказывает возможность использования разработанных тестовых структур для контроля качества в технологическом процессе изготовления МИС.

Следует также отметить, что тесты показали разброс измеряемых параметров по пластине от 1 до 20%. Такой уровень разброса параметров может быть приемлемым в опытной технологии, но в будущем, несомненно, процесс должен быть более стабильным.

Работа выполнялась в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы по направлениям «Создание электронной компонентной базы» (14.740.11.1261), «Микроэлектроника» (П669, П499, 16.740.11.0092, 14.740.11.1136) и «Проведение исследований коллективами НОЦ по направлению «Микроэлектроника» (14.740.11.0135).

Литература

1. Статистический контроль процессов (SPC) [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.statsoft.ru/home/portal/glossary/glossarytwo/S%5CStatisticalProcessControlSPC.htm>, свободный доступ (дата обращения: 20.02.2011).
2. Разработка и апробация методик измерения электрофизических параметров наногетероструктур, изготовленных по отечественным технологиям на базе GaAs: Отчёт о НИР (промежуточ.): 1 этап / ТУСУР; рук. А.Ю. Ющенко Томск, 2010. 47 с. №ГР 01201060544.

УДК 621.382.02

**ФОРМИРОВАНИЕ ПЛЕНОК ЛЕГКОПЛАВКИХ МЕТАЛЛОВ
НА НИОБАТЕ ЛИТИЯ**

Л.Н. Орликов, С.И. Арестов, С.М. Шандаров

Рассматривается формирование пленок в вакууме на основе молекулярной и динамической модели испарения материалов. Показано, что учет изменения температуры пара в динамической модели позволяет формировать пленки легкоплавких металлов на малых расстояниях от испарителя до подложки.

Ключевые слова: поток пара, функции изменения параметров потока, плазма.

Введение. Электронные приборы на базе пьезоэлектриков типа ниобата лития реализуют ряд электронно-оптических эффектов, не наблюдаемых в приборах традиционной микроэлектроники. Для оптической активности приборов на ниобат лития наносят пленки легкоплавких металлов (цинк, свинец, галлий и др.). Наибольший прогресс достигнут при формировании пленочных слоев путем испарения материалов в вакууме или ионными методами.

Суть проблемы. Формирование пленок из легкоплавких материалов в вакууме отличается вероятностной повторяемостью, вследствие недостаточной изученности условий конденсации паров легкоплавких металлов на подложках. При изменении рода материала, взаимного расположения испарителя и подложки или давления известная модель Кнудсена [1] для испарения материалов в вакууме испытывает затруднения при объяснении и моделировании процесса. Известна гидродинамическая модель описания формирования потока пара [2–4]. В основе теории лежит изменение формы, давления и температуры потока от перепада давления между давлением испарения ($P_J \sim 1$ Па) и давлением в вакуумной камере. Однако границы применимости обеих моделей условны, что препятствует прогнозу и моделированию закона распределения толщины пленки.

Метод решения. Предлагается визуализировать поток пара и на основе визуализации определить приоритетную модель формирования потока. Качество пленок и адгезия могут быть улучшены за счет уменьшения количества газа в кристалле, за счет формирования пленки из материала электродов, а также за счет применения многозарядных ионов для синтеза пленок.

Проведенные исследования

1. Визуализация испаряемого потока пара.

Визуализация потока пара (свинец, цинк) проводилась на типовой установке УВН-2М в плазме тлеющего разряда (600 В; 0,5 А). На рис. 1, а представлены форма потока и его размеры для различных давлений P_k в вакуумной камере. На рис. 1, б приведены расчетные данные по изменению температуры в потоке пара свинца (T) к температуре (T^*) в вакуумной камере.

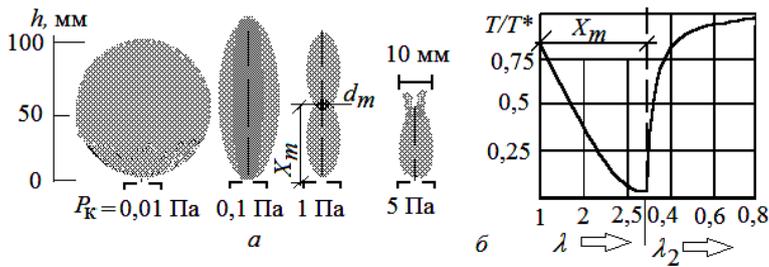


Рис. 1. Форма и размеры потока пара свинца (а); б – расчетное изменение температуры в потоке пара от коэффициента скорости потока пара

Установлено, что при уменьшении давления в камере ($P_k < 5$ Па), поток пара формируется по гидродинамической модели [3] в виде одного или двух факелов (циклов). При ($P_j/P_k > 250$) расширение пара переходит к истечению в виде шара к модели Кнудсена. Протяженность X_m первого цикла расширения описывается выражением

$$X_m = (0,7 - 1,34)d(kP_j/P_k)^{0,5}, \quad (1)$$

где d – диаметр отверстия истечения пара на тигле; P_j , P_k – давления на срезе тигля и в пространстве испарения; $k = 1,3$ – показатель адиабаты для пара.

Максимальный диаметр потока d_m на уровне первого цикла расширения (в области относительного постоянства параметров) описывается выражением

$$d_m = d(kP_j/P_k)^{0,5}. \quad (2)$$

При небольших отношениях давления испарения к давлению в вакуумной камере ($P_j/P_k < 250$) функция распределения температуры в потоке пара $\tau(\lambda)$ описывается выражением [3]

$$\tau(\lambda) = [1 - \lambda^2(k-1)/(k+1)]; \quad (3)$$

где λ – коэффициент скорости потока. При $\lambda = 0$ поток неподвижен; при $\lambda = 1$ в потоке достигается скорость звука; при $\lambda > 1$ достигается сверхзвуковая скорость. За первым циклом расширения скорость потока уменьшается и определяется соотношением:

$$\lambda_2 = 1/\lambda. \quad (4)$$

Функция изменения давления в потоке пара описывается выражением [3]:

$$\pi(\lambda) = \tau(\lambda)^{k/(k-1)}. \quad (5)$$

Из рис. 1, б видно, что температура движущегося потока пара может быть меньше температуры подложки. Это приведет к уменьшению коэффициента конденсации «холодного» пара на «горячей» подложке. В таблице приведены некоторые значения параметров потока пара [3].

Некоторые параметры потока пара

P_j/P_k	1	0,528	10,0	100,00
λ	0	1,000	1,5	2,14
$\tau(\lambda)$	1	0,860	0,5	0,30
$\pi(\lambda)$	1	0,700	0,4	0,20

Таким образом, по отношению давления на срезе тигля к давлению в камере P_j/P_k определяются модель для расчета толщины пленки, коэффициент скорости потока λ и изменение температуры потока.

Для описанного эксперимента $P_j = 1$ Па; $P_k = 0,01$ Па; $d = 5$ мм; $P_j/P_k = 100$; $\lambda = 2,14$; $\tau(\lambda) = 0,3$.

Качественное представление о составе пленки может дать изобарный потенциал ΔZ , определяемый универсальной газовой постоянной R и парциальным давлением паров P_i [1]:

$$\Delta Z = -RT \ln P_i. \quad (6)$$

С учетом функций изменения температуры и давления изобарный потенциал выразится:

$$\Delta Z = f(R \cdot T \cdot P_i) = f(R \cdot \tau(\lambda) \cdot \pi(\lambda)). \quad (7)$$

Из таблицы видно, что $\tau(\lambda) \approx \pi(\lambda)$.

Тогда выражение (7) преобразуется к виду:

$$\Delta Z = f(R \cdot \tau^2(\lambda)). \quad (8)$$

Из этого следует важный вывод, что изменение изобарного потенциала пропорционально квадрату функции изменения локальной температуры возле подложки. При локальном изменении температуры это свидетельствует о локальном характере формирования определенного соединения в пленке.

2. Подготовка кристаллов для формирования пленок. Анализ пленок на микроскопе МИМ-7 показал наличие вздутий под пленкой вследствие выделения газа из кристалла, что негативно влияет на адгезию. Для отбора кристаллов с минимальным выделением газов они помещались в поток плазмы. Используется методика [6] определения глубины залегания газов в материале. Суть методики в измерении потока газа при нагреве образца. В данном случае степень обезгаживания оценивалась по интенсивности спектра излучения плазмы. В качестве индикатора выделения газа использовался монохроматор ДМР-4. Кристаллы устанавливаются на мишень, находящуюся напротив смотрового окна вакуумной установки. В отверстии пересечения лучей расположено фотосопротивление ФСК-1. Область спектральной чувствительности фотосопротивления относительно линейна в оптическом спектре. Ток с фотосопротивления оценивается микроамперметром.

При давлении 2 Па на мишень подается отрицательный потенциал (-800 В). В системе возбуждается тлеющий разряд током 40 мА. Монохроматор настраивается на голубую длину волны 480 нм. После выделения газа из кристалла спектр свечения плазмы становится оранжевым, а величина фототока возрастает. В итоге выработаны рекомендации по хранению кристаллов. Цвет излучения и длина волны качественно оценивались также по цветовому треугольнику атласа DIN МКО, 31 [7].

3. Формирование пленок на малых расстояниях до подложки при термическом испарении материалов в вакууме. С целью уменьшения расхода химически чистых материалов, испарение проводится на малых расстояниях от подложки. Однако при этом в зависимости от размеров подложки, давления в камере и температуры испарения меняется закономерность в изменении толщины пленки. На рис. 2 представлена схема, объясняющая изменение локальной толщины пленки свинца при термическом испарении на подложку различной

длины L . Средняя толщина пленки δ по данным лазерных измерений [5] составляет 0,5 мкм.

Влияние размеров подложки. Вследствие наличия держателей картина обтекания подложки L (1–3) соответствует модели обтекания плоской преграды в околосзвуковом потоке.

Влияние давления в камере. С приближением давления в камере к давлению испарения (4–6), форма истечения потока переходит от сферической к струйной.

Влияние расстояния. По мере удаления от среза испарения (7–9), форма потока пара переходит от режима сильного отражения к режиму свободного истечения.

Параметрическое управление законом формирования толщины пленки. Изменение общей температуры испарения (10–12) эквивалентно изменению отношения давления испарения к давлению в вакуумной камере.

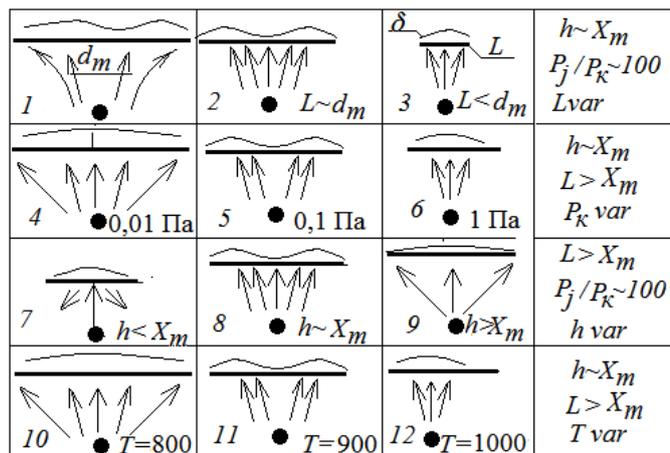


Рис. 2. Схема истечения и взаимодействия потока пара с подложкой

Геометрическое управление законом изменения толщины. При срезе тигля под углом возникает локальный градиент давления из-за неравномерности условий расширения потока. Это вызывает отклонение потока. Вариация геометрического и параметрического управления позволяет формировать пленки на малых расстояниях от испарителя до подложки с приемлемой равномерностью.

Из проведенных исследований следует, что относительное постоянство параметров достигается при расстоянии, большем десяти диаметров среза тигля, т.е. $h \approx X_m \approx 10 d$. В итоге получены пленки цинка толщиной 0,5 мкм на расстоянии 39 мм от тигля, пригодные для использования в технологии получения оптически активных оксидных покрытий.

4. Формирование пленки из материала электродов, испаряемых в дуговом разряде

Дуговой разряд в вакууме широко применяется для формирования пленок [8]. Однако локализация катодного пятна и локальный перегрев электродов провоцируют неустойчивое формирование разряда и испарение в виде капель (брызговой эффект). Вследствие этого применение электродугового формирования покрытий ограничивается упрочняющими или декоративными покрытиями.

Предлагается формировать пленки в условиях несамостоятельного вакуумного дугового разряда при минимальных токах дуги. Для инициирования и поддержки дуги предлагается использовать плазму электронного пучка. Для увеличения массопереноса предлагается использовать режим термического испарения материала из теплоизолированного катода.

На рис. 3 представлена схема реализации метода формирования покрытий из дугового разряда.

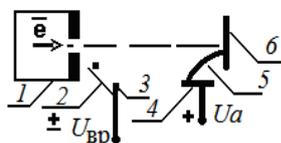


Рис. 3. Схема электродугового формирования покрытий с теплоизолированным катодом: 1 – источник электронов; 2 – подложка; 3 – кольцевой электрод; 4 – анод; 5 – дуга; 6 – теплоизолированный катод

При обеспечении в вакуумной камере давления 0,01 Па включается источник электронов (15 кВ; 10 мА). В течение 2–3 мин происходит разогрев теплоизолированного дугового катода 6. При подаче напряжения на дуговые электроды 4, 6 возникает диффузный дуговой разряд током до 5 А при напряжении $U_a \sim 50$ В. Увеличение плотности тока более $0,2 \text{ А/см}^2$ приводит к возрастанию напряжения горения разряда и переходу к аномальному тлеющему разряду, горящему в парах металла без дополнительного источника электронов. Скорость формирования пленки (свинец толщиной 0,5 мкм) составляет 0,01 мкм/с. При положительной полярности вспомогательного разряда ($U_{вр} \sim 100$ В), проводится ионная очистка или травление подложки. При отрицательной полярности производится нагрев подложки электронами.

Лазерные измерения толщины пленки показали отсутствие капельной фракции при равномерности толщины менее 2%. Адгезия пленки на отрыв на стекле составляет 10 кг/см^2 .

5. Формирование окисных пленок цинка с использованием многозарядных ионов. Многозарядные ионы, благодаря высокой ионизационной способности, широко применяются для стимулирования поверхностных реакций [9]. Интенсификация ионно-плазменного синтеза наблюдается при повышении концентрации и зарядности ионов, при уменьшении ускоряющего напряжения. В известных ионных источниках велика роль ударной ионизации электронами для развития электронной лавины разряда (коэффициент ударной объемной ионизации достигает $\alpha = 20\text{--}30$). В этом случае основными компонентами, облучающими кристалл, являются однозарядные ионы, электроны второго полупериода разряда ударной емкости, вторичные электроны, нейтральные молекулы. Однако только многозарядные ионы увеличивают функцию взаимодействия частиц за счет малой скорости иона ($V_i \sim 10^5 \text{ м/с}$) и энергии $W = ZgU$, пропорциональной кратности заряда $Z = g/e$. (Кратность заряда – отношение заряда иона g к заряду электрона). Многозарядные ионы даже в небольшой концентрации ($\sim 10\%$ от однозарядных) повышают коэффициент поверхностной диффузии, энергию активации образования химических соединений.

Для повышения концентрации многозарядных ионов используется эффект генерации многозарядных ионов при наложении крутого фронта изменения тока на стационарный низковольтный дуговой разряд. Для обеспечения зажигания дуги при малом напряжении используется поток электронов. На рис. 4, а представлена схема источника многозарядных ионов цинка [8]. На рис. 4, б представлена зависимость доли ионов от кратности заряда, измеренная спектрометром

Томсона. Источник ионов состоит из изолятора 1, анода 2 и холодного катода 3. Катод выполнен из сплава окиси алюминия с окисью цинка. Плость катодно-анодного пространства окружена тороидом 4 для уменьшения напряженности электрического поля и уменьшения пробоев. Источник снабжается генератором электронного луча 5, образованного накалившимся катодом 7 и анодом 6.

При обеспечении давления $\sim 0,01$ Па в рабочую камеру подается инертный газ (аргон). Трансформатор T обеспечивает накал катода источника электронов 7 (2 В; 4 А). В направлении катода ионного источника генерируется рассеянный электронный луч (5 кВ; 2 мА). Затем между анодом 2 и катодом 3 подается напряжение дуги ~ 40 В. В полости источника формируется низковольтный дуговой разряд током 50–150 А. При нагреве катода из него выделяется газ-кислород. При коммутации емкости ($C_1 = 0,75$ мкФ, $U_1 = 5-70$ кВ) происходит наложение высоковольтного импульса на дуговой разряд.

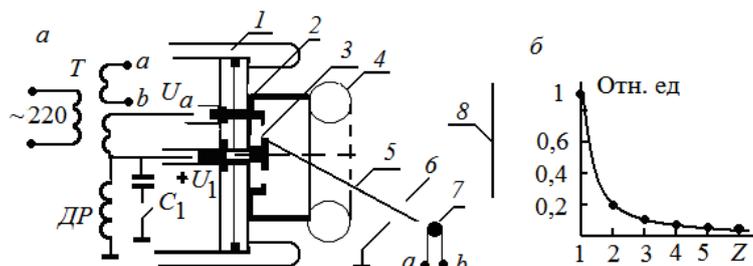


Рис. 4. Схема источника многоразрядных ионов: a – 1 – изолятор; 2 – анод; 3 – катод; 4 – тороид; 5 – поток электронов; 6 – анод; 7 – накалившийся катод; 8 – образец; b – зависимость доли ионов от кратности заряда

Обострение импульса для получения крутого фронта напряжения достигается обостряющим разрядником. Время изменения тока ($dl/dt \sim 10^9$ А/с) меньше времени соударений второго рода (ионизация, рекомбинация, переизлучение и др. – меньше 1 мкс). Изменение состояния плазмы сопровождается генерацией и ускорением многоразрядных ионов цинка и кислорода в направлении образца 8 с плотностью тока ~ 200 А/см². Дроссель ДР удерживает высоковольтный импульс в течение 5 мкс. Постоянное облучение катода электронным пучком поддерживает иницирование дуги и предотвращает ее погасание при отборе тока.

В итоге получены покрытия окиси цинка на ниобате лития с адгезией ~ 10 кг/см², пригодные для оптической электроники.

Полученные результаты и выводы. При малом расстоянии до подложки (меньшем длины свободного пробега молекулы) необходимо использовать гидродинамическую модель формирования потока пара. В области глубокого вакуума при ($P_j/P_k > 250$) необходимо переходить к традиционной модели испарения материала из точечного источника. При испарении легкоплавких металлов необходимо учитывать функцию изменения температуры пара.

В итоге анализа моделей испарения материала реализованы покрытия из легкоплавких материалов (цинк, свинец, селен, индий, церий и др.) на малом расстоянии до подложки (39 мм) с равномерностью менее 2%, а также с заданным линейным градиентом нарастания толщины. Обнаружено увеличение адгезии на 15–20% за счет кинетической энергии парового потока. Получены рекомендации по прогнозу закона изменения толщины пленки при изменении положения испарителя, температуры подложки и величины давления в камере.

Литература

1. Готра З.Ю. Технология микроэлектронных устройств. М.: Энергоиздат, 1987. 250 с.
2. Взаимодействие свободной струи газа низкой плотности с подложкой при осаждении пленок / А.В. Васенков, А.Е. Беликов, Р.Г. Шарафутдинов, О.В. Кузнецов // Микроэлектроника. 1995. Т. 24, № 3. С. 163–165.
3. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика. М.: Наука, 1976. 808 с.
4. Неллер Г. Задачи динамики разреженного газа в вакуумной технологии / Г. Неллер, А.Ю. Ишлинский, Г.Г. Черный // Динамика разреженных газов. М.: Мир, 1976. С. 195–206.
5. Орликов Л.Н. Динамические процессы при термовакuumном синтезе оптоэлектронных слоев / Л.Н. Орликов, Н.Л. Орликов, С.М. Шандаров // Матер. VIII Междунар. науч. конф: Химия твердого тела и современные микро- и нанотехнологии», 14–19 сент 2008 г., Кисловодск. Ставрополь: СевКавГТУ, 2008. С. 64–66.
6. Патент 2223481 МПК7 G01N25/00. Способ анализа газов на глубину залегания в материале / Н.Л. Орликов, Л.Н. Орликов. Заявл. 20.08.2001; опубл. 10.02.2004. Бюл. № 4.
7. Мешков В.В. Основы светотехники: Учеб. для вузов / В.В. Мешков, А.Б. Матвеев. М.: Энергоатомиздат, 1989. Ч. 2. 432 с.
8. Ionic Sources for Processing of Piezoelectric / L.N. Orlikov, N.L.Orlikov, S.I. Arstov, S.M. Shandarov, A.S. Shangin //10th International Conference on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows. Proceedings. Tomsk, Russia, 19–24 Sept 2010. P. 72–75.
9. Синтез наноразмерных материалов при воздействии мощных потоков энергии на вещество / А.В. Булгаков, Н.М. Булгакова, И.М. Бураков и др. Новосибирск: Институт теплофизики СО РАН, 2009. 462 с.

АНТЕННЫ И МИКРОВОЛНОВЫЕ УСТРОЙСТВА

*Сопредседатели секции – Гошин Геннадий Георгиевич,
д.т.н., профессор каф. СВЧиКР,
Сычев Александр Николаевич, д.т.н., профессор каф. КСУП*

УДК 621.382.037.37

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИОДОВ ГАННА ДЛЯ КОМПАКТНЫХ КВЧ-УСТРОЙСТВ

А.А. Трубачев, В.И. Юрченко

Рассматриваются особенности диодов Ганна при подключении нескольких параллельным или последовательным соединением и получение данным путем различных ВАХ. Также рассматривается вопрос о критерии короткого образца.

Ключевые слова: Диод Ганна, дислокация, ВАХ, короткий образец.

Для усиления и генерации колебаний СВЧ- и КВЧ-диапазонов используется аномальная зависимость скорости электронов от напряженности электрического поля в некоторых полупроводниковых соединениях, прежде всего в арсениде галлия [1]. Потребность в источниках электромагнитных колебаний, обладающих малыми габаритами и массой, повышенной надежностью, сравнительно простой конструкцией, предъявляющих в большинстве случаев пониженные требования к источникам питания, в современной радиоэлектронике весьма велика.

Повышение эффективности приборов требует сочетания предельно возможных электрических характеристик, оптимизации конструкции и учета наличия флуктуаций структурных дефектов в контактах и активной области.

Особенностью реальных полупроводниковых диодов является наличие неоднородностей и, как правило, превышение размеров контакта над длиной активной области. Это превышение особенно важно для мощных приборов и приборов коротковолновой части сантиметрового и в миллиметровом диапазонах длин волн.

Проведенный краткий анализ литературы [2, 3] показывает, что в зависимости от еще не вполне понятных причин дислокации могут ухудшать параметры приборов, не влиять на них, а также улучшать их. Следует заметить, что влияние дислокаций на свойства диодов имеет многолетнюю историю (более 20 лет), но механизмы этого влияния до сих пор не совсем понятны. Специфика поведения в сильных полях и высоких температурах вообще не изучена. Это не позволяет выработать конкретные рекомендации для уменьшения их влияния или целенаправленной генерации для положительного влияния. Столь медленный процесс связан со значительной активностью дислокаций при взаимодействии с трудно контролируемыми параметрами примесной атмосферы. Последняя может изменяться от донорной до акцепторной в зависимости от электрического режима и термообработки [2]. В большинстве исследований дислокации не контролируются или не определяется их расположение относительно геометрии диода. Эта не-

контролируемость и является причиной отсутствия корреляции между результатами различных работ.

Решение обсуждаемых проблем возможно лишь при детальном исследовании влияния дислокаций с известными параметрами на выходные параметры. Эффективность и полнота этих исследований зависят от возможности совместного применения современных методик контроля структурных несовершенств (рентгеноструктурных, электронно-микроскопических и т.д.) и методик исследования структурно-чувствительных электрических параметров этих приборов (сканирующая лазерная микроскопия, рекомбинационное излучение и т.д.). Результаты таких исследований существенно повлияют на развитие технологии и физики реальных диодов.

Размеры активных областей ДГ от 10^{-5} до 10^{-3} см², и при плотности дислокаций от 10^{-4} см² на каждый ДГ в среднем приходится одна дислокация [2].

Широкое использование ДГ в различных устройствах и промышленный выпуск разнообразных типов таких диодов требуют знания ВАХ этих диодов и влияния различных структурных факторов на форму и параметры ВАХ. Рассмотрим ВАХ реального диода при условии $D \gg L$ в виде параллельно-последовательного соединенных цепочек пассивных и активных сопротивлений, а также сделаем попытку объяснения на основе этой модели ряда явлений, наблюдаемых при измерении ВАХ. Вначале рассмотрим более простые модели, в которых к диоду Ганна последовательно или параллельно подсоединялись сопротивления различной величины. Подключение последовательного сопротивления не изменяет величины порогового тока, а приводит лишь к увеличению порогового напряжения. Причем величина пробивного напряжения $U_{Rпор}$ пропорциональна величине порогового тока. Величина перепада при подключении последовательного сопротивления не изменяется, тогда как при подключении параллельного сопротивления уменьшается величина параллельного сопротивления. В этом случае, в отличие от первого, неизменной является величина порогового напряжения и изменяется величина порогового тока. ВАХ активного слоя диода Ганна практически не изменяется. При подключении последовательного сопротивления его величина не превышает 5–10% от R_0 , а при подключении параллельного сопротивления его величина превышает в 100 раз R_0 . Измерения проводились на импульсном характеристографе ФЫМ 1.120.080, в импульсном режиме на треугольном импульсе, на ПНХТ и непрерывном режиме. Полученные результаты всеми методами практически совпадают, хотя при измерении в непрерывном режиме наблюдаются незначительные отклонения, обусловленные разогревом активного элемента.

Таким образом, результаты моделирования позволяют однозначно интерпретировать, что у диодов, имеющих рост тока после порогового напряжения в активной области, существуют паразитные сопротивления, подключенные параллельно активной области. В качестве одной из причин таких сопротивлений может служить сопротивление токовых шнуров или сопротивление областей, в которых поле ниже порогового и не охватываются статическим или динамическим доменом. Последнее явление особенно существенно для активных областей, имеющих толщину много меньше диаметра контакта и дефекты в области $n^+ - n$ -переходов. Поэтому для диодов миллиметрового диапазона длин волн гораздо чаще наблюдаются ВАХ с ростом тока после порогового напряжения. Параллельное соединение диодов с различными параметрами на примере идеализированных ВАХ позволяет получить ВАХ различного вида. Соединение диодов с

одинаковым перепадом по току и пороговым током, но с различными величинами пороговых напряжений ведет к уменьшению относительного перепада по току в суммарной ВАХ. Причем разница между I_{\max} и I_{\min} суммарной ВАХ остается той же самой, что и у отдельного диода. Соединение диодов с одинаковой величиной порогового напряжения и величиной перепада, но различной величиной порогового тока приводит на суммарной ВАХ к увеличению величины перепада, равного сумме перепадов отдельных диодов. В более общем случае соединение диодов с различной величиной $U_{\text{пор}}$ и $I_{\text{пор}}$ ведет к существенной трансформации вида и параметров ВАХ, особенно вблизи порогового напряжения. Экспериментальное исследование подтверждает, что разница в пороговых напряжениях и токах параллельно соединяемых диодов приводит на общей ВАХ к снижению перепада по току. А поскольку КПД работы диодов определяется величиной перепада, то разброс пороговых параметров, возможно, ведет к снижению КПД при параллельном соединении диодов. Параллельное соединение диодов с одинаковыми пороговыми параметрами позволяет получить суммарную мощность не меньше суммы мощностей, получаемых от отдельных диодов. Однако соединение диодов в отдельных корпусах или соединение всех активных элементов диодов в одном корпусе дают различные ВАХ. Наблюдаемая при этом разница в изменении суммарного тока от напряжения объясняется различием тепловых режимов работы диодов, а также частично за счет технологического разброса пороговых параметров диодов при их монтаже в корпус. Этот эксперимент показывает, что ограничение уровня выходной мощности при параллельном соединении активных элементов в одном корпусе связано с взаимным тепловым разогревом, а в случае соединения элементов в отдельных корпусах – за счет увеличения суммарных паразитных параметров.

Экспериментально исследовались разнообразные варианты соединения ДГ с различной толщиной активного слоя, площадью катодного контакта и формы ВАХ. Подтверждается [3] гипотеза о том, что в реальной структуре диода по анализу его ВАХ можно выделить наличие и характер структурных неоднородностей контакта в активной области. Показано, что величина сопротивления последовательно подключаемых областей не должна превышать 10% от сопротивления в слабом поле. Величина параллельного пассивного сопротивления должна быть, по крайней мере, в 10 раз больше сопротивления диода в сильном поле.

Существующие методы анализа и оптимизации имеют существенный недостаток – не учитывают статистического разброса параметров по площади структуры, который весьма значителен. В результате чего лишь незначительный процент диодов имеет электрические характеристики, соответствующие оптимальному расчету, что частично обесценивает этот расчет. Попытки учесть разброс параметров путем введения «запасов» по тому или иному исходному параметру не эффективен и приводит к необоснованному ухудшению технико-экономических показателей.

Актуальность эффектов зарождения доменов сохраняется до настоящего времени в связи с развитием диодов Ганна миллиметрового диапазона длин волн. Развитие диодов Ганна идет по пути уменьшения длины активной области в связи с необходимостью повышения частот генерации. Несомненный научный и практический интерес представляют изменения параметров вольт-амперной характеристики диодов с длиной активной области менее 5 мкм.

Измерения параметров вольт-амперных характеристик проводились в импульсном режиме [4] (длительность импульса 100 нс, скважность 10000) на меза-

структурах с различной площадью поперечного сечения (S), изготовленных в одном технологическом цикле. В качестве контакта использовался сплав золото-германий с никелем. Таким образом, эксперименты проводились на структурах, имеющих одинаковые анодные и катодные переходы. Напряжение пробоя уменьшается с уменьшением длины от толщины, однако значения, рассчитанные по формуле $U_{\text{проб}} = 1,28 L + 12,8 L$, дают в 1,5 раза большие значения, что обусловлено, вероятно, дефектностью используемых структур. Пороговые параметры имеют более сложные зависимости, особенно для толщины менее 2,5 мкм.

Рассмотрим одну из возможных причин подобного поведения, связанную с зависимостью порогового напряжения от порогового тока. Зависимость порогового тока от толщины имеет нелинейную зависимость, обусловленную ростом концентрации в n -слое при уменьшении толщины. Подобная зависимость может наблюдаться лишь при наличии пассивных сопротивлений, включенных последовательно с активной областью и аппроксимируется выражением $U = E_{\text{пор}} L + J_{\text{пор}} R_{\text{пас}}$, но тогда при нулевом токе мы должны получить истинные значения порогового напряжения.

Другим фактором, дающим аналогичную зависимость, является эффект мертвой зоны. По различным источникам ее величина колеблется от 0,4–3 мкм [4]. По нашим расчетам и экспериментам [3] $L_{\text{мз}} = 1$ мкм, и в дальнейших экспериментах будем использовать эту величину, мертвая зона как бы уменьшает длину активной области: $L_{\text{ф}} = L - L_{\text{мз}}$. Вместе с тем для уменьшенной длины не выполняется условие Кремера, но так как мертвая зона уменьшается с ростом напряжения, то с некоторой величины это условие выполняется и начинает возникать высокополевой домен. С учетом этого предлагается рассчитывать зависимость порогового напряжения от длины по формуле $U_{\text{пор}} = E_{\text{пор}} L(1 + L_{\text{мз}} / L - L_{\text{мз}})$. Эти данные хорошо совпадают с экспериментом и подтверждают правомерность проведенных ранее расчетов длины мертвой зоны методом Монте-Карло [3] для арсенида галлия.

Заключение

1. Для диодов с длиной активной области менее 5 мкм наблюдается существенное увеличение порогового напряжения при уменьшении длины активной области вследствие наличия мертвой зоны и аппроксимируется выражением $U_{\text{пор}} = E_{\text{пор}} L(1 + L_{\text{мз}}/L - L_{\text{мз}})$.

2. Полученные данные позволяют уточнить критерий короткого образца и считать его равным 2,25 мкм, а величину мертвой зоны для арсенида галлия равной 1 мкм.

3. Необходимы более детальные исследования зависимости длины мертвой зоны от величины электрического поля.

Литература

1. Царапкин Д.П. Генераторы СВЧ на диодах Ганна. М.: Радио и связь, 1982. С. 112.
2. Сорокин Ю.Г. Влияние дислокаций на электрические параметры p - n -переходов // Труды ВЭИ. Вып. 90. М.: Энергия, 1980. С. 91–101.
3. Юрченко В.И. Анализ и моделирование диодов Ганна с неоднородностью контакта и активной области // Третья науч.-практ. конф. НИИПП по результатам НИОКР. Томск, 1982. С. 6.
4. Юрченко В.И. Прогнозирование параметров диодов Ганна по измеренной на мезаструктуре импульсной вольт-амперной характеристике // Спецэлектроника. Сер. 2. Полупроводниковые приборы. 1982. Вып. 1(39). С. 50.

ПЛОСКИЕ АНТЕННЫ КВЧ-ДИАПАЗОНА

А.А. Трубачев, В.И. Юрченко

Представлен комплекс численных экспериментов по моделированию плоской антенны в виде двухплечевой спирали Архимеда. Выполнена оценка влияния геометрических размеров и диэлектрической проницаемости на резонансную частоту и диаграмму направленности антенны. Показано наличие существенной зависимости параметров от диэлектрической проницаемости подложки.

Ключевые слова: микрополосковая антенна, характеристика отражения, диаграмма направленности.

В связи с освоением диапазона крайне высоких частот (КВЧ) [1] и миниатюризацией гибридно-интегральных схем (ГИС) наблюдается тенденция к использованию в данном диапазоне микрополосковой техники. Не является исключением и антенная техника, где используются плоские (или *patch*) антенны. Использование такого типа антенн позволяет значительно снизить массогабаритные параметры устройств этого диапазона. В статье рассматриваются результаты моделирования диаграмм плоских антенн и представлены их зависимости при изменении геометрических параметров.

На основании ранее проведенных исследований [2] для моделирования в данной работе выбрана спиральная микрополосковая антенна, которая является двухплечевой спиралью Архимеда. В центре, соединяя два плеча, обычно расположен активный элемент – диод Ганна в планарной конструкции [1], анодный и катодный выводы которого припаяны к разным плечам. Динамическое сопротивление диода составляет около 180 Ом, что обеспечивает достаточно хорошее согласование с антенной (импеданс для базового расчета составил около 150 Ом). При этом диод Ганна может объединить в одном устройстве функции генератора и смесителя с низкими потерями.

Методика расчета спиральной антенны была представлена ранее в [3, 4].

Обратная сторона антенны металлизирована для большей добротности. Ниже представлены результаты моделирования при различных значениях толщины подложки h (рис. 2–12).

1. $h = 0,25$ мм.

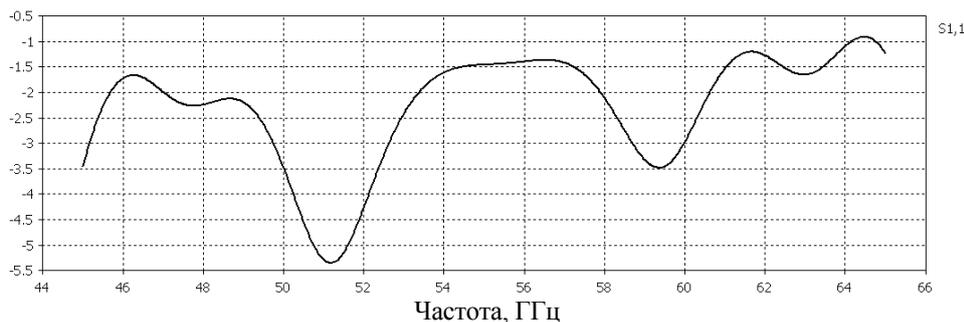


Рис. 2. Зависимость характеристики отражения S_{11} от частоты (в дБ)

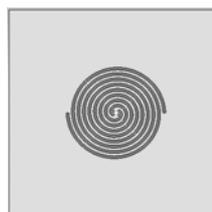


Рис. 1. Модель антенны

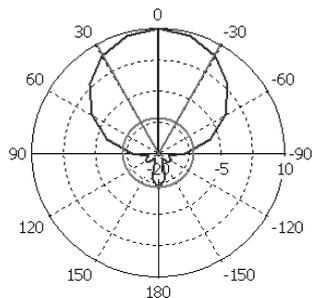


Рис. 3. Диаграмма направленности антенны.
Ширина ДН – 58,4 град.
Частота 51 ГГц. Уровень главного лепестка 9,9 дБ

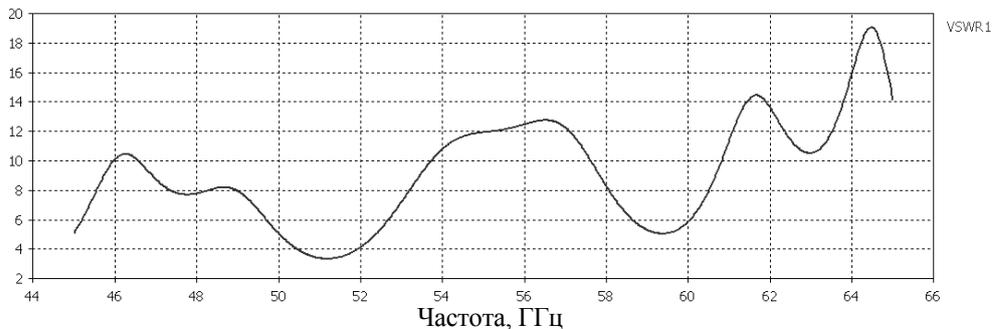


Рис. 4. Зависимость КСВН от частоты

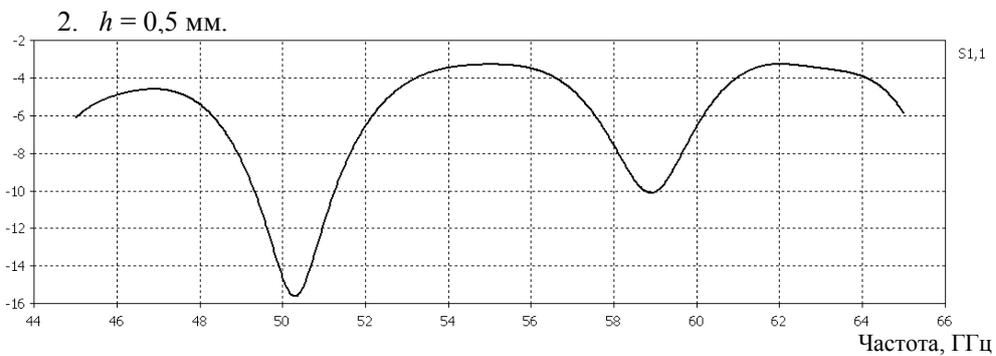


Рис. 5. Зависимость характеристики отражения S_{11} от частоты (в дБ).

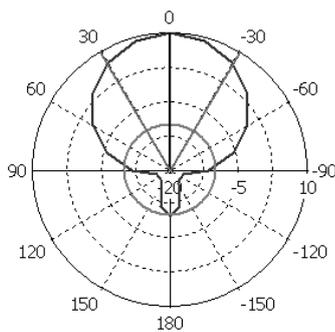


Рис. 6. Диаграмма направленности антенны.
Ширина ДН – 61,5 град.
Частота 50 ГГц. Уровень главного лепестка 9,9 дБ

3. $h = 0,75$ мм.

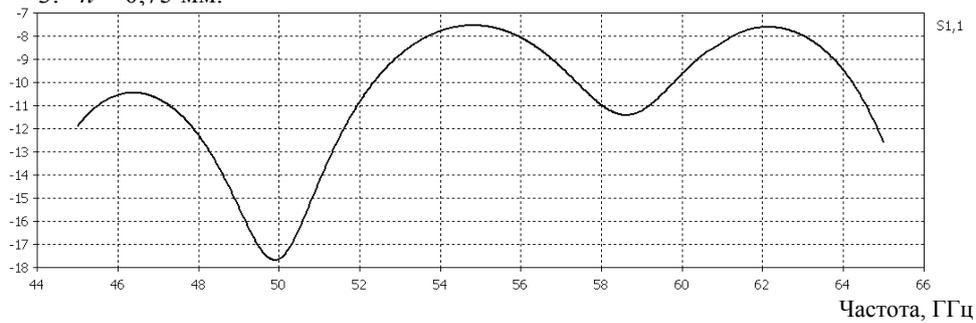


Рис. 7. Зависимость характеристики отражения S_{11} от частоты (в дБ)

Рис. 8. Диаграмма направленности антенны.
Ширина ДН – 61,8 град. Частота 50 ГГц.
Уровень главного лепестка 9,7 дБ

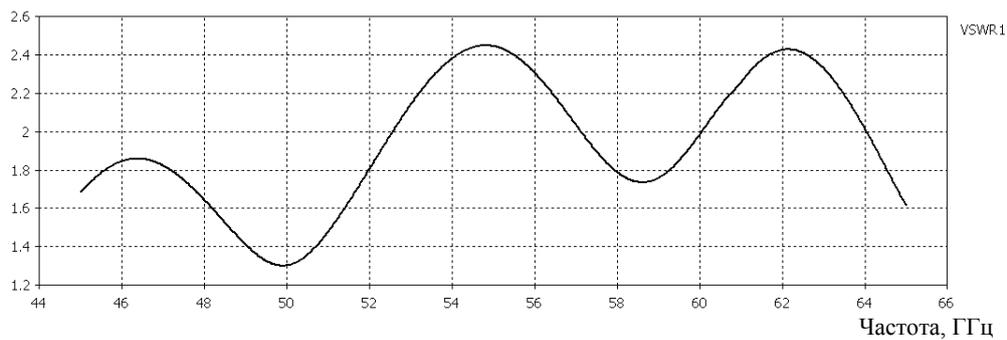
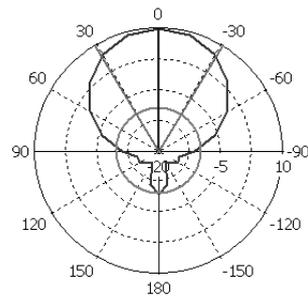


Рис. 9. Зависимость КСВН от частоты

4. $h = 1$ мм.

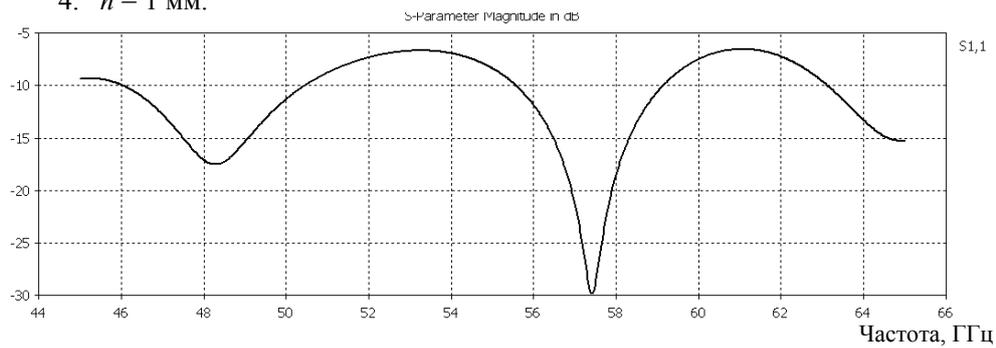


Рис. 10. Зависимость характеристики отражения S_{11} от частоты (в дБ)

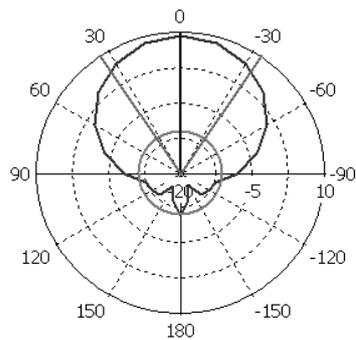


Рис. 11. Диаграмма направленности антенны.
Ширина ДН – 68 град. Частота 57,4 ГГц.
Уровень главного лепестка 9,1 дБ

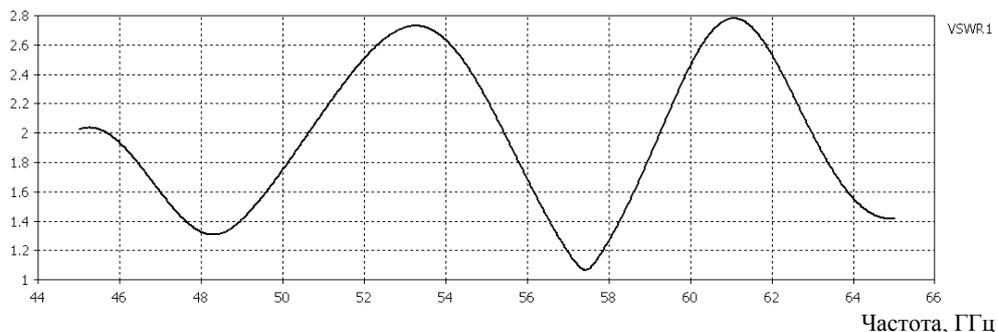


Рис. 12. Зависимость КСВН от частоты

Из представленных результатов видно, что центральная частота антенны, при изменении толщины подложки изменяется обратно пропорционально, т.е. при увеличении h частота уменьшается, и наоборот. Это обусловлено резонансными свойствами микрополосковой линии. Изначально антенна рассчитывалась на частоту 50 ГГц, и оптимальной толщиной являлась $h = 0,75$ мм. Но, как видно из графика на рис. 10, при $h = 1$ мм возникает более глубокий минимум (-30 дБ) на характеристике S_{11} , на частоте 57,4 ГГц, что означает, антенна на данной частоте будет излучать большее количество энергии в пространство.

Также был проведен ряд моделирований для выявления зависимости характеристик антенны от диэлектрической проницаемости подложки. Измерения проводились для толщины подложки $h = 0,75$ мм (рис. 13–21).

1. $\epsilon = 2$.

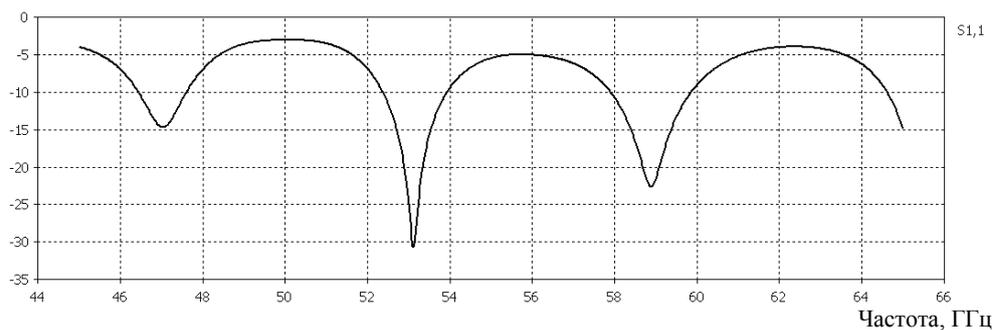


Рис. 13. Зависимость характеристики отражения S_{11} от частоты (в дБ)

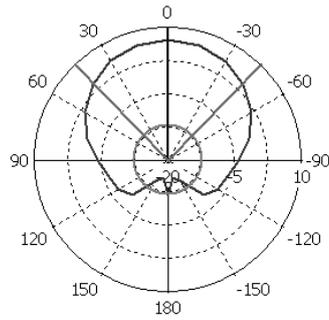


Рис. 14. Диаграмма направленности антенны. Ширина ДН – 88,5 град.
Частота 53,12 ГГц. Уровень главного лепестка 7 дБ

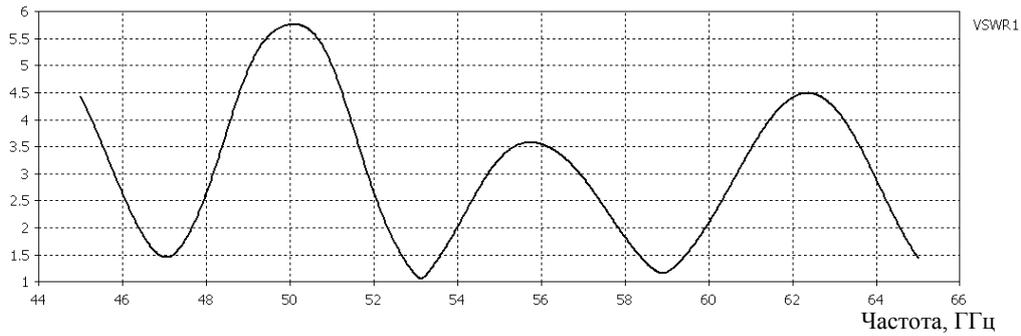


Рис. 15. Зависимость КСВН от частоты

2. $\epsilon = 3$.

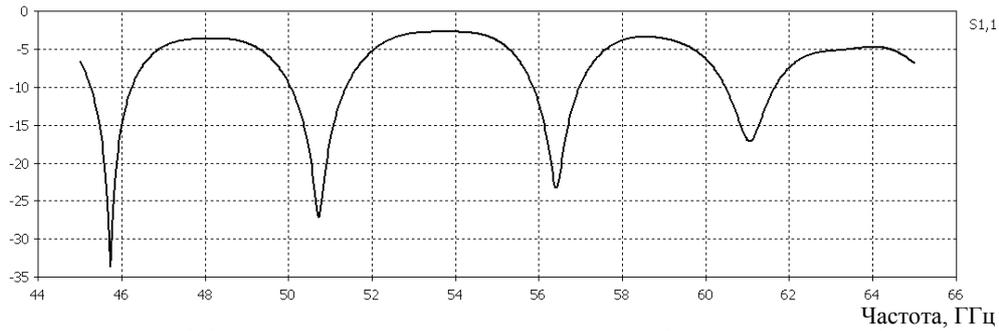


Рис. 16. Зависимость характеристика отражения S_{11} от частоты (в дБ)

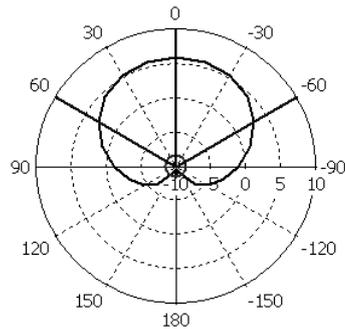


Рис. 17. Диаграмма направленности антенны. Ширина ДН – 119,8 град.
Частота 53,12 ГГц. Уровень главного лепестка 7 дБ

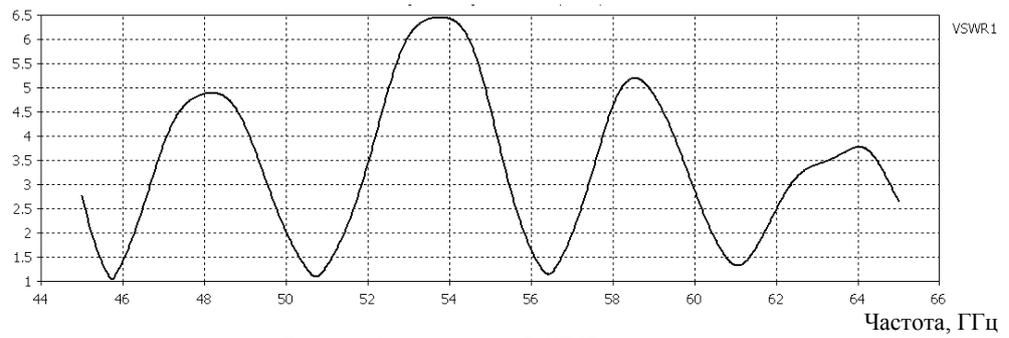


Рис. 18. Зависимость КСВН от частоты

3. $\epsilon = 4$.

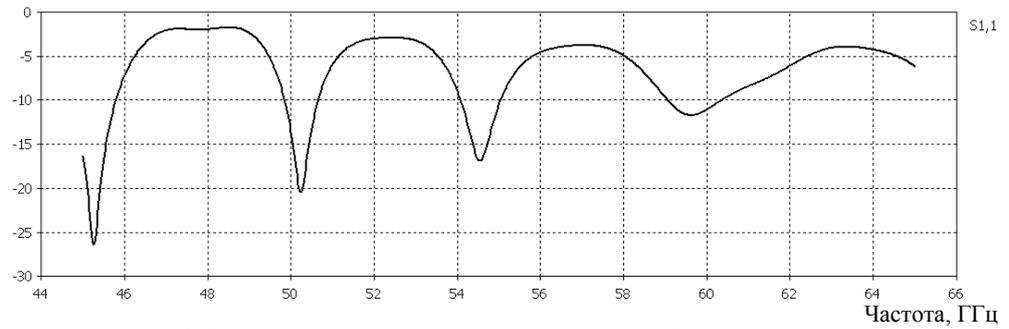


Рис. 19. Зависимость характеристики отражения S_{11} от частоты (в дБ)

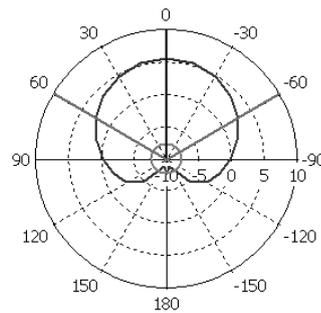


Рис. 20. Диаграмма направленности антенны.
Ширина ДН – 119,7 град. Частота 45,26 ГГц. Уровень главного лепестка 5,5 дБ

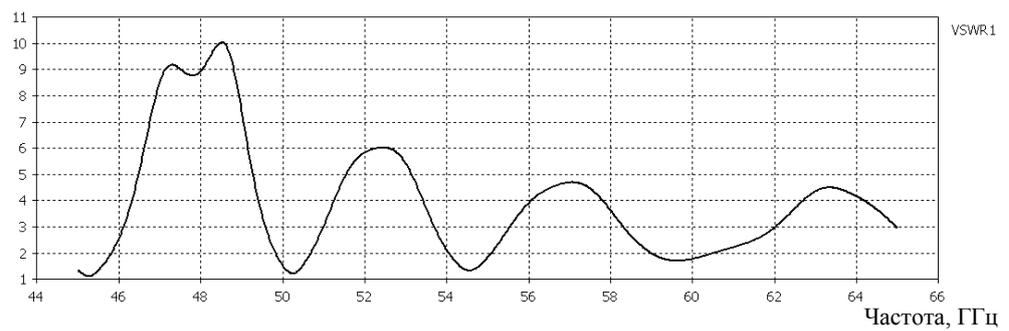


Рис. 21. Зависимость КСВН от частоты

Как можно наблюдать из графиков, представленных на рисунках выше, зависимость характеристик антенны, а именно характеристики отражения S_{11} , КСВН и диаграммы направленности от диэлектрической проницаемости подложки является более чем существенной. Уход частоты при изменении ϵ подложки при постоянных геометрических размерах составляет около 2 ГГц. Также заметно изменяются и параметры диаграммы направленности при заданной частоте антенны.

Заключение

1. Благодаря круговой поляризации спиральной антенны целесообразно использовать антенны такого типа в доплеровских датчиках либо в датчиках сближения.

2. Показано наличие существенной зависимости параметров от диэлектрической проницаемости и толщины подложки.

Литература

1. Воторопин С.Д., Егунов М.С., Пушкарев В.П., Юрченко В.И. Радиолокационные КВЧ-датчики на диодах Ганна для задач обнаружения, измерения и управления // Труды IX конференции «Арсенид галлия и полупроводниковые соединения группы III–V», 3–5 октября 2006 г. Томск, 2006. С. 92.

2. Трубачев А.А., Юрченко В.И. Активные КВЧ антенны на диодах Ганна для задач ближней локации // Матер. Междунар. науч.-техн. конф. «Радиотехника, электроника и связь» (РЭиС-2011). Омск: Радиотехника, 2011. С. 306–313.

3. Caswell E. D. Design and Analysis of Star Spiral with Application to Wideband Array with Variable Element Sizes. Doctor of Philosophy Dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University. 2001 y.

4. H. Scdaghat Pisheh, Y. Komijany, M. Shahabadi et al. Design, Simulation, and Fabrication of On-Chip Conical Spiral Antennas for Millimeter-Wave Wireless Communications // in Proc. The Joint 30-th International Conference on Infrared and Millimeter Waves and 13-th International Conference on Terahertz Electronics, 2005. P. 553–554.

**ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА И
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА**

*Председатель – Гарганеев Александр Георгиевич,
д.т.н., профессор, зав. каф. ЭСАУ*

УДК 621.314

**МДП-КЛЮЧ В КВАЗИРЕЗОНАНСНОМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕ
НАПРЯЖЕНИЯ**

Н.Н. Горяшин, А.А. Соломатова

Определена связь параметров резонансного контура квазирезонансного преобразователя напряжения с переключением при нулевых значениях тока с параметрами процесса обратного восстановления встроенного в МДП-транзистор p - n -диода, где МДП-транзистор выполняет функцию силового ключевого элемента.

Ключевые слова: квазирезонансный преобразователь, электронный ключ, резонансный контур, процесс обратного восстановления диода.

Тенденция развития высокочастотных преобразователей напряжения (ПН), входящих в состав различных энергосистем (стационарных, автономных и т.д.), направлена на разработку резонансных ПН ввиду их преимуществ перед традиционными импульсными преобразователями. К основным достоинствам преобразователей, использующих резонансные режимы работы, можно отнести: уменьшение габаритных размеров и массы радиаторов силовых ключей за счет снижения потерь на переключение ключевого элемента (КЭ), снижение габаритных размеров и массы емкостных и индуктивных элементов выходного фильтра, благодаря возможности повышения частоты коммутации без увеличения потерь мощности на КЭ [1, 2].

Выделяют два основных режима работы КЭ с использованием явления резонанса: режим переключения при нулевых значениях тока (ПНТ) и режим переключения при нулевых значениях напряжения [1, 2]. Другие возможные схемотехнические решения объединяют в себе физику процесса этих двух режимов и применяются в зависимости от исходных условий и предъявляемых требований. Третий тип переключения, называемый «нейтральным», как правило, сопровождается режим ПНТ в том случае, когда используется полный резонансный цикл тока, т.е. при смене знака тока, изменяющегося по гармоническому закону в цепи КЭ, его отрицательная полуволна протекает через обратный диод, шунтирующий электронный ключ. Таким образом, если на интервале отрицательной полуволны тока на транзисторный ключ подать запирающий сигнал, его закрытие будет происходить при нуле тока и незначительном напряжении, равном падению напряжения на шунтирующем диоде [2].

На рис. 1 приведена электрическая схема последовательного понижающего ПН с режимом ПНТ и с полной волной тока резонансного цикла (далее ПНТ-преобразователь) и частотно-импульсным законом регулирования выходного напряжения, где $U_{вх}$ – входное напряжение, $VT1$ – КЭ, в качестве которого используется МДП-транзистор; L_p и C_p – индуктивность и емкость резонансного

контура (РК); VD_p – рекуперативный диод; R_n – сопротивление нагрузки; L_ϕ и C_ϕ – индуктивность и емкость выходного фильтра [1].

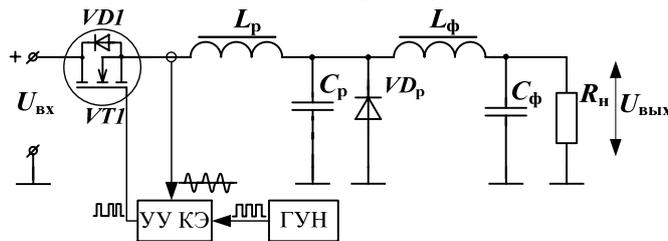


Рис. 1. Схема силовой части ПНТ-преобразователя, где УУ КЭ – устройство управления ключевым элементом; ГУН – генератор, управляемый напряжением

Идеализированные и экспериментальные временные диаграммы, поясняющие работу исследуемого ПН, приведены на рис. 2, *a* и *б* соответственно, где t_k – длительность открытого состояния КЭ; $I_{Lp}(t)$ – ток через индуктивность РК L_p ; $U_{Cp}(t)$ – напряжение на конденсаторе РК C_p ; I_n – ток нагрузки, равный среднему току дросселя выходного фильтра в установившемся режиме; $U_{VTI}(t)$ – напряжение на КЭ; $P_{дин}(t)$ – динамическая мощность потерь КЭ.

Выходное напряжение, подаваемое в нагрузку после сглаживающего LC -фильтра, соответствует усредненному по времени значению напряжения на обкладках конденсатора РК. Регулирование выходного напряжения производится за счет изменения частоты отпираания КЭ. Более подробное описание ПН данного типа приводится в [1, 2].

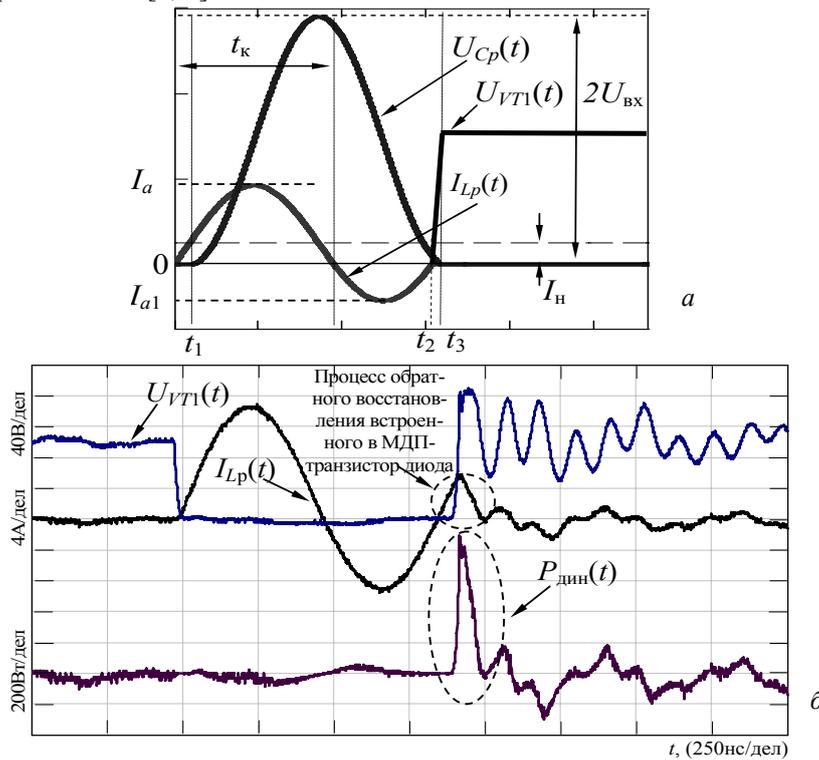


Рис. 2. Теоретические (*a*) и экспериментальные (*б*) диаграммы сигналов в цепи РК и КЭ ПНТ-преобразователя с полной волной тока резонансного цикла

Математическое описание тока и напряжения РК дается при допущении, что ток дросселя выходного фильтра является постоянной величиной, равной току нагрузки в установившемся режиме. Один период работы КЭ в цепи РК (рис. 2, а) можно описать функциями:

$$I_{Lp}(t) = \begin{cases} U_{BX}t/L_p, t \in [0; t_1], \\ I_H + (U_{BX}/Z_0)\sin(\omega_0(t-t_1)), t \in [t_1; t_2], \\ 0, t \in [t_2; T], \end{cases} \quad (1)$$

$$U_{Cp}(t) = \begin{cases} 0, t \in [0; t_1], \\ U_{BX}(1 - \cos(\omega_0(t-t_1))), t \in [t_1; t_2], \\ U_{BX} \left[1 - \sqrt{1 - (I_H Z_0 / U_{BX})^2} \right] - \frac{I_H}{C_p}(t-t_2), t \in [t_2; t_3], \\ 0, t \in [t_3; T_K], \end{cases} \quad (2)$$

$$\Delta t_1 = t_1 = I_H L_p / U_{BX}, \quad \Delta t_2 = t_2 - t_1 = \frac{2\pi - \arcsin(I_H Z_0 / U_{BX})}{\omega_0},$$

$$\Delta t_3 = t_3 - t_2 = \frac{U_{BX} \left[1 - \sqrt{1 - (I_H Z_0 / U_{BX})^2} \right]}{I_H Z_0 \omega_0}. \quad (3)$$

При сравнении временных диаграмм, построенных аналитически, с соответствующими осциллограммами видно, что при использовании встроенного в МДП-транзистор диода ($VD1$) для обеспечения протекания тока в обратном направлении проявляется процесс его обратного восстановления. На рис. 2, б участок диаграммы, соответствующий этому процессу, выделен пунктиром. Так как в момент завершения синусоидального цикла тока через силовой транзисторный ключ $VТ1$ напряжение на нем начинает нарастать, то дальнейшее протекание тока, обусловленное процессом обратного восстановления встроенного диода, приводит к дополнительным динамическим потерям ($P_{дин}(t)$ на рис. 2, б). Таким образом, при повышении частоты преобразования КПД ПН с режимом ПНТ и полной волной резонансного цикла будет снижаться.

Механизм процесса обратного восстановления диода, встроенного в высоковольтный кремниевый МДП-транзистор, описан в теории $p-n$ -перехода [3], из которой следует, что снижение обратного броска тока возможно либо за счет снижения накапливаемого заряда в базе перехода, что осуществимо, или за счет снижения прямого тока, или за счет снижения скорости спада тока при запираии диода, что позволит увеличить время на рекомбинацию неравновесных носителей.

В рассматриваемом ПНТ-преобразователе амплитуда отрицательной полу-волны тока синусоидальной формы I_{a1} на рис. 2, а, протекающего через обратный диод, зависит как от входного напряжения, так и от выходного тока, следовательно, скорость спада тока в момент запираии диода тоже будет определяться этими параметрами (рис. 3). Таким образом, амплитуда обратного выброса по току диода I_{rm} (рис. 3, б) зависит от скорости изменения тока в момент $t = t_2$, т.е. когда ток достигает нулевого значения. Как следует из (1), ток через КЭ на интервале времени $0 < t < t_1$ характеризуется линейным нарастанием в индуктивно-

сти РК. Так как форма тока на данном временном отрезке будет отличаться от синусоидальной незначительно, для определения мгновенного значения скорости тока при переходе его через ноль будем считать, что весь цикл тока РК имеет синусоидальную форму (рис. 4).

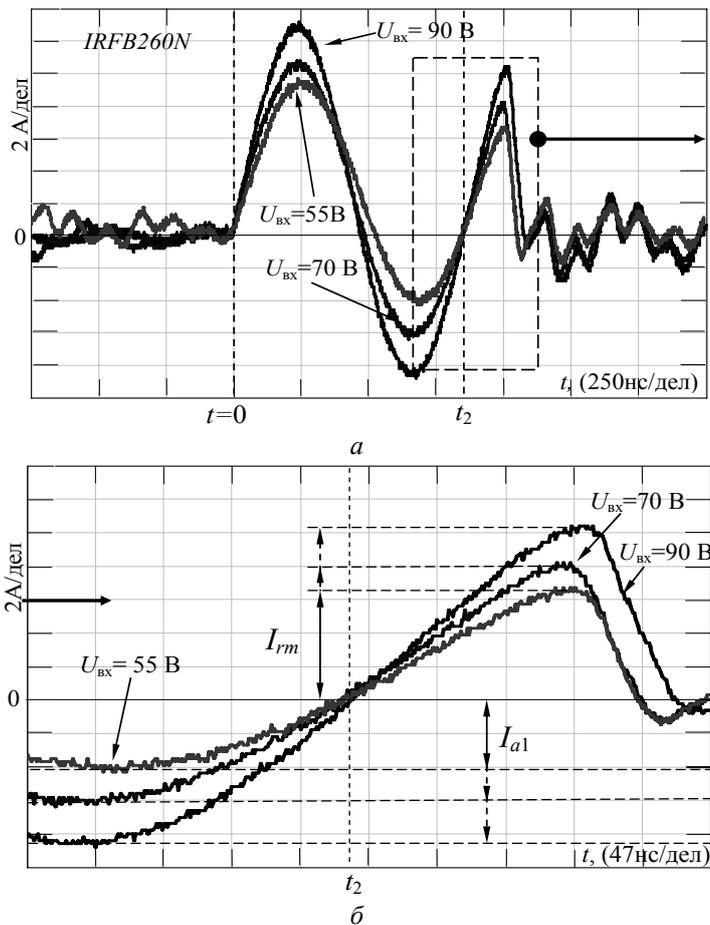


Рис. 3. Осциллограммы тока, протекающего через МДП-ключ IRFB260N в ПНТ-преобразователе при разных входных напряжениях

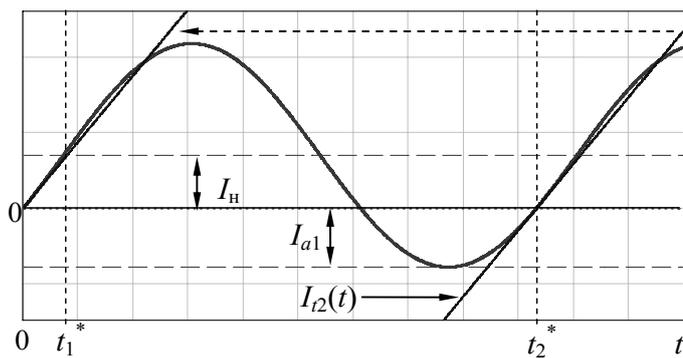


Рис. 4. Цикл тока РК

Скорость изменения тока при $t = t_2^*$ может быть определена так:

$$\frac{d}{dt} I_{Lp}(t_2^*) = \frac{d}{dt} I_{Lp}(t_2) = \frac{U_{BX}}{Z_0} \omega_0 \cos(\omega_0(t_2^* - t_1^*)), \quad (4)$$

где $t_1^* = \arcsin(Z_0 I_H / U_{BX}) / \omega_0$, $t_2^* = 2\pi / \omega_0$. Отсюда выводим линейную функцию, определяющую скорость изменения тока в точке t_2^* :

$$I_{t_2}(t) = \left[t - \frac{2\pi}{\omega_0} \right] \frac{U_{BX}}{L_p} \cos(\omega_0 t_1^*). \quad (5)$$

Далее переносим полученную линию в начало координат:

$$I_{t_2}(t) = at, \quad (6)$$

где

$$a = \frac{U_{BX}}{L_p} \cos(\omega_0 t_1^*). \quad (7)$$

Таким образом, значение скорости изменения тока a в момент t_2 определяется значением входного напряжения ПН и параметрами РК. Далее, если предположить, что при спаде тока во второй части отрицательной полуволны резонансного цикла форма тока близка к той, которая получается при жестком переключении, то возможно использовать традиционную методику определения параметров процесса обратного восстановления. В подтверждение сказанному на рис. 5 представлены осциллограммы токов диода, полученные при работе в цепи РК ПНТ-преобразователя и классического ПН с ШИМ повышающего типа, в котором скорость отпирания КЭ подбиралась таким образом, чтобы обеспечить совпадение скорости изменения токов.

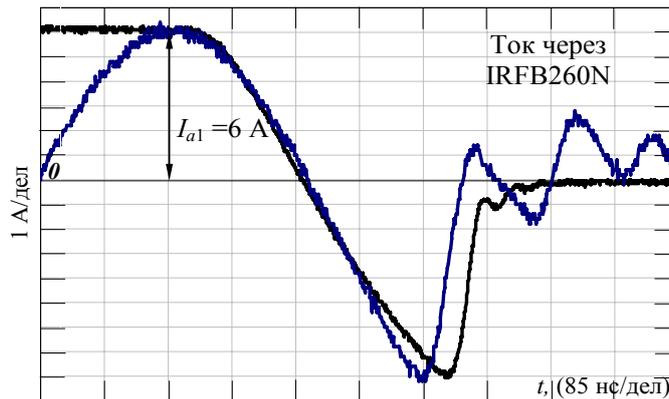


Рис. 5. Осциллограммы процесса обратного восстановления диода, встроенного в МДП-транзистор (IRFB260N) при импульсном и резонансном режимах работы ПН

Стандартная методика определения параметров, характеризующих процесс обратного восстановления, приводится ниже, при этом часть параметров определяется экспериментально, как изображено на рис. 6. Здесь приводятся осциллограммы, показывающие аналогию определения необходимых параметров по переходному процессу (ПП) тока при запираии диода, встроенного в МДП-транзистор для двух разных форм тока, где на рис. 6, *a* изображен ПП при запираии данного диода, работающего в импульсном режиме, а на рис. 6, *б* – ПП при работе в цепи РК.

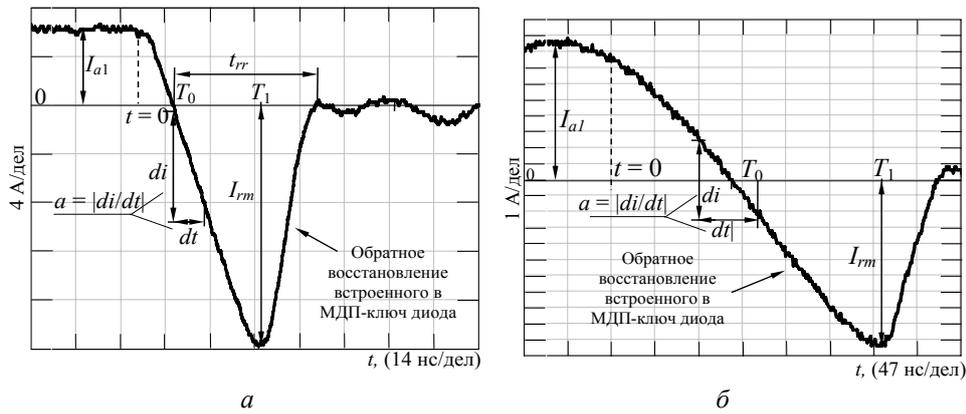


Рис. 6. Осциллограммы процесса обратного восстановления встроеного в МДП-транзистор диода

Распределение неравновесных носителей в базе $p-n$ -перехода описывается уравнениями (8) и (9) [4]:

$$0 = \frac{dq_m}{dt} + \frac{q_m}{\tau} - \frac{q_e - q_m}{T_M}, \quad (8)$$

$$i_d(t) = \frac{q_e - q_m}{T_M}. \quad (9)$$

В статическом режиме для $p-n$ -перехода справедливо уравнение Шокли [3–5]:

$$q_e = I_s \tau \left(e^{\left(\frac{U_d \cdot q}{N \cdot k \cdot T} \right)} - 1 \right), \quad (10)$$

где $i_d(t)$ – ток диода; q_e – заряд, инжектированный в переход; q_m – полный инжектированный заряд при прямом смещении; q – элементарный заряд; T_M – время переноса через дрейфовую область; τ – время жизни неравновесных носителей заряда; I_s – ток насыщения диода; U_d – напряжение, приложенное к переходу; N – коэффициент эмиссии; k – постоянная Больцмана.

Параметры τ и T_M можно определить из осциллограммы процесса обратного восстановления диода. При $t \leq T_1$ обратное сопротивление диода мало. Общий запасенный заряд $q_m(t)$ определяется из уравнения (8) при граничном условии $i(t) = I_{a1} - at$, пренебрегая q_e в формулах (8) и (9) [4]:

$$q_m(t) = a\tau \left[T_0 + \tau - t - \tau e^{\left(\frac{-t}{\tau} \right)} \right], \quad t \leq T_1. \quad (11)$$

К моменту времени $t = T_1$ заряд q_m практически полностью рассасывается и начинается фаза обратного восстановления:

$$\begin{aligned} q_e(T_1) &= 0, \quad U_d(T_1) = 0 \quad \text{и} \\ i(T_1) &= -I_{rm} = -\frac{q_m(T_1)}{T_M}, \quad t = T_1, \end{aligned} \quad (12)$$

где I_{rm} – амплитуда тока обратного восстановления.

При $t \geq T_1$ обратное сопротивление диода увеличивается, а диффузионный ток в течение процесса восстановления не зависит от приложенного к диоду обратного напряжения. Из (8), (9) и (12) при $q_e=0$:

$$i(t) = -\frac{q(t)}{T_M} = -I_{rm} e^{\left(\frac{t-T_1}{\tau_{rr}}\right)}, \quad t \geq T_1, \quad (13)$$

где τ_{rr} – постоянная времени, характеризующая процесс обратного восстановления, которая может быть определена из экспериментальной осциллограммы и связана с τ и T_M следующим соотношением:

$$\frac{1}{\tau_{rr}} = \frac{1}{\tau} + \frac{1}{T_M}. \quad (14)$$

Для того чтобы определить время жизни τ , используют формулу

$$I_{rm} = a(\tau - \tau_{rr}) \left(1 - e^{\left(\frac{-T_1}{\tau}\right)} \right). \quad (15)$$

Таким образом, параметры τ_{rr} , I_{rm} определяют из осциллограммы процесса обратного восстановления диода, τ и T_M – из формул (14) и (15) соответственно.

В результате проведенного анализа можно сделать следующий вывод: энергию потерь в МДП-транзисторе за счет процесса обратного восстановления встроенного в него диода можно нормировать только через амплитуду импульса отрицательной полуволны тока резонансного цикла, которая однозначно связана с режимами и параметрами ПН данного типа. Таким образом, возможен такой подбор параметров РК в заданном диапазоне питающих напряжений и нагрузок ПН, при котором описанный эффект будет оказывать минимальное влияние на КПД преобразователя. Однако такой путь не исключает полностью динамические потери в ключе за счет процесса обратного восстановления и приводит к ограничению на максимальную возможную частоту РК, а значит, и на частоту преобразования, что, в свою очередь, ограничивает возможности повышения удельных характеристик ПН исследуемого типа.

Литература

1. Erickson R.W. Fundamentals of Power Electronics. First Edition New York: Chapman and Hall, 1997. 791 p.
2. Mammano R. Resonant Mode Converter Topologies. Unitrode Power Supply Design Seminar SEM600, Topic 1, 1988. 12 p.
3. Виноградов Ю.В. Основы электронной и полупроводниковой техники: Учеб. для студентов высш. техн. учеб. заведений. 2-е. изд., доп. М.: Энергия, 1972. 536 с.
4. Lauritzen P.O. A Simple Diode Model with Reverse Recovery // IEEE Trans. Power Electron. 1991. Vol. 6, № 2. P. 188–191.
5. Tien B. Determination of Carrier Lifetime from Rectifier Ramp Recovery Waveform / B. Tien, C. Hu // IEEE Trans. Electron. Devices. 1988. Vol. 9, № 10. P. 553–555.

УДК 539.216.22:546.28

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ
ХАРАКТЕРИСТИК ПРОСВЕТЛЯЮЩИХ ПОКРЫТИЙ
ДЛЯ СВЕТОДИОДОВ**

А.В. Мошкина, О.Л. Роденко

Смоделированы и исследованы оптические характеристики просветляющих покрытий. Показана эффективность просветления пленок SiO_2+C , SiO_2 , TiO_2 , SiO_x и Ta_2O_5 .

Ключевые слова: светодиод, внутренняя квантовая эффективность, внешняя квантовая эффективность, просветляющее покрытие.

Моделирование оптических характеристик просветляющих покрытий

Излучающие полупроводниковые диоды синего света с центральной длиной волны излучения около 455–460 нм являются основным элементом современных энергосберегающих осветительных систем. Наиболее перспективной для освоения в производстве является конструкция кристалла на гетероструктурах GaN и его твердых растворов. Область излучения в этом кристалле сосредоточена в слое $\text{In}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{N}$, состоящего из множества квантовых ям. Внутренняя квантовая эффективность таких структур очень высока и достигает 90%, в то время как внешняя эффективность существенно ниже и составляет около 25%.

Повышение внешней квантовой эффективности полупроводниковых источников излучения может быть достигнуто за счет нанесения на излучающую поверхность кристалла просветляющего покрытия, обладающего высоким пропусканием в узкой полосе спектра излучения кристалла 450–460 нм и высоким коэффициентом отражения в остальной области спектра. Просветляющее покрытие – специальные слои на поверхностях, предназначенные уменьшить отражение падающего света [1, 2].

В качестве просветляющих покрытий используются тонкие слои диоксида кремния SiO_2 , пятиоксида тантала Ta_2O_5 , диоксида титана TiO_2 и др. Выбор этих покрытий объясняется их дешевизной и высокой степенью отработанности процесса получения.

Пленки были получены магнетронным распылением соответствующих мишеней в различных средах: Si в среде Ar (SiO_x), Si, Ta, Ti в смеси Ar+O₂ (SiO_2 , Ta_2O_5 , TiO_2), сложная мишень из Si и углерода в среде Ar+O₂ (SiO_2+C).

В данной работе были исследованы оптические характеристики покрытий с помощью лазерной эллипсометрии ЛЭМ-3:

SiO_x : $d = 85$ нм, $n = 1,9$ при $\lambda = 450$ нм, $n = 1,64$ при $\lambda = 632$ нм;

SiO_2 : $d = 20$ нм, $n = 1,413$ при $\lambda = 632$ нм;

Ta_2O_5 : $d = (55–57)$ нм, $n = 1,76$ при $\lambda = 632$ нм;

TiO_2 : $d = (42–48)$ нм, $n = 1,97–2,04$ при $\lambda = 632$ нм;

SiO_2+C : $d = 95$ нм, $n = 1,2$.

Для получения максимального эффекта просветления для однослойных покрытий должно выполняться следующее условие: $n_1^2 = n_0 n_s$, где n_s – показатель преломления материала кристалла; n_1 – показатель преломления пленки, нанесенной на поверхность кристалла; n_0 – показатель преломления окружающей среды. Одновременно должно выполняться условие, что оптическая толщина просветляющего покрытия nd должна быть равна четверти длины волны, излучаемой кристаллом, т.е. $n_1 \cdot d = \lambda/4$, где $\lambda = 455$ нм [3].

Зависимости коэффициентов отражения от толщины просветляющих покрытий: $\text{SiO}_2 + \text{C}$, SiO_2 , TiO_2 , SiO_x и Ta_2O_5 на подложке из стекла приведены на рис. 1.

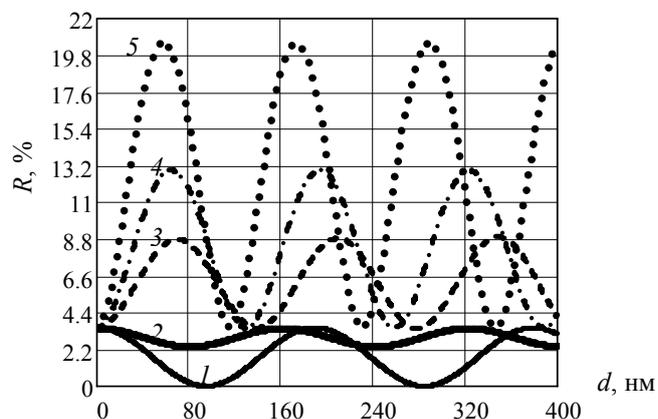


Рис. 1. Зависимость коэффициента отражения от толщины просветляющих покрытий (1 – $\text{SiO}_2 + \text{C}$, 2 – SiO_2 , 3 – SiO_x , 4 – Ta_2O_5 , 5 – TiO_2) на подложке из стекла

Спектральные характеристики были рассчитаны для подложки из стекла (рис. 2) и ниобата лития (рис. 3).

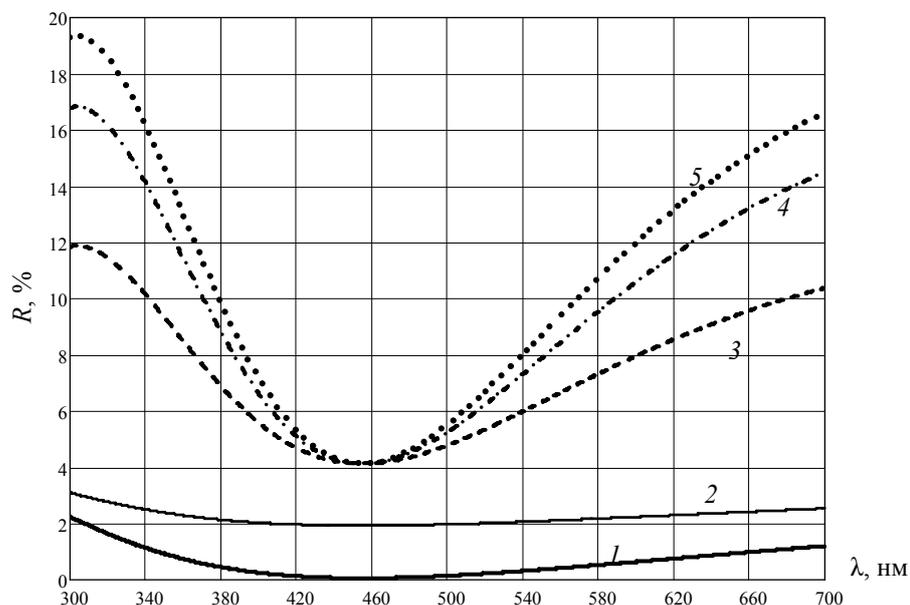


Рис. 2. Спектр отражения для подложки из стекла с различными просветляющими покрытиями (1 – $\text{SiO}_2 + \text{C}$, 2 – SiO_2 , 3 – Ta_2O_5 , 4 – SiO_x , 5 – TiO_2)

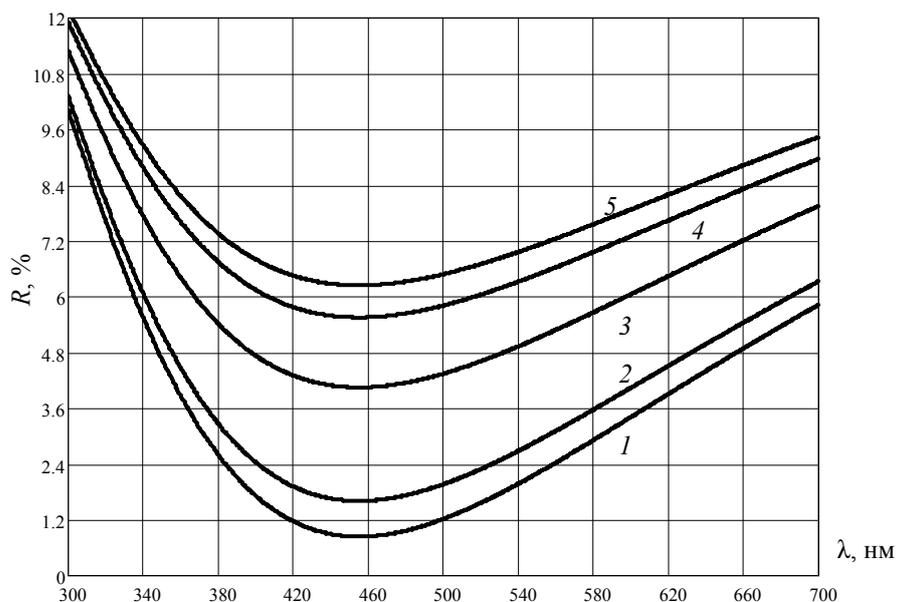


Рис. 3. Спектр отражения для подложки из LiNbO_3 с различными просветляющими покрытиями (1 – SiO_2+C , 2 – SiO_2 , 3 – Ta_2O_5 , 4 – SiO_x , 5 – TiO_2)

Для подложек из стекла оптическая толщина пленок с низким показателем преломления SiO_2 ($n = 1,41$) и SiO_2+C ($n = 1,2$) равна $\lambda/4$, а для пленок с высоким показателем преломления Ta_2O_5 ($n = 1,76$), TiO_2 ($n = 1,97$) и SiO_x ($n = 1,67$) оптическая толщина равна $\lambda/2$. Для подложек из ниобата лития все пленки имели оптическую толщину $\lambda/4$.

Лучшим просветляющим покрытием для подложки из стекла является $\text{SiO}_2 + \text{C}$ ($R = 0\%$). Коэффициент отражения пленки SiO_2 равен 2%. У пленок с высоким показателем преломления коэффициент отражения $R = 4,2\%$.

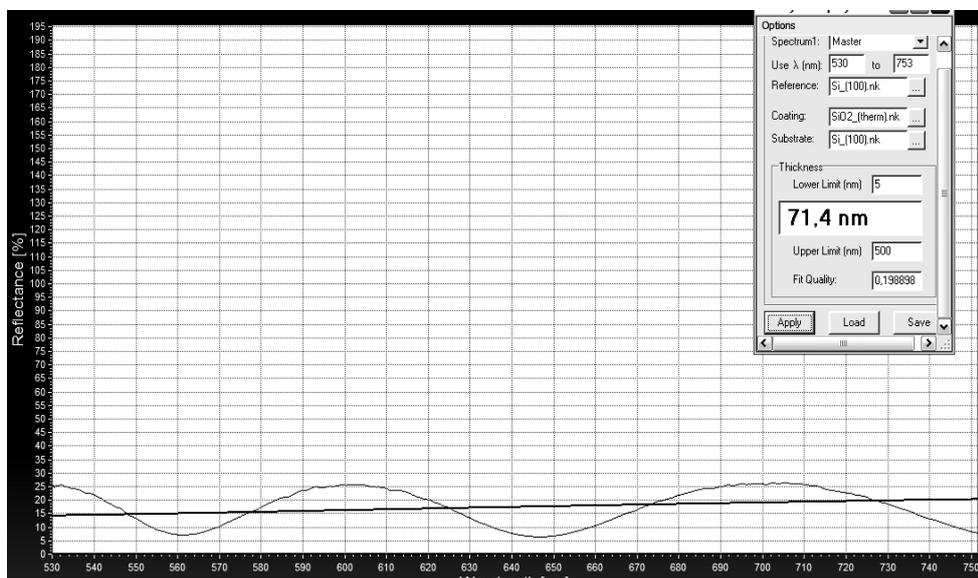


Рис. 4. Экспериментальная зависимость коэффициента отражения SiO_2 от длины волны

Лучшим просветляющим покрытием для подложки из ниобата лития является SiO_2 ($R = 0,8\%$).

Пленка с показателем преломления 1,55 имеет нулевое отражение. Пленка SiO_2+C в качестве просветляющего покрытия для LiNbO_3 не может использоваться.

Установлено, что наименьший коэффициент отражения ($R = 0,8\%$) имели пленки SiO_2+C и SiO_2 на подложках из стекла и ниобата лития.

Экспериментальная зависимость коэффициента отражения пленки SiO_2 на подложке GaN подтверждает результаты моделирования (рис. 4).

Таким образом, результаты моделирования оптических характеристик просветляющих покрытий хорошо подтверждаются экспериментами.

Литература

1. Гиро А.М. Новые материалы для тонкопленочных функциональных элементов электронной техники / А.М. Гиро, О.В. Гончарова, В.И. Курмашев и др. Минск: Наука и техника, 1994.
2. Ершов А.В. Просветляющие покрытия в оптоэлектронике. Проектирование, материалы, особенности технологии: Лабораторная работа по курсу «Физико-химические основы технологии» / А.В. Ершов, А.И. Машин. Н.Новгород: ННГУ, 2007. 28 с.
3. Arora N.D., Hauser J.R. Antireflection layer for GaAs solar cells // J. Appl. Phys. 1982. №53 (12). P. 8839–8845.

УДК 621.383.52

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОТОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК, МЕХАНИЗМОВ ДЕГРАДАЦИИ И СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛЮМИНОФОРОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ИЗЛУЧАЮЩИХ ДИОДОВ

О.Л. Роденко, В.А. Гуцин, П.Е. Сим, А.В. Мошкина

Исследованы фотометрические характеристики излучающих диодов, а также проведены исследования деградиционных процессов полупроводниковых светоизлучающих диодов. Определены коэффициент деградации и энергия активации, коэффициент неидеальности и дифференциальное сопротивление светоизлучающих диодов. Построена диаграмма направленности. Также исследованы спектральные характеристики двух люминофоров на иттриево-алюминиевом гранате (ИАГ-люминофоров).

Ключевые слова: светодиод, деградация, люминофор, фотометрические характеристики, функция чувствительности человеческого глаза.

Основой для построения современных полупроводниковых источников света служит излучающий кванты света $p-n$ -переход. Актуальность данной темы связана с революционным совершенствованием светодиодов. Не так давно светодиоды были всего лишь устройствами индикации, а сегодня это уже высокоэффективные источники света, которые могут заменить лампы накаливания в будущем. Улучшения в цене за люмен и качество освещения ярких светодиодов сопоставимы с законом Мура.

Активное развитие технологии изготовления светоизлучающих диодов (СИД) стало причиной экспоненциального увеличения их эффективности, удваивающейся каждые 36 месяцев начиная с 1960 г., подобно закону Мура (Мур высказал предположение, что число транзисторов на кристалле будет удваиваться каждые 24 месяца).

Измерение фотометрических характеристик излучающих диодов

Для исследования характеристик излучающих диодов был взят ряд красных и инфракрасных диодов (ИК-диодов) импортного и отечественного производства. По полученным данным были построены вольт-амперные характеристики шести исследуемых светоизлучающих диодов, представленные на рис. 1.

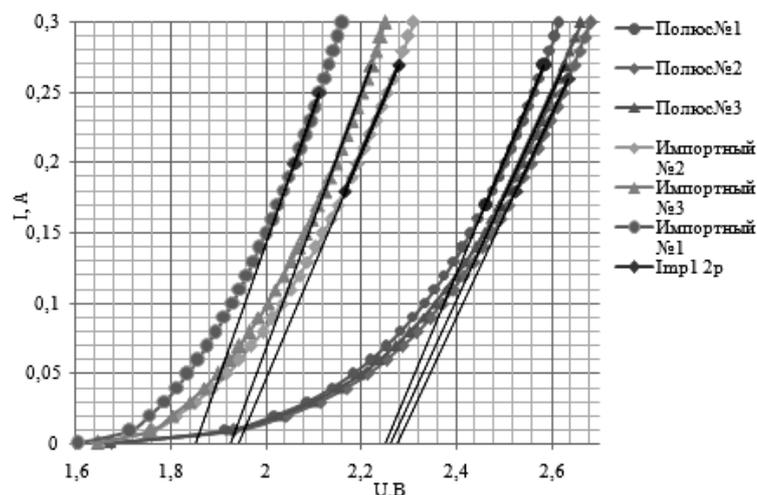


Рис. 1. Вольт-амперные характеристики красных светоизлучающих диодов

В соответствии с выражением для теоретического значения предполагаемой вольт-амперной характеристики $p-n$ -перехода, были вычислены коэффициенты неидеальности исследуемых светоизлучающих диодов. Уравнения касательных и результаты вычислений занесены в таблицу.

Уравнения прямых, пороговые напряжения, дифференциальные сопротивления и коэффициенты неидеальности

	Имп. 1	Имп. 2	Имп. 3	Полус 1	Полус 2	Полус 3
$y =$	$959,6x-1777$	$796,4x-1544$	$909x-1749$	$805,6x-1813$	$720,7x-1640$	$734,5x-1660$
$U_{пор}, В$	1,852	1,939	1,924	2,25	2,276	2,26
$R_{д}, Ом$	1,042	1,26	1,1	1,24	1,37	1,36
n	1,497	1,619	1,57	3,318	3,523	3,25

В ходе работы были исследованы излучающие диоды с характерной для них длиной волны $\lambda = 870$ нм. Для определения угла излучения мы воспользовались гониометрическим методом. По полученным экспериментальным данным была построена диаграмма направленности одного из образцов. Она представлена на рис. 2.

Угол α – угол, приводимый изготовителями диода, как угол наблюдения или угол излучения (viewing angle или radiation angle), определяемый по спаду силы света на 50%. Угол наблюдения для данного излучающего диода $\alpha = 12 + 15 = 27^\circ$ и телесный угол:

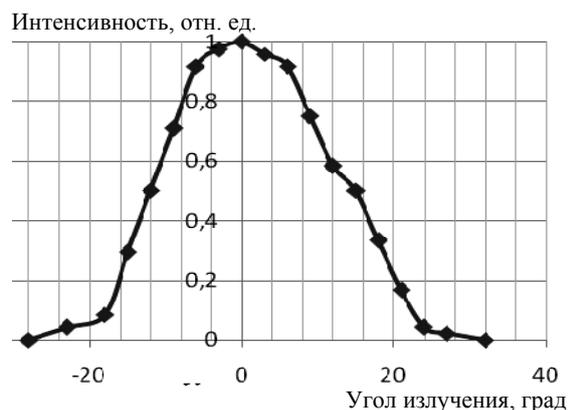


Рис. 2. Диаграмма направленности (10 нс, при токе диода 1 А)

$$\Omega = 2\pi(1 - \cos \frac{\alpha}{2}) = 0,174. \quad (1)$$

Полученные значения позволяют оценить световой поток и эффективность СИД при заданной силе света и прямом падении напряжения на них.

Спектральные характеристики люминофоров для светоизлучающих диодов

В настоящее время большинство производителей белых светодиодов используют в качестве желтого люминофора иттрий-алюминиевый гранат, легированный церием (ИАГ).

Для создания теплых белых светодиодов применяют смеси ИАГ и оранжевого или красного люминофора.

Исследовались два образца люминофоров: ФЛЖ-7-11 (производство Россия, ООО НПК «Люминофор») и АWB-3 (производство Тайвань) с толщинами 12 и 3,8 мкм соответственно. Исследуемые люминофоры были изучены с помощью растрового электронного микроскопа Hitachi TM-1000. Концентрация частиц люминофора в образце АWB-3 намного превышает концентрацию частиц в образце ФЛЖ-7-11. В образце АWB-3 частицы образуют большие и частые скопления. Размер частиц лежит в диапазоне (1÷10) мкм. В образце ФЛЖ-7-11 частицы располагаются реже и имеют размер (1÷5) мкм. Были получены спектры пропускания исследуемых образцов, полученные с помощью УФ-спектрометра USB-2000, и спектры возбуждения, полученные с помощью спектрометра Ava Ramon. Спектры пропускания образцов представлены на рис. 3.

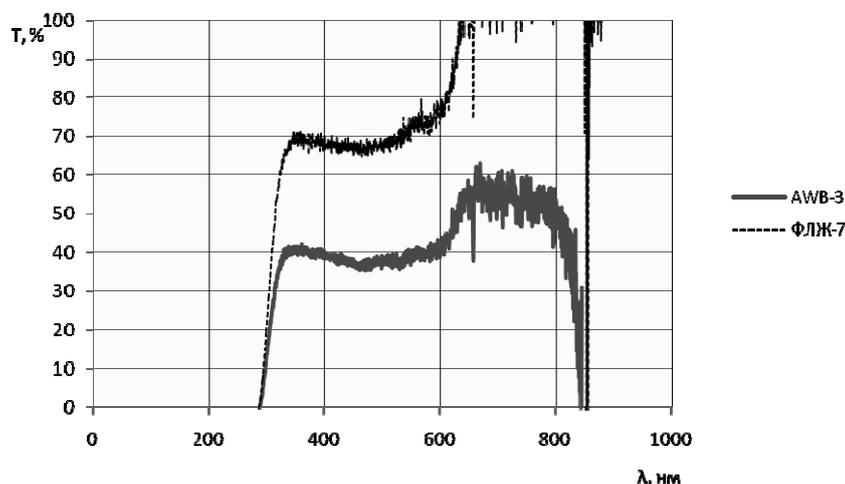


Рис. 3. Спектр пропускания образцов люминофоров ФЛЖ-7-11 и АWB-3

Края поглощения исследуемых образцов совпадают и равны длине волны 290 нм. Люминофор должен иметь малое пропускание на длине волны около 455 нм – синего света. Люминофор АWB-3 на этой длине волны пропускает 35%,

а ФЛЖ-7-11 – 65%. Полученные спектры поглощения представлены на рис. 4. Очевидно, что образец люминофора АWB-3 поглощает намного лучше, чем ФЛЖ-7-11.

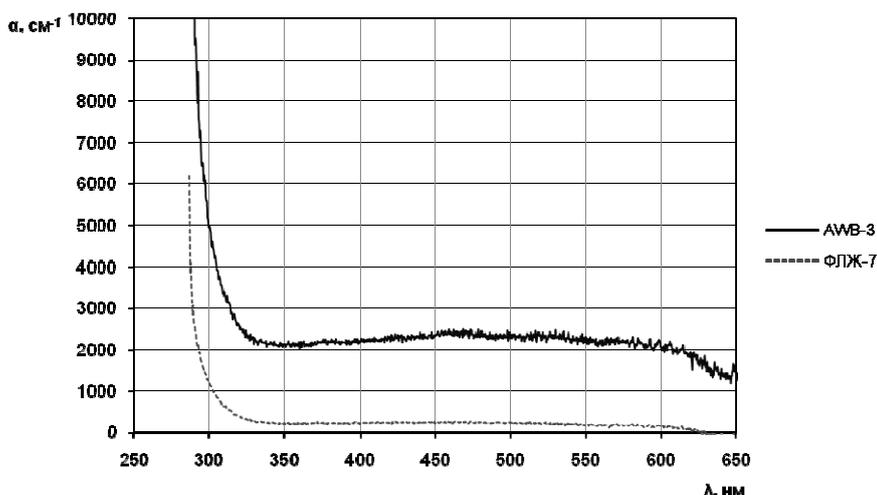


Рис. 4. Спектры поглощения образцов люминофоров ФЛЖ-7-11 и АWB-3

Также были получены спектры люминесценции исследуемых образцов, возбуждаемых синим светодиодом. Они представлены на рис. 5. Наличие нескольких максимумов в спектре свидетельствует о неоднородности фазового состава иттрий-гадолиниевого граната.

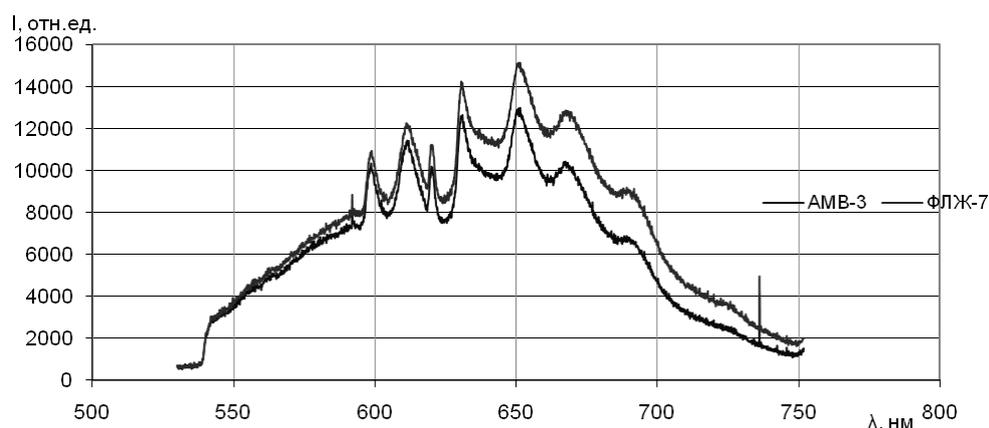


Рис. 5. Спектры излучения люминофоров АWB-3 и ФЛЖ-7 при возбуждении излучением светодиода синего свечения

Спектр излучения люминофора определяется в основном концентрацией и толщиной люминофора.

Исследование механизмов деградации светоизлучающих диодов

Целью следующего исследования являлось создание нового метода определения отказа светодиода, для чего вначале было необходимо исследовать деграционные процессы. Измерения производились на установке «Метроном-03»,

которая характеризуется широким диапазоном измерения токов, высокой точностью, низкими шумами.

Испытывались три синих светодиода фирмы KnightBright на основе GaN. В результате испытаний один из светодиодов вышел из строя после 216 ч наработки при повышенной плотности тока. Также были проведены испытания трех красных светодиодов фирмы KnightBright на основе Al-GaAs.

Также проводились испытания белого светодиода фирмы Semileds. С помощью нагревательного элемента увеличивали внешнюю температуру светодиода и измеряли вольт-амперные характеристики (ВАХ) с интервалом в 10°. Из семейства ВАХ видно, что при увеличении температуры ток, протекающий, через $p-n$ -переход, увеличивается. Из этого можно сделать вывод, что повышенные температуры ускоряют процесс деградации.

Из полученных вольт-амперных характеристик для синих и красных светодиодов построили графики зависимости увеличения прямого тока светодиодов со временем, из которых можно сделать вывод, что при увеличении подаваемого тока и времени наработки прямой ток через светодиод при фиксированном напряжении увеличивается. Ток, подаваемый на светодиоды при испытаниях, превысил допустимое значение (30 mA) в несколько раз. Соответственно, прямой ток вырос почти в два раза для красных и в тысячи раз для синих.

Далее построили зависимость температуры $p-n$ -перехода от подаваемой на светодиод мощности по следующей формуле:

$$T_{p-n} = P_{\text{вх}} \cdot R_t = I_{\text{вх}} \cdot U_{\text{вх}} \cdot R_t, \quad (2)$$

где R_t – тепловое сопротивление светодиода, равное 200 град/Вт.

По построенному графику можно судить о линейности зависимости температуры $p-n$ -перехода от подаваемой мощности. Максимальная температура перехода составила 285 °С при подаваемой мощности 1,43 Вт – для красных светодиодов и 231 °С при подаваемой мощности 1,16 Вт – для синих.

Для количественной оценки деградации красных и синих светодиодов введем величину, называемую коэффициентом деградации, который определяется по следующей формуле:

$$k = \frac{\Delta I}{\Delta I_0} \Big|_{\Delta U} = \text{const}, \quad (3)$$

где ΔI_0 – изменение тока на участке ВАХ, в диапазоне напряжений ΔU , до испытаний; ΔI – изменение тока на участке ВАХ, в диапазоне напряжений ΔU ; ΔU – диапазон напряжений, на котором измеряется коэффициент деградации (для синих светодиодов $\Delta U = 1,4-1,8$ В, для красных $\Delta U = 1,0-1,2$ В).

Зависимости коэффициента деградации от времени испытаний для красных (рис. 6), для синих (рис. 7) светодиодов представлены ниже.

Из графика рис. 6 можно судить о степени деградации красного светодиода. К концу испытаний коэффициент деградации достиг значения 1,9, что свидетельствует о том, что в данном светодиоде имеют место процессы деградации.

Из графика рис. 7 можно судить о степени деградации синего светодиода. К концу испытаний коэффициент деградации достиг огромного для светодиода значения, равного 450, что свидетельствует о том, что в данном светодиоде процессы деградации выражены сильнее, чем в красном.

Также было рассчитано значение энергий активации для синего и красного светодиодов по следующей формуле:

$$E_a = \frac{\ln\left(\frac{I}{I_0}\right) \cdot k \cdot T_{P-N}}{q}, \quad (4)$$

где значения I и I_0 находятся из вольт-амперных характеристик.

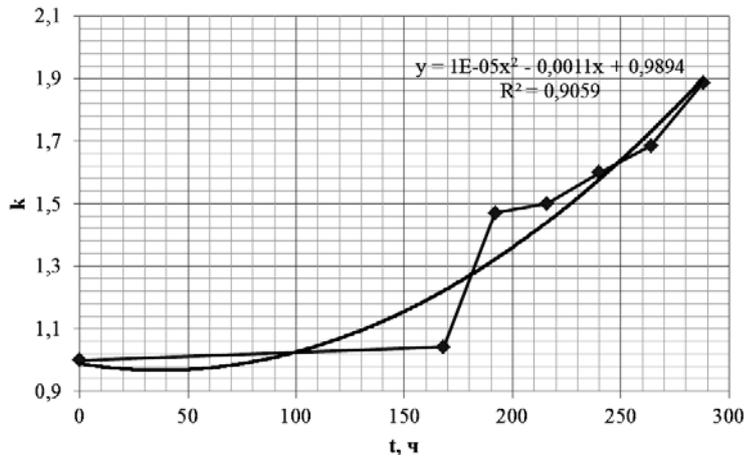


Рис. 6. Зависимость коэффициента деградации красного светодиода от времени испытаний

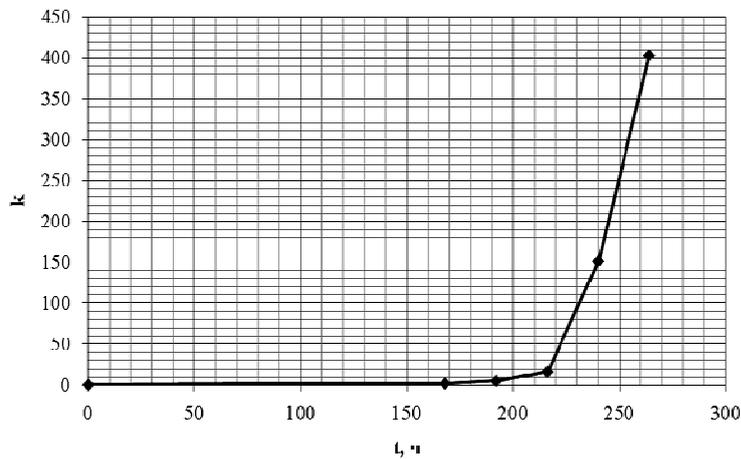


Рис. 7. Зависимость коэффициента деградации синего светодиода от времени испытаний

Для красных светодиодов значение энергии активации составило $E_a = 0,24$ эВ, а для синих – $E_a = 0,26$ эВ.

Результаты работы получены в соответствии с договором №7310 по Постановлению Правительства РФ №218.

Литература

1. Шуберт Ф.Е. Светодиоды / Ф.Е. Шуберт. 2-е изд. М.: Физматлит, 2008. 496 с.
2. Bugno P. Characterization and reliability of blue and white GaN-based LEDs submitted to current and thermal stress / P.Bugno. Anno Academico, 2010. 105 p.

УДК 004.4; 004.421.2

**ПРОГРАММА СИНТЕЗА И ВИЗУАЛИЗАЦИИ ТРЕХМЕРНЫХ
ОБЪЕКТОВ ИЗ ТОМОГРАФИЧЕСКИХ СРЕЗОВ МЕТОДОМ
ТРАССИРОВКИ ЛУЧЕЙ**

А.Н. Дымченко

Представлены программа и алгоритм визуализации данных томографического обследования методом трассировки лучей. Рассмотрена возможность применения передаточной функции. Приведены результаты замеров производительности визуализации (по числу кадров в секунду) объемного рендеринга на базе GPU и CPU от различного объема входных данных.

Ключевые слова: томография, объемный рендеринг, метод трассировки лучей.

Актуальность темы. Медицина на современном этапе из-за большого количества информации нуждается в применении компьютеров: в лаборатории при подсчете формулы крови, при ультразвуковых исследованиях, на компьютерном томографе, в электрокардиографии и т.д. Применение компьютерных технологий в медицине позволяет быстро и качественно проводить обследование пациента, диагностировать его состояние при наличии тревожных симптомов. В настоящее время все большая роль в диагностике патологий внутренних органов отводится томографическим методам исследования: компьютерной (КТ) и магнито-резонансной (МРТ) томографии, позволяющим реконструировать объемные структуры по множеству параллельных сечений.

Диагностические данные, полученные в результате томографического обследования пациента, являются наиболее значимыми для выбора тактики лечения пациента [2–4]. Для того чтобы воспринимать объемную структуру во всей ее совокупной сложности и видеть дефекты «умозрительной реконструкции» объектов по изображениям их сечений требуется большой опыт и воображение наблюдателя. В таких случаях хотелось бы представить орган так, как его увидел бы хирург или анатом. При этом на первый план выступает процесс зрительного восприятия объемного изображения, полученный в результате работы специализированных вычислительных процедур. Поэтому актуальной является задача разработки методов, алгоритмов и соответствующего программного обеспечения, позволяющего с высокой достоверностью визуализировать реконструированные анатомические структуры, а также выполнять обработку данных для получения необходимой диагностической информации.

Постановка задачи. Проведенный анализ доступных программных продуктов eFilm, MicroDicom, OsiriX, OnisViewer, 3DimViewer, RadiAnt, MultiVoxDI-COMViewer показал, что большинство программных средств не позволяют обеспечить работу с объемным представлением анатомических объектов, а также объединять в себе функции двумерной и трехмерной визуализации с соответст-

вующими возможностями автоматизированной и/или интерактивной постобработки первичных входных данных.

Под входным набором данных подразумевается множество плоских изображений слоев, полученное при компьютерной или магнитно-резонансной томографии. Обычно слои имеют равную толщину (например, фотографируется один слой на миллиметр) и равное количество пикселей на каждый слой.

Существенным недостатком представленных программных продуктов является еще и то, что они требуют наличия высокопроизводительной рабочей станции для обработки томографических изображений, также использование расширенного набора инструментов этих программных продуктов предполагает под собой значительные вычислительные ресурсы станции.

Объем одного исследования в медицинской томографии обычно равен 0,5–5 Гб.

Трехмерная визуализация методом прямого объёмного рендеринга

В научной литературе активно рассматриваются подходы, позволяющие решать задачи объемного рендеринга в реальном времени на основе параллельных вычислений и высокопроизводительной вычислительной техники. Предлагаются новые эффективные решения по интерактивным режимам выполнения задачи сегментации объема. Развитие GPU (графическое процессорное устройство) как вычислительных устройств в последние годы дало этому направлению новый значительный импульс и позволило говорить о мультиобъемном рендеринге в реальном времени [3]. Метод прямого объёмного рендеринга (техники, используемой для получения высококачественных объемных трехмерных изображений внутренних органов из дискретного набора плоских изображений слоев) позиционирует себя как эффективный инструмент для визуального анализа объёмных данных [1].

Объемный рендеринг является сложной вычислительной задачей, которую можно выполнить следующими способами:

- использованием алгоритма марширующих кубов;
- применением метода трассировки лучей.

Трассировка лучей (англ. raytracing) – технология построения изображения трёхмерных моделей, при которых отслеживается обратная траектория распространения луча (от экрана к источнику).

Наилучшего качества и информативности объёмного рендеринга позволяет достичь именно метод трассировки лучей, с его помощью можно визуализировать данные как набор изоповерхностей. Метод трассировки лучей характеризуется высокой скоростью работы, возможностью распараллеливания вычислений и большой гибкостью настройки параметров результирующего изображения [3].

Решение задачи объёмного рендеринга. Задачу рендеринга можно разделить на две части: расчет освещенности и построение вида. Первая служит для определения цвета вокселя на основе некоторых классификационных и передаточных функций, а также моделей освещенности, которые варьируются от простейших (пороговое отсечение, за которым следует выборка цвета по таблице и закраска с учетом глубины) до наиболее сложных (сегментация с последующим применением мультивариативной передаточной функции, учитывающей рассеивание) [4]. Вокселем называется элемент объёмного изображения, содержащий значение элемента раstra в трёхмерном пространстве. Воксели являются аналогами пикселей для трёхмерного пространства.

Объемный рендеринг сопоставляет значению каждого вокселя цвет и прозрачность. Это делается при помощи передаточной функции, которая может за-

даваться кусочно-линейной функцией или таблицей значений. Любому возможному значению исходных данных передаточная функция ставит в соответствие определённые оптические свойства.

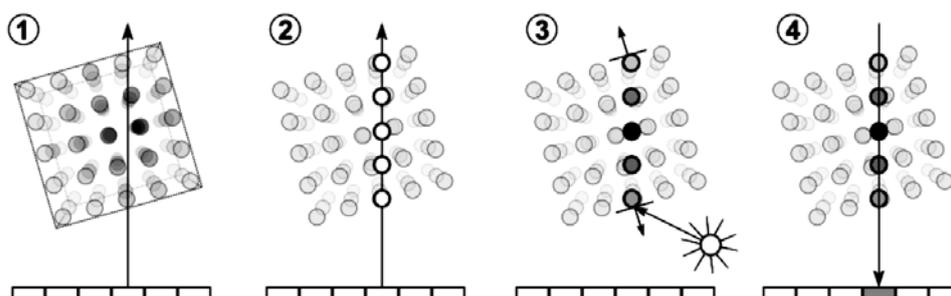


Рис. 1. Объемный рендеринг трехмерного изображения методом трассировки лучей

Для того чтобы выполнить объемный рендеринг трехмерного изображения методом трассировки лучей, необходимо:

1. Выполнить генерацию луча для каждого пикселя (рис. 1, 1, 2);
2. Сопоставить значению каждого вокселя цвет и прозрачность с использованием передаточной функции (рис. 1, 3);
3. Определение итогового цвета вокселя и составление результирующего трехмерного изображения (рис. 1, 4).

Можно раскрашивать пространство с данными в соответствии с функцией переноса, в результате получаются разноцветные затуманенные области (рис. 2, а, б).

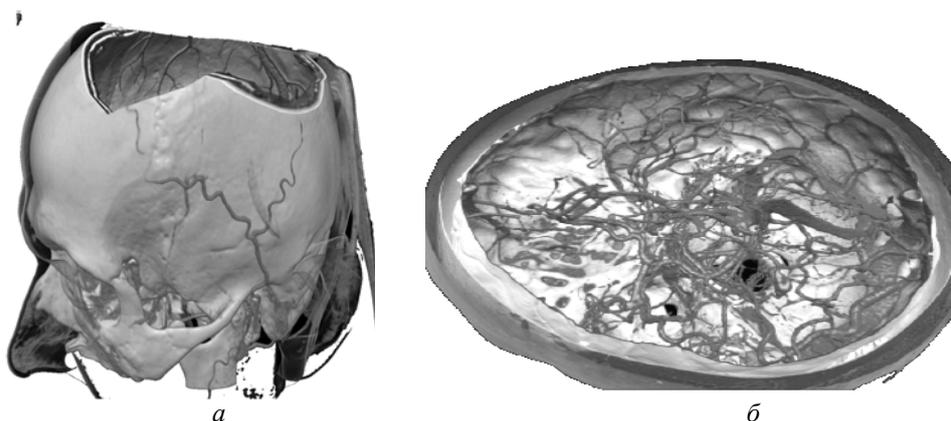


Рис. 2. Исоповерхности: а – для костей и кожи; б – для черепной коробки и кровеносных сосудов

При выполнении объемного рендеринга неизбежно появление артефактов. Для удаления артефактов вычисляем среднее изображение, полученное при различных (случайных) начальных позициях луча [5]. Случайный сдвиг луча вначале производится на величину $step \cdot RND01$, где $step$ – шаг луча (вектор), $RND01$ – случайное число из интервала $[0,1]$

Мультиобъемный рендеринг подразумевает совместное расположение в едином пространстве нескольких массивов пространственных данных, которые заданы в разных системах координат, и визуализацию множества полупрозрач-

ных изоповерхностей с использованием локального освещения и одномерных или двумерных передаточных функций.

Тестовые данные компьютерной томографии предоставлены ООО «Л.М.Э. «Биоток» (г. Томск, РФ), а также получены из интернет-ресурса [6]. Ниже представлена производительность объемного рендеринга в зависимости от размера данных и использования GPU или CPU (центральный процессор). Эксперимент проводился на видеокарте GeForce GT240 с процессором Intel Core i3 530 (табл. 1).

Таблица 1

Зависимость производительности объемного рендеринга на базе GPU, CPU от входного объема данных

Количество срезов	128	256	512	960
Размер изображения слоя, пиксель	128×128	256×256	515×512	512×512
FPS GPU	58	47	42	27
FPS CPU	23	18	6	2

Благодаря использованию GPU при выполнении объемного рендеринга увеличение размера объёмных данных менее сказывается на производительности, нежели при использовании CPU.

В табл. 2 представлена производительность мультиобъёмного рендеринга с различным количеством входных массивов пространственных данных (табл. 2). Входными данными являются результаты компьютерной томографии. Каждое изображение имеет разрешение 512×512 пикселей. Общее кол-во изображений для каждого массива данных ограничено 100 шт.

Таблица 2

Зависимость производительности мультиобъёмного рендеринга на базе GPU, CPU от входного объема данных

Количество массивов пространственных данных	2	3	4	5
FPS GPU	51	43	37	32
FPS CPU	16	10	8	4

В разработанном модуле визуализации выполняется отображение исходных и результирующих данных, а также реализуется возможность интерактивной коррекции, полученных на предыдущих этапах моделей. К двумерным методам визуализации относится алгоритм создания мультипланарных реконструкций (MPR), позволяющий выполнять формирование сечений исследуемого объекта произвольной плоскостью, задаваемой пользователем. Трёхмерное отображение томографических данных выполняется с помощью объёмной визуализации с возможностью вывода только выделенных структур, формирования частичного разреза. Также реализуются функции масштабирования, смещения и вращения визуализируемых объектов.

Заключение. Разработка и совершенствование программного обеспечения для визуализации томографических данных имеет большое практическое значение, так как от наглядности отображения информации во многом зависит правильность постановки диагноза и последующих лечебных мероприятий. При этом создание реалистичных трёхмерных изображений анатомических структур является основной задачей. Алгоритмическая основа разработанного программ-

ного обеспечения ориентирована на максимальную степень автоматизации с минимальным числом параметров, определяемых вручную. Интерфейс программного продукта должен моделировать логику пользователя, освобождая его от множества рутинных операций. Перспективой работы является разработка методологии и соответствующего программного обеспечения для проведения виртуального операционного планирования.

Литература

1. Real-Time Volume Graphics, SIGGRAPH-2004 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://old.vrvis.at/via/resources/course-volgraphics-2004/>, свободный (дата обращения: 03.09.2011).
2. Lorensen W.E. Marching Cubes: A high Resolution 3D surface Construction Algorithm: учеб. пособие / W. E. Lorensen and H. E. Cline. 1987. С. 163–169.
3. Flexible GPU-Based Multi-Volume Ray-Casting [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.yr.wtb.tue.nl/pdfs/9881.pdf>, свободный (дата обращения: 04.09.2011).
4. GPU-based Multi-Volume Rendering for the Visualization of Functional Brain Images [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.visus.uni-stuttgart.de/uploads/tx_vispublications/simvis06-roessler.pdf, свободный (дата обращения: 04.09.2011).
5. GPU-based Multi-Volume Rendering of Complex Data in Neuroscience and Neurosurgery [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.cg.tuwien.ac.at/research/publications/2009/beyer-2009-gpu/beyer-2009-gpu-paper.pdf>, свободный (дата обращения: 05.09.2011).
6. DICOM sample imagesets [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://pubimage.hcuge.ch:8080/>, свободный (дата обращения: 05.09.2011).

УДК 621.373.1

РАЗРАБОТКА ФУНКЦИОНАЛЬНОГО ГЕНЕРАТОРА ДЛЯ ТЕСТИРОВАНИЯ РЕГИСТРАТОРОВ ЭКГ

С.П. Шкаруно

Предложена конструкция функционального генератора для тестирования регистраторов ЭКГ. Описаны характеристики генератора, его особенности.

Ключевые слова: функциональный генератор, ЭКГ, регистратор.

Для тестирования регистраторов ЭКГ необходим специализированный генератор, сегодня таких специализированных генераторов в России не производится. Тестирование регистратора можно проводить универсальным генератором, но в них нет сигнала ЭКГ. Для решения данного недостатка универсальный генератор необходимо перепрограммировать при условии, что стоимость данных устройств очень высока, вследствие этого поставлять данный генератор с комплексом регистратора экономически не выгодно.

Цель работы: разработать функциональный генератор для тестирования регистраторов ЭКГ.

В данной статье представлена разработка генератора, удовлетворяющего этим условиям. Генератор (рис. 1) выполнен на 8 битном микроконтроллере фирмы STM8L152C6 [1]. Для реализации возможности подключения генератора к персональному компьютеру, через порт USB установлен контролер USB-FIFO.

В качестве контроллера USB-FIFO был установлен FT245R [2]. Подключение устройства к компьютеру необходимо для того, чтобы в память контроллера записывать дополнительный сигнал любой формы. После записи сигнал, записанный с компьютера, можно воспроизвести.

Тестовые сигналы (табл. 1) воспроизводятся встроенным в микроконтроллер 12 битным цифроаналоговым преобразователем.

Таблица 1

Основные тестовые сигналы

Наименование	Амплитуда, мВ	Частота, Гц
Прямоугольный	1	2,5
Прямоугольный 2	4	0,1
Синусоида	5	10
Сигнал ЭКГ	2	0,75

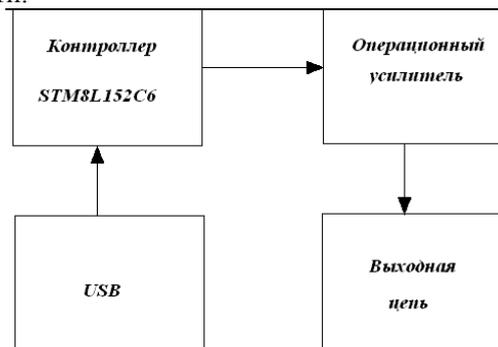


Рис. 1. Блок-схема генератора

Для записи сигнала в генератор использовалась бесплатная программа D2xharr (рис. 2).

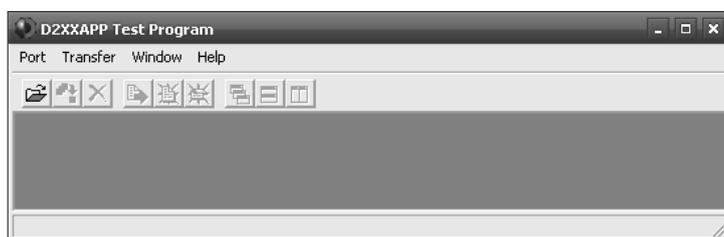


Рис. 2. Внешний вид программы D2xharr

Разработанный генератор (рис. 3) успешно выдержал тестирования и зарекомендовал себя только с хорошей стороны, к достоинством его относятся также низкая себестоимость и простота в использовании.

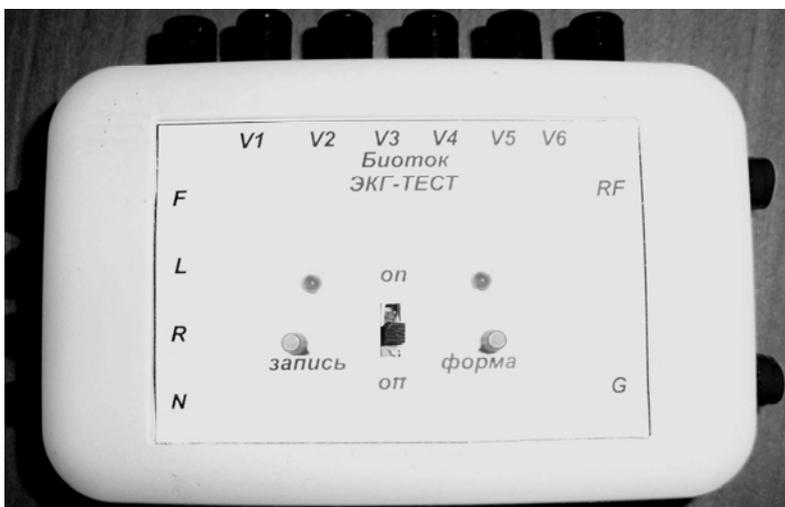


Рис. 3. Внешний вид разработанного генератора

В генераторе используется операционный усилитель для согласования выхода цифроаналогового преобразователя с выходной цепочкой. Также им выставляется значение амплитуды выходного сигнала.

Выходная цепочка (рис. 4) представляет собой цепочки, состоящие из резисторов и конденсаторов. Они служат для имитации человеческого тела – в нём имеются определённая ёмкость и сопротивление.

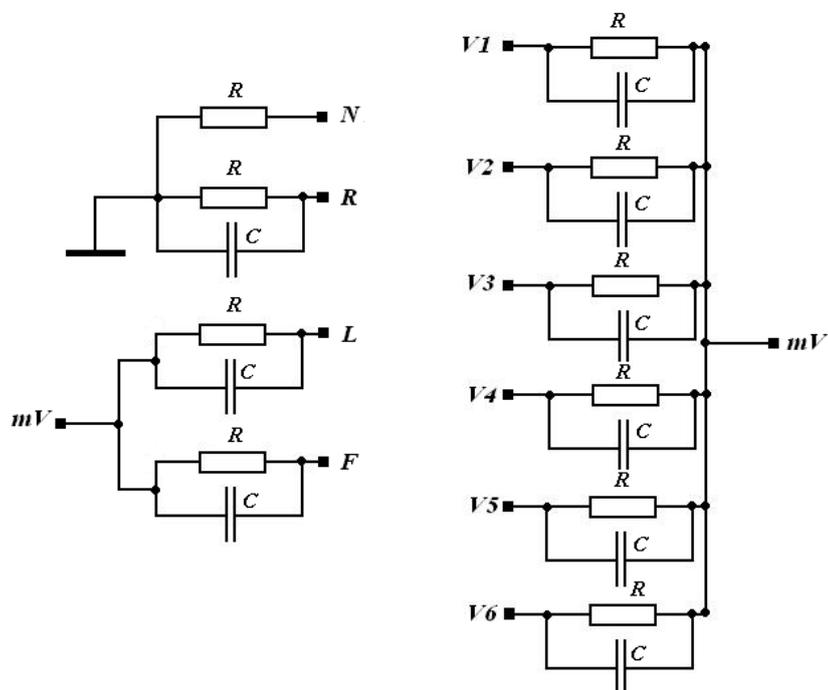


Рис. 4. Выходная цепь

Таблица 2

Основные характеристики функционального генератора

Параметр	Значение
Напряжение питания, В	3
Ток потребления, мА	20
Диапазон частот тестовых сигналов, Гц	0,1–10
Максимальный загружаемый объём файла сигнала, кБ	1

Разработанный функциональный генератор готовится к серийному производству на фирме, специализирующейся по производству кардиологического оборудования.

Литература

1. Техническая документация STM8L152 [Электронный ресурс]. <http://www.st.com/internet/mcu/product/244063.jsp>, свободный (дата обращения: 25.08.11).
2. Техническая документация FT245R [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.electroy.tistory.com/attachment/kk4.pdf>, свободный (дата обращения: 25.08.11).
3. ГОСТ Р 50267.0–92 Изделия медицинские электрические. Общие требования безопасности.

**АВТОМАТИЗАЦИЯ И ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ**

*Председатель секции – Кориков Анатолий Михайлович,
д.т.н., профессор, зав. каф. АСУ,
зам. председателя – Горитов Александр Николаевич,
д.т.н., профессор каф. АСУ*

УДК 004.5

**ЧЕЛОВЕКО-МАШИННОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ –
ПРОШЛОЕ И НАСТОЯЩЕЕ**

А.П. Бойко

Статья представляет собой обзор существующих решений в области человеко-машинного взаимодействия. Рассмотрены основные вехи развития человеко-машинного интерфейса. Изучены современные концепции и подходы к разработке натуральных интерфейсов.

Ключевые слова: человеко-машинное взаимодействие, человеко-машинный интерфейс, распознавание образов, распознавание жестов, дополненная реальность.

Основные понятия. Человеко-компьютерное взаимодействие – полидисциплинарное научное направление, существующее и развивающееся в целях совершенствования методов разработки, оценки и внедрения интерактивных компьютерных систем, предназначенных как для использования человеком, так и для исследования различных аспектов этого использования.

Человеко-машинный интерфейс (интерфейс пользователя) – разновидность интерфейсов, в котором одна сторона представлена человеком (пользователем), другая – машиной/устройством. Представляет собой совокупность средств и методов, при помощи которых пользователь взаимодействует с различными, чаще всего сложными, машинами, устройствами и аппаратурой.

История развития интерфейсов для человеко-машинного взаимодействия. Первые компьютеры, датированные концом 40-х годов, поддерживали ввод информации с использованием одновременно и перфокарт, и телетайпов [1]. В 60-х годах с появлением первых видеотерминалов, позволявших в реальном времени отображать вводимую и выводимую информацию, основным способом общения человека с компьютером окончательно стал текстовый ввод. Безусловно, в те времена еще не существовало графических интерфейсов, а для работы в текстовом режиме было достаточно примитивной клавиатуры.

После изобретения операционной системы с разделением времени в 1963 г., и особенно после того, как в 1978 г. был изобретен микрокомпьютер, началось бурное развитие интерфейсов, обеспечивающих связь человека с компьютером.

9 декабря 1968 г. компьютерная мышь была представлена на демонстрации интерактивных устройств в Калифорнии [2]. Первым компьютером, в комплект которого включалась мышь, был мини-компьютер Xerox 8010 Star Information System, представленный в 1981 г. В 1983 г. фирма Apple выпустила свою собственную модель однокнопочной мыши для компьютера Lisa. Широкую популяр-

ность мышь приобрела благодаря использованию в компьютерах Apple Macintosh и позднее в ОС Windows для IBM PC совместимых компьютеров.

В 1987 г. компания IBM создала клавиатуру IBM Enhanced 101 Key Keyboard, которая была провозглашена стандартом. Этот тип клавиатуры не был первым стандартом, но стал наиболее подходящим для пользователей ПК. Первоначальная модель IBM – клавиатура XT, имела 83 кнопки. Следующим проектом IBM стала клавиатура AT, она была несовместима с проектом XT. В определенный момент времени рынок подтолкнул компанию к модернизации своей AT клавиатуры, и они представили новый расширенный образец клавиатуры, которая была совместима с оригиналом AT модели, но имела абсолютно другое расположение клавиш, которым сегодня пользуются миллионы людей по всему миру [3].

Первый в мире трекбол изобрели для Канадского королевского флота в 1952 г. Группа канадских инженеров из Торонто: Том Крэнстон, Фрэд Лонгстафф и Кеньён работали над вычислительной системой DATAR, где требовалось устройство, с помощью которого оператор мог указать на точку на экране [4]. Однако разработка трекбола, будучи неоцененной никем, незаметно вышла из военных структур. О нем вспомнили, только когда развитие компьютерной техники привело к необходимости создания устройства для управления и позиционирования курсора. Трекболы получили распространение в ПК в компьютерных видеоиграх, особенно с появлением аркадных игр (в частности, игры Atari: Centipede, Missile Command и Football, последняя из которых выпущена в 1978 г.).

Первый графический планшет, похожий на современные, использовался для распознавания рукописного ввода компьютером Stylator в 1957 г. Более известный и часто ошибочно именуемый первым, графический планшет RAND Tablet также известен как «Графакон» (ГРАФический КОНвертер), представленный в 1964 г. Графические планшеты популяризовались коммерческим успехом в середине 70-х – начале 80-х ID (Intelligent Digitizer) и BitPad выпускаемых Summagraphics Corp. Эти планшеты использовались как устройство ввода для множества high-end CAD (Computer Aided Design) систем, соединенных с ПК и ПО вроде AutoCAD [5]. В 1981 г. музыкант Тодд Рангрен создал ПО для первого цветного графического планшета для персональных компьютеров, которое было лицензировано Apple, как система Utopia Graphics Tablet System [6].

В 1952 г. в Массачусетском технологическом институте в рамках проекта Whirlwind было создано первое световое перо. Умеренную популярность перо приобрело в начале 80-х благодаря использованию в Fairlight CMI и BBC Micro. Техническая реализация светового пера не позволяет его использовать с ЖК-мониторами, однако компании Toshiba и Hitachi ведут разработки в данной области, что было продемонстрировано на шоу «Display 2006» в Японии [7].

В 1988 г. Джордж Герфайде изобрел сенсорную панель (тачпад). Фирма Apple лицензировала его проект и начала использовать его в своих ноутбуках PowerBook начиная с 1994 г. С тех пор тащпад стал наиболее распространенным устройством управления курсором для ноутбуков. До тащпадов в ноутбуках использовались трекпоинты и трекболы. Как и другие указательные устройства, тащпад обычно используется для управления «указателем» путем перемещения пальца по поверхности устройства.

Сенсорный экран изобрели в США в рамках исследований по программированному обучению. Компьютерная система PLATO IV, появившаяся в 1972 г., имела сенсорный экран на сетке ИК-лучей, состоявший из 16×16 блоков. Но да-

же столь низкая точность позволяла пользователю выбирать ответ, нажимая в нужное место экрана. В 1971 г. Сэмюэлем Херстом (будущим основателем компании Elographics, ныне Elo TouchSystems) был разработан элограф – графический планшет, действовавший по четырёхпроводному резистивному принципу. В 1974 г. он же сумел сделать элограф прозрачным, в 1977 – разработал пятипроводной экран. Объединившись с Siemens, в Elographics сумели сделать выпуклую сенсорную панель, подходившую к кинескопам того времени. На Всемирной ярмарке 1982 г. Elographics представила телевизор с сенсорным экраном. В 1983 г. вышел компьютер HP-150 с сенсорным экраном на ИК-сетке. Впрочем, в те времена сенсорные экраны применялись преимущественно в промышленной и медицинской аппаратуре.

В потребительские устройства (телефоны, КПК и т.д.) сенсорные экраны вошли как замена крохотной клавиатуре уже в XXI в., когда появились устройства с большими (во всю переднюю панель) ЖК-экранами. Первая карманная игровая консоль с сенсорным экраном – Nintendo DS, первое массовое устройство, поддерживающее мультитач, – iPhone [8].

Современные исследования в области человеко-машинного взаимодействия. Миновав 6 лет после выхода фильма «Особое мнение», несколько неудачных попыток имитации системы управления интерфейсом (которой пользовался Джон Андертон), компанией Stark Oblong Industries была наконец-то создана «G-Speak» – система объектно-ориентированного управления визуальными элементами интерфейса. Оператору приходится надевать перчатки с датчиками на кончиках пальцев, позволяющими делать все действия, махая руками: перетаскивать изображения между экранами, увеличивать/уменьшать/поворачивать. Система разработана для анализа больших наборов данных, интеграции нескольких компьютеров в комнату в масштабируемое окружение, построения 3-мерного интерфейса и разработки масштабируемых крупных приложений, которые запускаются интерактивно внутри корпоративной сети [9].

В июне 2008 г. начались продажи OCZ Neural Impulse Actuator (преобразователь нейронных импульсов). Этот прибор считывает биоэлектрические и механические сигналы головного мозга человека и преобразует их в пригодные для обработки электрические сигналы для создания интерфейса с компьютером. NIA разработан американской компанией OCZ Technology и является первым в мире коммерческим продуктом в своём роде. Основным преимуществом NIA по сравнению со стандартными контроллерами и манипуляторами является существенное сокращение времени реакции от приблизительно 200 мс для компьютерной мыши до примерно 80–150 мс при использовании NIA.

1 июня 2009 г. на выставке E³ компанией Microsoft был впервые представлен Kinect. Kinect (ранее Project Natal) – игровой «контроллер без контроллера» для Xbox 360, основанный на добавлении периферийного устройства к игровой приставке Xbox 360, Kinect позволяет пользователю взаимодействовать с ней без помощи игрового контроллера через устные команды, позы тела и показываемые объекты или рисунки. Судя по недавнему патенту Microsoft, Kinect будет способен распознавать язык жестов. Пока патент касается только ASL, но, возможно, другие языки будут добавлены позже.

В 2011 г. на выставке Interaction 2011 была продемонстрирована перчатка, разработанная группой исследователей из университетов Osaka и Shinshu. Перчатка позволяет обеспечить взаимодействие пользователя с компьютером посредством движения пальцев. В данный момент перчатка используется для пре-

образования жестов в текст и может быть использована людьми с ограниченными возможностями [10].

На выставке CES 2011 компания под названием National Instruments продемонстрировала свою технологию, позволяющую управлять курсором только при помощи движений глаз. Принцип действия технологии – улавливание движения мышц, поворачивающих глаз, что само по себе выглядит не слишком удобным [11]. После этого на выставке CeBIT компания Tobii совместно с Lenovo продемонстрировала прототип ноутбука, который отслеживает движения человеческих глаз и использует эти данные для управления машиной. Однако позднее Tobii начала действовать самостоятельно и анонсировала устройство PCEye, оно подключается по USB-интерфейсу и фиксируется на креплении VESA в нижней части монитора. После непродолжительной процедуры калибровки PCEye настраивается на пользователя и предоставляет ему возможность полноценного управления компьютером.

Что нас ждет в будущем? Основной задачей человеко-компьютерного взаимодействия является улучшение взаимодействия между человеком и компьютером, делая компьютеры более удобными и восприимчивыми к потребностям пользователей.

Исследователи компании Microsoft изложили свое видение интерфейсов будущего в докладе «Being Human: Human-Computer Interaction in the year 2020» [12]. По их прогнозам уже через 12 лет исчезнет необходимость в клавиатурах, мышках и даже компьютерных мониторах – в том виде, в котором они существуют сейчас. Более того, сами понятия «пользователь» и «интерфейс» станут бессмысленными архаизмами. На смену клавиатурам и мышкам придут тачскрины и системы распознавания речи. Взаимодействие с компьютерами выйдет на качественно новый уровень, и мы видим, что уже сейчас сделаны первые шаги в этом направлении.

Новое поколение людей будут взаимодействовать с компьютерами так же естественно, как сейчас мы разговариваем. Человеку необязательно при этом даже осознавать присутствие компьютера, как сейчас в процессе разговора мы не осознаём присутствие органов речи.

Бесконтактные интерфейсы стремительно развиваются, захватывая все новые и новые сферы рынка. Такого поворота событий не могли представить себе даже фантасты, мечтающие о голосовом управлении. Однако голосовой интерфейс и настольный компьютер – вещи несовместимые. Во-первых, бесшумные средства ввода более предпочтительны как в офисе, так и дома. Во-вторых, голосовой ввод представляет собой прямую разновидность командной строки, совершенно не вписывающейся в общепринятую оконную концепцию взаимодействия с компьютером, когда намного проще ткнуть в нужный пункт меню, чем озвучить его словами. В-третьих, голосовые системы управления изначально подвержены большому количеству ошибок, возникающих как вследствие нечеткой дикции оператора, так и посторонних помех. Попытки разместить несколько машин с голосовым интерфейсом в одном офисе до сих пор заканчивались неизбежным провалом [13].

Литература

1. История эволюции компьютерных манипуляторов [Электронный ресурс]. Режим доступа http://ux-news.ru/analytics/detail_history_of_the_evolu/ свободный (дата обращения: 06.06.2011).

2. Times: завтра исполняется 40 лет компьютерной мыши [Электронный ресурс]. Режим доступа http://www.gazeta.ru/news/lenta/2008/12/08/n_1305515.shtml свободный (дата обращения: 01.06.2011).
3. История и происхождение компьютерной клавиатуры [Электронный ресурс]. Режим доступа http://ergosolo.ru/reviews/history/keyboard_born/ свободный (дата обращения: 01.08.2011).
4. Трекбол [Электронный ресурс] / Сафронов В.В. Режим доступа <http://russika.ru/t.php?t=4372> свободный (дата обращения: 05.07.2011).
5. Графический планшет [Электронный ресурс] // Википедия – свободная энциклопедия. Режим доступа [http://ru.wikipedia.org/wiki/ Графический_планшет](http://ru.wikipedia.org/wiki/Графический_планшет) свободный (дата обращения: 01.08.2011).
6. Графический планшет [Электронный ресурс] // Википедия – свободная энциклопедия. Режим доступа http://en.wikipedia.org/wiki/Graphics_tablet свободный (дата обращения: 01.08.2011).
7. Световое перо [Электронный ресурс] // Википедия – свободная энциклопедия. Режим доступа http://en.wikipedia.org/wiki/Light_pen свободный (дата обращения: 01.08.2011).
8. Тачскрин [Электронный ресурс] // Википедия – свободная энциклопедия. Режим доступа [http://ru.wikipedia.org/wiki/ Тачскрин](http://ru.wikipedia.org/wiki/Тачскрин) свободный (дата обращения: 01.08.2011).
9. Когда «особое мнение» становится аксиомой [Электронный ресурс] // Хаб-рахабр. Режим доступа <http://habrahabr.ru/blogs/cyberpunk/44835/> свободный (дата обращения: 01.08.2011).
10. Fingual – Finger-Language Interface Device [Электронный ресурс]. Режим доступа <http://www.diginfo.tv/2011/03/16/11-0065-r-en.php> свободный (дата обращения: 01.08.2011).
11. Управление взглядом [Электронный ресурс]. Режим доступа <http://mgnews.ru/read-news/upravlenie-vzglyadom-1101101237> свободный (дата обращения: 01.08.2011).
12. Welcome to Being Human: Human-Computer Interaction in the Year 2020 [Электронный ресурс] // Microsoft Corporation. Режим доступа <http://research.microsoft.com/hci2020> свободный (дата обращения: 01.08.2011).
13. Бесконтактные интерфейсы: компьютер под управлением взгляда [Электронный ресурс]. Режим доступа <http://www.itspecial.ru/post/10139/> свободный (дата обращения: 01.08.2011).

УДК 004.627

МОДЕЛИ СЖАТИЯ ДАННЫХ

О.О. Евсютин

Рассматриваются существующие модели сжатия данных различного типа. Особое внимание уделяется цифровым изображениям, в том числе приводятся отличительные особенности данных такого типа в контексте задачи сжатия.

Ключевые слова: сжатие данных, кодирование, тип данных, избыточность, модель сжатия, цифровое изображение, преобразование информации.

Введение. Сжатие (компрессия) данных является достаточно важной задачей даже при современном уровне развития вычислительной техники. Конечно, емкость и доступность носителей информации, а также пропускная способность

каналов передачи постоянно возрастают, однако наряду с этим увеличиваются и требования пользователей к объемам передаваемых данных, качеству изображений, видео и звука. Таким образом, возможности современных информационных технологий не остаются невостребованными.

В контексте рассматриваемой проблемы выделяют несколько типов данных, для каждого из которых разработаны свои собственные методы сжатия. Базовым типом являются произвольные данные, не обладающие никакими особенностями и представляющие собой последовательности символов некоторого алфавита, т.е. тексты на естественном или искусственном языке.

Возможность сжатия текстовых данных определяется наличием в них статистической избыточности, которая заключается в том, что отдельно взятые символы алфавита могут встречаться в тексте различное число раз, а также могут повторяться последовательности символов. В связи с этим существует два класса методов сжатия текстовых данных: статистические и словарные [1].

Кодирование Хаффмана. Основная идея статистического сжатия текстовых данных заключается в том, что использование кодов равной битовой длины для представления символов алфавита будет приводить к избыточности всегда, когда частоты встречаемости символов в тексте различны, поэтому часто встречающимся символам необходимо присваивать коды меньшей длины, редко встречающимся – большей. Классическим методом статистического сжатия является кодирование Хаффмана, математическая модель которого выглядит следующим образом.

A – конечное множество используемых для исходного кодирования информации знаков, представляемых кодами равной битовой длины. В общем случае $A = \{0,1\}^n$;

P – множество значений вероятности появления символов алфавита в подлежащем сжатию тексте. При этом $P \subset R$ и $\sum_{i=1}^{2^n} p_i = 1$, где $|P| = 2^n$, $p_i \in P$, $i = \overline{1, 2^n}$;

K – множество префиксных кодов переменной битовой длины, которые построены таким образом, что ни для одной пары кодов $k_1, k_2 \in K$ не выполняется соотношение $k_1 = k_2 \| a$, где a – некоторая битовая строка, а $\|$ – операция конкатенации битовых строк. $K = \bigcup_{i=1}^l \{0,1\}^i$, где $l \in Z$, кроме того, $|A| = |P| = |K| = 2^n$.

В таком случае множество исходных текстов и множество сжатых текстов определяются, соответственно, как $X = \bigcup_{j \in N} A^j$, $Y = \bigcup_{j \in N} K^j$;

$C: A \times P \rightarrow K$ – замена символов исходного текста кодами неравной длины в зависимости от вероятности их появления в тексте; $D: K \times P \rightarrow A$ – обратное преобразование.

Множество кодов K задается двоичным деревом Хаффмана, которое строится на основе множества значений вероятности появления символов алфавита. Таким образом, множество K не является входным параметром рассматриваемой модели.

Рассматриваемый метод сжатия будет наиболее эффективным, если $\forall p \in P$ выполняется $p_i = \frac{1}{2^i}$, $i = \overline{1, 2^n}$.

Словарное сжатие. Словарное сжатие основано на несколько ином подходе и является наиболее эффективным по сравнению со статистическим сжатием в том случае, когда частоты встречаемости символов алфавита в тексте приблизительно совпадают, но данные обладают избыточностью за счет наличия повторяющихся последовательностей символов. В этом случае единицей данных по отношению к процессу компрессии становится некоторая последовательность символов произвольной длины – слово. Сжатие осуществляется путем поиска в тексте повторяющихся слов и их последующего кодирования.

Данный класс методов сжатия представлен семейством алгоритмов Лемпеля–Зива и их различными модификациями.

Математическую модель словарного сжатия можно описать следующим образом.

A – исходный алфавит; $S = \bigcup_{i \in N} A^i$ – множество слов в символах алфавита A ;

K – множество кодов, имеющих в общем случае одинаковую битовую длину,

$K = \{0, 1, \dots, 2^l - 1\}$, $l \in N$; $C: S \rightarrow K$ – замена слов, найденных в подлежащем сжа-

тию тексте, словарными кодами; $D: K \rightarrow S$ – обратное преобразование.

Современные алгоритмы сжатия текстовых данных строятся на основе объединения статистических и словарных методов [2].

Цифровые изображения. Следующий тип данных, для которого очень важной является задача сжатия, – это цифровые изображения, которые математически описываются достаточно просто.

A – множество значений пикселей, в общем случае $A \subset Z$ и $|A| = 2^n$, $n \in \{1, 2, 4, 8, 24\}$. Однако в случае цветных изображений, основанных на модели

RGB, имеет смысл представить данное множество в виде $A = C^3$, где C – множество значений одной цветовой компоненты.

P – матрица размера $m \times n$, элементы которой принимают значения из множества A .

Для представления цифровых изображений требуется объем памяти на порядок больше, чем для текстовых данных, что определяет важность задачи сжатия данных такого типа. Однако для сжатия изображений методы статистического и словарного сжатия являются неприменимыми, поскольку избыточность, наличествующая в изображениях, носит совсем другой характер, нежели в текстах [3].

Сравнение цифровых изображений с текстовыми данными позволяет сделать следующие выводы:

1. Текст воспринимается как одномерная строка символов, а изображение является двумерным.

2. Символы текста обычно принимают значения из достаточно небольшого множества, такого, как таблица ASCII, состоящая из 256 элементов, каждый из которых кодируется одним байтом. В свою очередь, наиболее распространенные непрерывно-тоновые изображения строятся с использованием 2^{24} цветов, поэтому подсчет частот встречаемости различных цветов или поиск одинаковых последовательностей пикселей не дадут никакого эффекта.

3. Практически невозможно удалить из текста часть информации, так чтобы это осталось незамеченным. Однако из изображения вполне возможно удалить

часть информации, осуществив, например, подвыборку пикселей. До определенного момента человеческое зрение будет неспособно различить отличия.

4. Сжатие, по сути, заключается в компактном представлении данных за счет того, что некоторые их элементы коррелируют друг с другом. Однако, рассматривая произвольный текст, мы не можем предполагать, что эта корреляция распространяется именно на соседние элементы. Одинаковые последовательности символов могут встречаться в любых участках текста. Поэтому методы сжатия текстовых данных опираются на неявное предположение, что соседние символы текста никак не связаны между собой.

Цифровые изображения, напротив, обладают важнейшей с точки зрения сжатия особенностью: с высокой степенью вероятности соседние пиксели в пределах некоторой локальной области имеют одинаковые или близкие цвета. Это достаточно очевидный факт, и трудно привести пример полезного изображения, у которого все соседние пиксели будут резко отличаться друг от друга.

Избыточность такого типа, присущая лишь изображениям, получила название пространственной. В связи с этим для сжатия изображений был разработан абсолютно новый подход, заключающийся в устранении из изображения корреляции между пикселями посредством специального преобразования и дальнейшего статистического кодирования преобразованных данных.

Устранить такую корреляцию можно, выделив усредненное значение, к которому стремятся коррелированные пиксели, и записав их отклонения от него. Такого рода преобразования относятся к частотным методам обработки изображений. Усредненные значения пикселей соответствуют огрубленному представлению изображения и называются низкочастотными составляющими частотного преобразования, а отклонения от среднего значения определяют мелкие детали изображения, отвечают за его четкость и называются высокочастотными составляющими. Чем больше будет отброшено информации при сжатии с потерями из высокочастотных составляющих посредством необратимого округления – квантования, тем выше будет фактор сжатия и ниже – качество восстановленного изображения.

JPEG. Наиболее популярным методом сжатия цифровых изображений с потерями, своего рода стандартом, является JPEG [4], разработанный в 1991 г. группой экспертов Joint Photographic Experts Group и основанный на дискретном косинусном преобразовании.

JPEG предназначен для сжатия непрерывно-тоновых, а также полутоновых цифровых изображений и малоприменим для сжатия изображений дискретно-тоновых. Данный метод может осуществлять сжатие как с потерями, так и без потерь, но последний режим на практике используется редко, степень сжатия в этом случае обычно крайне мала.

Матрица пикселей изображения обрабатывается следующим образом. Сначала изображение преобразуется из цветовой модели RGB в представление светимости/цветности, когда каждый пиксель представляется компонентой светимости (яркости) и двумя цветоразностными компонентами синего и красного цветов. Необходимость преобразования цветового пространства определяется тем, что человеческое зрение способно различать изменения цветовых оттенков гораздо хуже, чем изменения яркости, и возможно осуществление удаления части информации из изображения на самом начальном этапе сжатия, отбросив каждый второй элемент по строкам и столбцам (или только по строкам) в матрицах цветоразностных компонент. Таким образом, будет отброшено до половины ис-

ходного изображения, и эта потеря останется практически незаметной для человеческого глаза. Основные заметные потери произойдут на этапе квантования после дискретного косинусного преобразования.

Далее матрицы трех выделенных компонент представления светимость/цветность разбиваются на блоки размером 8x8 пикселей. Предполагается, что при большем размере корреляция пикселей на противоположных сторонах блока будет уже не столь выражена.

В неявном виде через функцию косинуса задается базис из 64 наборов значений пикселей такого блока, так что каждый произвольный блок изображения можно представить в виде линейной комбинации элементов данного базиса. По приведенной ниже формуле каждый пиксель очередного обрабатываемого блока заменяется коэффициентом при соответствующем элементе базиса

$$G_{ij} = \frac{1}{4} C_i C_j \sum_{x=0}^7 \sum_{y=0}^7 p_{xy} \cos\left(\frac{(2y+1)j\pi}{16}\right) \cos\left(\frac{(2x+1)i\pi}{16}\right), \quad (1)$$

где $C_f = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2}}, & f=0, \\ 1, & f>0, \end{cases}$ и $0 \leq i, j < 7$; p_{xy} – пиксели блока изображения, $0 \leq x, y < 7$.

Формула для обратного дискретного косинусного преобразования выглядит аналогично:

$$G_{xy} = \frac{1}{4} \sum_{i=0}^7 \sum_{j=0}^7 C_i C_j G_{ij} \cos\left(\frac{(2y+1)j\pi}{16}\right) \cos\left(\frac{(2x+1)i\pi}{16}\right). \quad (2)$$

Для приближенного восстановления исходного блока изображения необходимо лишь 3–5 коэффициентов из 64, остальные можно обнулить посредством квантования. Тогда вместо 64 значений пикселей каждого блока, не поддающихся статистическому кодированию, останутся лишь несколько значимых коэффициентов, а остальные станут нулями.

Квантование заключается в делении элементов преобразованных блоков изображения на соответствующие элементы специальной матрицы, также имеющей размер 8x8 и называемой матрицей квантования, и последующем округлении результатов деления до ближайшего целого.

Естественно, что при больших потерях информации восстановленное изображение будет значительно отличаться от исходного вплоть до полного исчезновения плавных переходов между соседними блоками 8x8 пикселей. Кроме того, появится так называемый эффект Гиббса – своеобразный ореол вокруг границ объектов.

Здесь следует отметить, что такого рода искажения – артефакты – появляющиеся при высоких степенях сжатия, наличествуют у любого метода сжатия цифровых изображений с потерями, поскольку необратимое удаление части информации не может пройти бесследно.

После квантования каждый блок из двумерного представления переводится в одномерное – его элементы обходятся по зигзагообразному пути из левого верхнего угла в правый нижний и выстраиваются в линию. Затем строятся 64 вектора соответствующих коэффициентов всех блоков изображения, в первых 3–5 из которых будут значимые элементы, а остальные будут представлять собой серии нулей.

Заключительным этапом является энтропийное сжатие данных векторов – кодирование Хаффмана по описанной ранее модели.

Алгоритм декомпрессии в составе метода JPEG абсолютно симметричен рассмотренному алгоритму компрессии.

JPEG 2000. До сих пор JPEG является самым популярным методом сжатия цифровых изображений с потерями, хотя уже существуют и более совершенные методы. В 2000 г. появился JPEG 2000 [5], основанный на дискретном вейвлетном преобразовании. Этот метод пока не получил такого широкого распространения, но в целом он является более гибким, чем JPEG, обеспечивает большее (на 10–15%) сжатие и лучшее при равном размере качество восстановленного изображения, хотя при этом проигрывает по скорости.

JPEG 2000 построен по той же схеме, что и JPEG. Однако после перехода к представлению светимость/цветность подвыборка из цветоразностных компонент не осуществляется. Вместо этого данный метод дает возможность осуществлять варьируемое квантование во всех трех компонентах после дискретного вейвлетного преобразования, а также позволяет сжимать разные части изображения с большим или меньшим качеством.

Само преобразование заключается в следующем. Пиксели исходного изображения пропускаются через банк фильтров, что означает замену каждого пикселя линейной комбинацией соседних пикселей и его самого. Задано два набора коэффициентов – для низкочастотного и высокочастотного преобразования – причем низкочастотное преобразование применяется к четным пикселям строки (столбца) изображения, а высокочастотное – к нечетным. После этого все низкочастотные составляющие перемещаются в первую половину строки (столбца), образуя ее (его) уменьшенную копию, а высокочастотные – во вторую половину.

$$y(2n) = \sum_{i=0}^{N-1} x(i) \cdot h_n(i-2n), \quad (3)$$

$$y(2n+1) = \sum_{i=0}^{N-1} x(i) \cdot h_L(i-2n-1), \quad (4)$$

где N – длина строки (столбца) изображения; $x(i)$ – значения пикселей i -го столбца (i -й строки) изображения; $y(i)$ – преобразованные значения пикселей i -го столбца (i -й строки) изображения; h_n – низкочастотные коэффициенты; h_L – высокочастотные коэффициенты.

Аналогичным образом выглядят формулы для обратного дискретного вейвлетного преобразования.

Данное преобразование применяется сначала ко всем строкам, а затем ко всем столбцам изображения, которое таким образом будет разделено на четыре квадранта, в первых из которых будет находиться уменьшенная копия изображения, а в остальных трех – высокочастотные составляющие при движении по вертикали, горизонтали и диагонали. Преобразование является итеративным и может применяться к левому верхнему квадранту до тех пор, пока он не будет представлен единственным пикселем. В методе JPEG 2000 задано две итерации.

Полученные частотные составляющие квантуются, как и в методе JPEG, и сжимаются посредством арифметического кодирования – одного из статистических методов сжатия. При больших коэффициентах квантования на восстановленном изображении появляются артефакты в виде волн или «ложных» контуров в тех местах, где на исходном изображении были плавные переходы цветов. Сле-

дует отметить, что вейвлетное преобразование сильнее искажает цвета пикселей, чем JPEG, но при этом лучше сохраняет мелкие детали изображения.

Сжатие аудиоданных

Наряду с изображениями в области мультимедиа активно используются оцифрованные аудиоданные, задача сжатия которых во многом схожа с задачей сжатия изображений, хотя имеет и свою собственную специфику. Для хранения звука обычно требуется больший объем памяти, чем для изображений, но по сравнению с текстовыми данными разница здесь не столь велика. Единицами звуковых данных являются сэмплы – квантованные значения аналогового представления сигнала во временной области, зафиксированные с определенной периодичностью. Сэмплы могут быть 8-, 16- или 32-битными, поэтому в общем случае непосредственное применение статистических и словарных методов сжатия также является невозможным.

Так же, как и для изображений, для звука наиболее действенными являются методы сжатия с потерями. Однако удаление части информации из оцифрованного звукового сигнала осуществляется гораздо более сложным образом. В простейшем случае можно сделать подвыборку, удалив часть сэмплов, что, по сути, означает уменьшение частоты дискретизации. Но, помимо этого, методы сжатия аудиоданных используют специальные психоакустические модели, учитывающие особенности восприятия звука органами слуха человека и определяющие, какую часть сэмплов из оцифрованного звука можно удалить незаметно для восприятия.

Сжатие видеоизображений. Наиболее сложным типом данных в рассматриваемой последовательности являются видеоизображения, которые сочетают в себе последовательность неподвижных изображений – кадров, и звуковое сопровождение. Эти две составляющие сжимаются независимо друг от друга.

Особенностью видеоизображений является временная избыточность – не только пиксели в пределах некоторой окрестности отдельного кадра могут принимать близкие значения, но и соседние кадры могут быть похожи друг на друга. Для устранения избыточности такого типа разрабатываются алгоритмы, осуществляющие поиск движения в следующих друг за другом кадрах, таким образом, если два соседних кадра содержат одинаковые блоки пикселей, смещенные один относительно другого на некоторое число позиций, достаточно осуществить сжатие выбранных блоков в первом кадре, который в этом случае называется опорным, а для второго блока записать соответствующие смещения, которые, в свою очередь, будут сжаты посредством статистического кодирования [6].

Заключение. Следует отметить, что в области сжатия текстовых данных маловероятны какие-либо революционные прорывы. Из данных нельзя удалить больше избыточности, чем в них есть. И невозможно разработать методы сжатия сгенерированных случайным образом битовых строк. Все новые методы сжатия произвольных текстовых данных, разработанные за последние десятилетия, представляют собой варианты статистического или словарного сжатия, или же их сочетаний, и отличаются в основном спецификой программных или аппаратных реализаций и, как следствие, скоростью обработки данных. Однако по-прежнему актуальным является поиск новых методов сжатия цифровых изображений (а также и видеоизображений), что объясняется той ролью, которую они играют в современной IT-индустрии.

Одним из возможных направлений в дальнейшем развитии данной области является разработка новых методов сжатия на основе клеточных автоматов [7]:

легко построить модель цифрового изображения на основе клеточного автомата с конечной двумерной решеткой и соответствующим множеством внутренних состояний, и, кроме того, процесс развития клеточного автомата во времени построен по принципу однородных локальных взаимодействий, что достаточно хорошо накладывается на рассмотренный подход к сжатию изображений и позволяет говорить о возможности сжатия посредством клеточных преобразований.

Литература

1. Сэломон Д. Сжатие данных, изображений и звука. М.: Техносфера, 2004.
2. Методы сжатия данных. Устройство архиваторов, сжатие изображений и видео / Д. Ватолин, А. Ратушняк, М. Смирнов, В. Юкин. М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2002.
3. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2005.
4. ISO/IEC 10918-1 and ITU-T Recommendation T.81, «Information technology – digital compression and coding of continuous-tone still images – requirements and guidelines», 1993.
5. ISO/IEC 15444-1 and ITU-T Recommendation T.800, «Information technology – JPEG 2000 image coding system», 2002.
6. Артюшенко В.М., Шелухин О.И., Афонин М.Ю. Цифровое сжатие видеoinформации и звука. М.: Дашков и К°, 2004.
7. Аладьев В.З., Бойко В.К., Ровба Е.А. Классические однородные структуры. Теория и приложения. Гродно: ГрГУ, 2008.

УДК 004.738.5.057.4

ОПТИМИЗАЦИЯ НАСТРОЕК TCP

А.П. Филимонов

Изложены основные способы оптимизации протокола *TCP* для проблемных соединений.

Ключевые слова: стек TCP/IP, высокопроизводительная сеть, MTU.

Постановка задачи. В каналах с большими задержками (спутниковый канал, модем), с большими потерями данных или в каналах, где просто нужна гарантия доставки (служебная информация) применяют протокол *TCP*. Проблема в том, что сеть слишком обширна и многообразна, чтобы учесть все возможные ситуации в алгоритмах протокола, поэтому для оптимального использования проплаченного нами ресурса (канала *Ethernet*) иногда требуется внешнее вмешательство.

Эта статья является подготовительной к проведению эксперимента – «Испытания *TCP* на прочность». Здесь освещены некоторые способы настройки работы протокола в «трудных» сетях. На экспериментальном макете в «тепличных» условиях будут воспроизведены, по отдельности и в группах, препятствия работы протокола *TCP*. Будет произведена оценка эффективности известных методов настройки протокола, в том числе и приведенных ниже.

Показатель оптимальности настроек *TCP* для конкретного канала – это отношение реальной скорости входного потока данных к заявленной физически. Понятно, что наша мечта – единица.

Если проблема не в сети. Прежде чем лезть в настройки протокола, необходимо убедиться, что проблема не в аппаратной части. В зависимости от аппаратной реализации задача производительности соединения может зависеть от других

системных компонентов – например, от центрального процессора. Если подсчет контрольных сумм интернет-пакетов реализован на программном уровне, то при большом количестве одновременно установленных соединений загрузка слабого процессора может достигать 100%. Излечить подобные проблемы можно только апгрейдом «железа».

Причиной может стать внутреннее устройство (например, видеокарта), надолго захватывающее шину безо всяких видимых причин, в результате чего все остальные периферийные устройства садятся на голодный паек и скорость ввода/вывода (в том числе и сетевого) многократно снижается. Обновление драйверов или отключение всех «агрессивных» настроек «устройства» обычно решают проблему даже без обращения к стеку *TCP/IP* [1].

Причина неполадок *LAN* с сетями 100 Вт может заключаться в том, что хост настроен на работу в полном дуплексе, а свитч Ethernet работает в режиме полудуплекса, или наоборот. Новое оборудование автоматически согласует дуплексы, тогда как со старым могут возникнуть проблемы, результатом будет работающая, но очень медленная сеть. Лучше всего работать в режиме полного дуплекса, но некоторое старое оборудование поддерживает только полудуплекс [3].

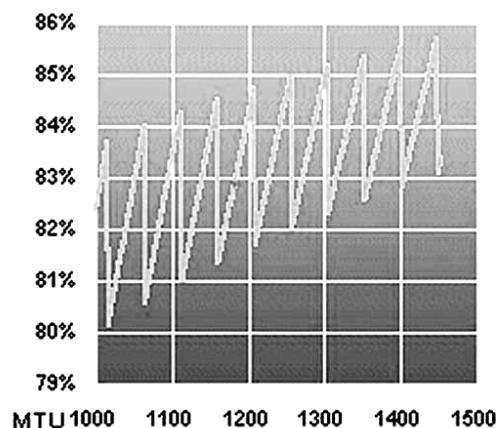
Переходим к анализу сети. Сначала посмотрите статистику сети – количество ошибок и число повторных передач. Если их много, то это говорит о том, что сеть перегружена, построена на плохом «железе» или вовсе с нарушением топологии. Также повторные передачи происходят в случае, когда отправляющая машина намного быстрее принимающей [3].

Подбираем размер пакетов (*MTU*, *MSS*). Размер *TCP* пакетов определяет параметр *MSS* (*Maximum Segment Size*) (см. рис. 1). Трогать его не следует, да и *Windows* делать этого не позволяет. *MTU* (*Maximum Transmission Unit*) – размер *IP* пакета, отправляемого в сеть, состоит из пакетов *TCP* и 40 байт заголовка. Размеры *MSS* и *MTU*, задаваемые в *Windows* по умолчанию, представлены в таблице.

Значения *MTU* и *MSS* по умолчанию в *Microsoft Windows Server 2003*

Параметр	Канал со скоростью <128 Kbps	Канал со скоростью >= 128
<i>MTU</i> (<i>Maximum Transmission Unit</i>)	576	1500
<i>MSS</i> (<i>Maximum Segment Size</i>)	536	1460

Увеличение *MTU* для увеличения скорости – самый распространенный совет на просторах сети. Однако все ли так просто?! Выкручиваем *MTU* до предела и... скорость передачи падает до нуля. Почему? Причина в том, что с ростом размера пакетов увеличивается и время, необходимое для их повторной передачи в том случае, если пакет потерян или искажен. К тому же промежуточные узлы имеют свои собственные настройки, и если размер передаваемого пакета превышает *MTU* текущего маршрутизатора, пакет разрезается на два или более пакетов (т.е. фрагментируется), и эти фрагменты собираются воедино только на узле-приемнике, в результате чего пропускная способность уменьшается. Причем если *MTU* узла отправителя лишь чуть-чуть превышает *MTU* промежуточного узла, то второй пакет состоит практически из одного заголовка, в результате чего зависимость скорость передачи от размера превращается в характерную пилообразную кривую (см. рис. 1).



<http://member.nifty.ne.jp/oso/faq/mtu-faq.html>

Рис. 1. Зависимость скорости передачи данных от размера *MTU* [1]

Параметр *MTU* задает наибольший возможный размер отправляемого *IP*-пакета (вместе с заголовком). Чем больше *MTU*, тем ниже накладные расходы на передачу служебной информации, а значит, выше КПД канала. Дабы в *MTU* не было пустот-заполнений, размер необходимо подбирать по следующей формуле (1):

$$MTU = N * MSS + 40 \text{ [байт]}, \quad (1)$$

где *N* – целое положительное число.

Если невозможно узнать напрямую значение *MTU* следующих на пути сетевых устройств, то задача решается методом перебора: в интересующем нас диапазоне значений *MTU* находится значение, при котором производительность соединения наибольшая.

Существует возможность автоматического определения маршрута, по которому пакеты с заданным *MTU* проходят без фрагментации – опция *PMTUDiscovery* (*Path Maximum Transmission Unit Discovery*, смотри RFC1191 и RFC1181 [4]). При правильно настроенном *MaxMTU* этот параметр только тормозит протокол за счет лишних затрат времени на поиск. Однако многие администраторы промежуточных узлов по соображениям «безопасности» блокируют отправку *ICMP*-сообщений и узел-отправитель остается в полном неведении относительно факта фрагментации. Специально для обнаружения таких «неправильных» маршрутизаторов (прозванных «черными дырами», или *Black Hole*), работает специальный алгоритм *PMTUBlackHoleDetect* (нахождение черных дыр) – если он включен, то перед началом соединения будет происходить проверка на мертвые маршрутизаторы по пути до сервера. Мертвые маршрутизаторы встречаются не так часто, и задержки, связанные с их поиском, не окупаются [2].

Настройка «окон» TCP (*Receive window, transmit window*). Окном TCP называют размер буфера, данные из которого после заполнения отправляются в путешествия по сети. Очень важно изменить размеры буферов у посылающей и принимающей машин. Изменение только отправляющего буфера не даст ничего, т.к. *TCP* согласовывает размер буфера с меньшим из двух. Это означает, что не обязательно устанавливать оптимальный размер буфера на отправляющей и принимающей машинах. Обычно делают следующее: устанавливают размер буфера на серверной стороне довольно большим и затем позволяют клиенту определить и установить «оптимальное» значение для данного сетевого маршрута (параметр

TcpWindowSize). Размер буфера желательно устанавливать кратным *MTU*. Оптимальное значение определяют по формуле (2):

$$Buffer_Size \leq RTT * BandWidth, \quad (2)$$

где – *BandWidth* – ширина выделяемого канала [байт/с]; *RTT (Round Trip Time)* – время от отправки пакета до получения подтверждения доставки [с].

Перенастройка размера буфера слабо повлияет на производительность в низкоскоростных сетях, например модемные сети [3].

Если клиенты локальной сети работают через *Proxu*-сервер, то для достижения максимальной производительности достаточно изменить размер *TCP*-окна непосредственно на самом сервере.

При работе же через *NAT* необходимо настроить *TCP*-окно на каждой рабочей станции, подключенной к локальной сети [1].

Медленный старт и выборочное подтверждение. Для предотвращения перегрузок сети в протокол *TCP* был введен так называемый «медленный старт» («*slow start*»), подробно описанный в *RFC 1122* и *RFC 2581*. При создании нового *TCP/IP* соединения система устанавливает размер окна, равный одному сегменту *MTU*. После получения подтверждения размер окна увеличивается вдвое, и так продолжается вплоть до достижения максимально возможного размера [4].

Экспоненциальный рост ширины окна занимает совсем немного времени при передаче огромных файлов, но при установке множества *TCP/IP* соединений (характерных, например, для браузеров), обменивающихся крошечными порциями данных (классический пример которых – *web*-сервер), медленный старт заметно снижает эффективность широких каналов, кроме того, даже при кратковременной перегрузке сети система сбрасывает размер окна в единицу, в результате чего график скорости отдачи файла из степной равнины превращается в холмистую терраформу.

Непосредственно отключить «медленный старт» штатными средствами *Windows* (не прибегая к патчу ядра) нельзя, однако если задействовать *SACK*-алгоритм (*Selective Acknowledgement* – выборочное подтверждение, одно из расширений *TCP*-протокола, описанное в *RFC 2018* [5]), «медленный старт» вырубается сам собой, становясь при этом никому не нужным пережитком старины.

Выборочное подтверждение передачи позволяет осуществлять повторную передачу неподтвержденных сегментов в одном окне (при неактивном *SACK*е потерянные сегменты передаются один за другим в индивидуальном порядке). Другими словами, узел «А» повторно передает узлу «В» только реально потерянные сегменты, а не весь блок, в состав которого входят и успешно принятые пакеты. Очевидно, что максимальный прирост производительности будет наблюдаться на нестабильных каналах связи, регулярно теряющих пакеты [1].

Еще существуют, как минимум, полтора десятка опций *TCP*, настройка которых может облегчить жизнь пользователя, но написать о них не позволяет ограничение размера статьи. Здесь изложены, на мой взгляд, наиболее значимые рычаги настройки.

Литература

1. Крис Касперский. Тонкие настройки параметров *TCP/IP* под толстые каналы [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.insidepro.com/kk/181/181r.shtml>, свободный.

2. Horific. Операция по удалению грыжи у TCP/IP [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.xakep.ru/magazine/xa/031/020/1.asp>, свободный.
3. Brian Tierney (пер. Войнович А.). Тонкая настройка TCP [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.securitylab.ru/analytics/243414.php>, свободный.
4. TCP/IP and NBT configuration parameters for Windows XP [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://support.microsoft.com/kb/314053>, свободный.
5. Microsoft Windows 2000 TCP/IP Implementation Details [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://technet.microsoft.com/en-us/library/bb726981.aspx>, свободный.

УДК 004.75

АРХИТЕКТУРА РАСПРЕДЕЛЁННОЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ С ПОДДЕРЖКОЙ КАЧЕСТВА ОБСЛУЖИВАНИЯ

А.С. Крупский

Дано описание подхода к организации архитектуры распределённых вычислительных систем. Представлены стратегии организации распределённого хранения информации о состоянии системы и трёхуровневой архитектуры ПО. В этом отношении рассматривается понятие качества обслуживания.

Ключевые слова: распределённая вычислительная система, качество обслуживания, WiMax, планирование.

Задача планирования ресурсов распределённой вычислительной системы. Распределённую вычислительную систему можно представить в виде графа, состоящего из каналов передачи информации и вычислительных узлов. При этом как каналы так и узлы обладают ограниченными ресурсами, что порождает задачу об оптимальном планировании распределения этих ресурсов между запущенными в системе задачами для наискорейшего их выполнения. Однако, при такой оптимизации задачи не гарантируется предоставление ей ресурсов вычислительной системой, что может привести к теоретически бесконечному нахождению задачи в очереди. На практике, как правило, такое маловероятно, однако существуют типы задач, которые требуют предоставления им фиксированного количества ресурсов в каждый интервал или момент времени. То есть, с одной стороны, ресурсы должны быть распределены оптимально по времени выполнения задач, с другой – они должны быть распределены так, чтобы в любой момент времени имелся гарантированный резерв для подмножества задач, чувствительных ко времени выполнения. В качестве примера таких задач можно привести распознавание образов системой видеонаблюдения, контроль за производственными и технологическими процессами, агрегатами, установками. Здесь возникает понятие качества сервиса (QoS или Quality of Service). Различные задачи могут предъявлять различные требования к ресурсам системы, причём как количественные так и качественные. При запуске задачи она декларирует свои требования. Если система считает, что способна обеспечить эти требования, то задача получает подтверждение и запускается в системе. В противном случае следует отказ, и задача может запросить запуск с другими требованиями к ресурсам. Следует отметить, что единожды зарезервировав ресурсы, задача может их использовать не в каждый момент времени. То есть часть зарезервированных ресурсов остаётся незанятой и может быть распределена между остальными задачами на время невостремленности.

Обычно выделяют следующие типы ресурсов:

- процессорное время;
- оперативная память;
- устройства ввода/вывода;
- полоса пропускания каналов коммуникации.

Важным является вопрос о быстром возврате этих ресурсов при активизации задачи. Различные виды ресурсов характеризуются различным временем переключения. Так, каналы коммуникации обладают некоторой реактивностью за счёт наличия очередей пакетов. Гораздо меньшее время требуется для переключения процессора. Большая задержка может произойти при переключении оперативной памяти, так как при условии дефицита свободного места страницы будет необходимо вытеснить на жёсткий диск. Операции же ввода/вывода вообще могут быть неделимыми, и для их освобождения необходимо будет дождаться завершения текущей транзакции. Однако картина распределения ресурсов всё ещё не полная. При разделении задачи могут появляться взаимные блокировки и логические связи между различными её частями. То есть становится важным порядок их выполнения. Именно это составляет значительную, если не основную сложность планирования вычислений в распределённой системе. Кроме того, при этом сама логика выполнения программы может жёстко определять часть процесса планирования. Далее будем рассматривать планирование, при котором планируемые задачи независимы по данным, т.е. могут выполняться без чтения и записи в одни и те же ячейки памяти с другими задачами.

Каналы коммуникации. Под каналом передачи информации будем понимать совокупность аппаратных и программных средств передачи информации, необходимую для передачи данных от одного вычислительного узла другому в режиме соединения точка-точка, соответствующем канальному уровню модели OSI. Для нас не должно составлять существенной разницы, какого рода каналы коммуникации мы используем. То есть следует унифицировать каналы передачи информации вне зависимости от их природы, выработав общий набор характеристик для всех их разновидностей, представляющих интерес с точки зрения качества обслуживания. Здесь же следует сказать и о моделях передачи данных, принятых на сетевом уровне:

- Наибольших усилий (Best Effort). Используется любой свободный канал для передачи данных до их заполнения.
- Интегрированный сервис. Приложение самостоятельно резервирует ресурсы для себя на всех роутерах (RsVp).
- Дифференцированный сервис (DiffServ). Все потоки разделяются на несколько типов сервисов, для которых существует дисциплина обслуживания.

Последняя модель является наиболее перспективной, так как позволяет достичь лёгкой масштабируемости системы. Для примера приведём характеристики качества обслуживания, интересующие нас в рамках обеспечения качества сервиса распределённых вычислений, на основе их перечня из [1]:

- максимальная долговременная ширина полосы пропускания;
- минимальная зарезервированная полоса;
- максимальная задержка;
- тип потока;
- дрожание полосы;
- приоритет.

Фактически, эти характеристики являются оценками потребностей приложения при работе по сети. Так, максимальная долговременная ширина полосы устанавливает тот лимит, предоставление услуги свыше которого не будет осуществляться, если не удовлетворены потребности более высокоранговых задач. Минимальная зарезервированная полоса обеспечивает трафик не меньше нижней зарезервированной границы. Для приложений реального времени важны максимальная задержка и дрожание полосы. Для ранжирования в рамках потока одного класса вводится приоритет. Данные параметры качества обслуживания, с некоторой степенью обобщения можно применять и к остальным ресурсам распределённой вычислительной системы, подобно подходу к планированию, принятому в сетях WiMax. Планирование между классами обслуживания, по принципу DiffServ, обычно осуществляется при помощи алгоритма DFPQ. Планирование в рамках каждого из классов осуществляется по EDF, WFQ и BE. Полное описание подхода приведено в [2].

Все каналы коммуникации можно разделить на два больших класса: проводные и беспроводные. Резервирование в сетях WiMax осуществляется на канальном уровне. В то же время в IPv4 или в IPv6 резервирование возможно протоколом верхнего для них уровня RSVP. Для обеспечения QoS распределённой вычислительной системы в целом необходимо обеспечить сквозное резервирование по разнородным сетям. Для обеспечения лучшей масштабируемости сети целесообразнее обеспечить реализацию в соответствии с моделью DiffServ. В этом случае потребуются реализовывать сетевой уровень как модификацию IP.

Вычислительные узлы. К вычислительным узлам будем относить устройства, на которых в соответствии с политикой, принятой в данной системе, возможно проведение вычислений прикладных задач (рис. 1). Таким образом, к вычислительным узлам не относятся маршрутизаторы, базовые станции беспроводной связи и прочие устройства, выполняющие вычисления для решения сервисных задач (обеспечения функционирования системы в целом).

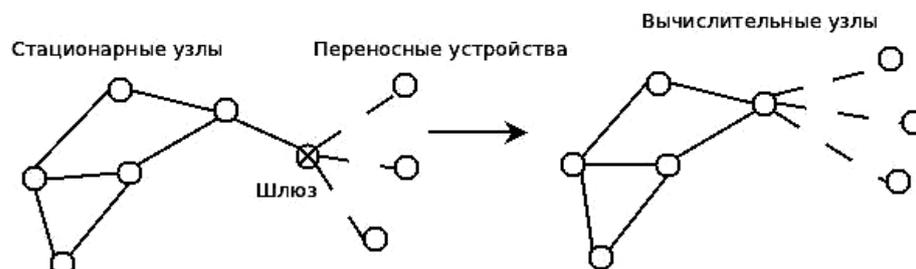


Рис. 1. Физическая топология сети со шлюзом и логическая во внутреннем представлении системы

В отличие от резервирования каналов передачи, где требуется установить маршрут из нескольких каналов, при резервировании ресурсов вычислительного узла мы имеем конечное устройство для выполнения операций с данными, обладающее необходимым ресурсом в нужных объёмах и с требуемыми характеристиками. При этом ещё до запроса резервирования маршрута необходимо произвести анализ состояния системы. В общем случае можно предложить следующую последовательность действий:

1. Определить типы ресурсов, их качественные и количественные характеристики, необходимые задаче для выполнения.

2. Проанализировать наличие необходимых ресурсов на узлах системы с учётом затрат на передачу данных.

3. Проанализировать известную локальную статистику загруженности узлов и выбрать наименее загруженный, удовлетворяющий ограничениям по ресурсам, запросить по нему свежую статистику. Если невозможно зарезервировать – промах. Если список пуст – запросить данные с сервера (при условии небольшой загруженности сети). Иначе – Конец.

4. Начать процесс резервирования ресурсов (в случае успеха – 5, иначе 6).

5. Инициализировать выполнение задачи и начать сбор статистики. Конец.

6. Зарегистрировать промах, перейти к 3.

Шаг 3 подразумевает алгоритм честного планирования, при котором задача выполняется на узле с наименьшим выполняемым объёмом работы по отношению к количеству имеющихся ресурсов, что обеспечивает равномерную балансировку нагрузки. Вместе с тем подмножество узлов для выполнения задачи ограничено временем передачи данных по сети и их количеством.

Для резервирования и планирования ресурсов необходимо обладать информацией о поведении и состоянии системы. Централизованное её хранение, вообще говоря, имеет свои минусы. Для его реализации необходимо, чтобы все узлы имели доступ к реестру на центральном узле. Кроме того, трафик на линии связи с этим узлом, пусть и служебный, будет их нагружать. При потере связи с реестром часть системы становится неработоспособной. При поддержании копии реестра на каждом узле возникает вопрос о поддержании его актуальности. В этом случае имеем нечто схожее с проблемами, возникающими при поддержании актуальности таблиц маршрутизации. Так или иначе, необходимо контролировать наличие резерва свободных ресурсов в системе. Эту информацию надо также хранить или централизованно, или распределенно поддерживать ее целостность. Весь нюанс в том, что количество свободных ресурсов, величина запросов на ресурсы приложения меняются очень часто и для поддержания актуального состояния этих данных на каждом из узлов требуется большой трафик. Для его сокращения возможно предложить передавать данные только о значительных изменениях в количестве ресурсов. Кроме того, в этом случае сам факт оповещения может зависеть от состояния остальной системы и ожидаемого поведения задач. Существует и третий вариант хранения этой информации, совмещающий два предыдущих. В каждом домене DiffServ возможно выделить сервер, который централизованно хранит эти данные. В случае возрастания трафика и недостаточности пропускной способности сети данные не обязательно передавать на сервер. Сервер будет пытаться найти их только в случае, если их кто-то запросит (недостаточная вычислительная мощность сегмента сети – как результат поиск свободных мощностей за пределами сегмента). Конечно, данные за время передачи могут устареть – поэтому передавать данные о загрузке надо с учетом статистики – чтобы минимизировать вероятность промаха. Таким образом, при малой загрузке сети имеем сервер с централизованным хранением реестра, а при большой – локальные копии, хранящие только те запросы, которые они или через них запрашивали. В то же время узлы с наименьшей загрузкой могут целенаправленно передавать эти данные на сервер.

Трёхуровневая архитектура. Существуют несколько концепций реализации парадигмы распределённых вычислений на разнесённых вычислительных узлах [3]:

- Infrastructure as a Service (IaaS) – приложение при помощи специализированного API получает доступ к ресурсам вычислительного узла через гипервизор.
- Platform as a Service (PaaS) – приложение выполняется в специализированной среде – своеобразной операционной системе (платформе), которая берет задачу разнесения вычислений по узлам на себя.
- Software as a Service (SaaS) – сервисы, предназначенные для решения специфических задач, запускаемые в виде приложений.

Для решения задачи планирования необходимы исходные данные, характеризующие расчетные задачи на узлах. В случае применения концепции IaaS мы можем получить априорные сведения о необходимых приложению ресурсах. Гипервизор несёт ответственность за их резервирование в любой момент времени. В отличие от этого при применении PaaS возможно собрать дополнительные статистические данные о поведении приложения, контролировать его выполнение в

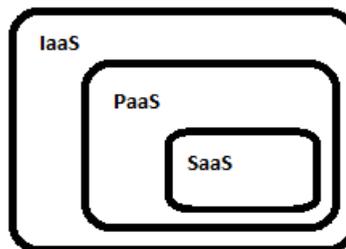


Рис. 2. Трёхуровневая архитектура

уже имеющейся среде. Мы будем иметь ещё более детальные данные о поведении задачи, если сама её логика функционирования будет нам известна (SaaS). По большому счёту различие между этими концепциями можно свести к количеству информации о поведении задачи, имеющейся у нас в наличии. В общем случае можно предложить следующую схематичную структуру, объединяющую все три концепции (рис. 2).

Может оказаться целесообразным реализовать API и гипервизор на каждом узле для резервирования ресурсов (IaaS). Поверх этого API реализуется «операционная система» (PaaS). В ней могут существовать зарегистрированные сервисы (SaaS). Каждому из уровней соответствует свой набор априорных данных, чем «глубже» уровень, тем этот набор полней. Соответственно, чем меньше уровень, тем меньше эффективность управления вычислительной задачей. На уровне SaaS сами программисты в ходе решения задачи могут изменять априорные данные, выдаваемые программой, вшивая передачу сообщений в код в соответствии с логикой его функционирования. На уровне PaaS приложение «не видит» остальных узлов, может быть написано без динамического изменения предоставляемых в платформу данных – в этом случае мы получаем возможность запускать специализированные сервисы под нашей платформой, скомпилировав их (целесообразным выглядит модификация сборки Linux). Если же разработчик предпочитает работать без установки данной платформы, то он может применять API и писать приложение из-под другой платформы. В этом случае на него ложится ответственность за сбор статистики и предоставление информации другим узлам. Соответственно, чем меньше информации о себе задача предоставляет – тем с большей «осторожностью» надо относиться к ней при планировании. То есть при планировании она может получить более низкий приоритет по отношению к другим задачам в некоторой критической ситуации.

Заключение. В работе был предложен метод построения трёхуровневой архитектуры распределённой вычислительной системы. Рассмотрены некоторые способы хранения информации о состоянии системы и обмена ею. Проведена аналогия между обеспечением качества обслуживания в сети WiMax и качеством обслуживания в распределённой системе с рассмотрением возможности интеграции планирования как вычислительных, так и коммуникационных ресурсов.

Исследования проводятся при финансовой поддержке НИР, выполняемой по ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (госконтракт № 14.740.11.0398; шифр заявки 2010-1.1-215-138-022).

Литература

1. IEEE Standard for Local and metropolitan area networks Part 16: Air Interface for Broadband Wireless Access Systems // IEEE Std 802.16-2009 (Revision of IEEE Std 802.16-2004), vol., no., pp.C1-2004, May 29 2009 doi: 10.1109/IEEESTD.2009.5062485 [Электронный документ]. – Режим доступа: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5062485&isnumber=5062484>, для зарегистрированных пользователей.
2. Аунг М.М. Исследование и разработка алгоритмов планирования и приоритетного управления доступом в сетях WiMAX: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2010. 25 с.
3. Бойченко И.В. Управление ресурсами в сервис-ориентированных системах типа «приложение как сервис» // И.В. Бойченко, С.В. Коротников // Доклады ТУСУРа. 2010. № 1(21), ч. 2. С. 156–160.

УДК 621.396.41

РЕАЛИЗАЦИЯ ПАРАЛЛЕЛЬНОГО АЛГОРИТМА СЖАТИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ ФРАКТАЛОВ

С.С. Кулбаев

Представлен метод сокращения времени кодирования для фрактального сжатия изображений. Данный подход сокращает объем задачи за счет распараллеливания вычислительных процессов. В работе представлены результаты, которые показывают, что такой подход может существенно сократить время кодирования, сохраняя при этом сравнительную точность и эффективность сжатия.

Ключевые слова: фрактальное сжатие, кодирование, изображение, параллельная обработка.

Введение. Широкое распространение алгоритмов сжатия обусловлено значительными достижениями в области обработки изображений. Это объясняет тот факт, что подавляющее большинство современных форматов представления изображений обеспечивают сжатие с потерями. Файлы форматов сжатых изображений редко подвергаются дополнительной обработке и сжатию. С другой стороны, для большинства алгоритмов сжатия с потерями тяжело оценить измененные особенности оригинального изображения.

Фрактальные алгоритмы обеспечивают удачное соотношение между коэффициентом сжатия и качеством и обладают уникальным свойством детализации при произвольном масштабировании [1]. Большую ценность представляют алгоритмы фрактального сжатия, способные работать в режиме реального времени. Однако большинство известных алгоритмов фрактального сжатия имеют высокую трудоемкость и требуют много времени для обработки данных. Фрактальное сжатие поддается распараллеливанию, что позволяет создавать программное обеспечение, специально приспособленное для эффективного решения данной задачи.

Описание алгоритма. Алгоритм фрактального сжатия основан на теории систем итерированных функций (IFS) [1], представляющих собой конечные наборы сжимающих аффинных преобразований плоскости.

Процесс кодирования заключается в отображении доменных блоков в ранговые блоки изображения (рис. 1). Для каждого рангового блока алгоритм ищет такой доменный блок и соответствующее преобразование, которые обеспечат наилучшее соответствие ранговому блоку [2].

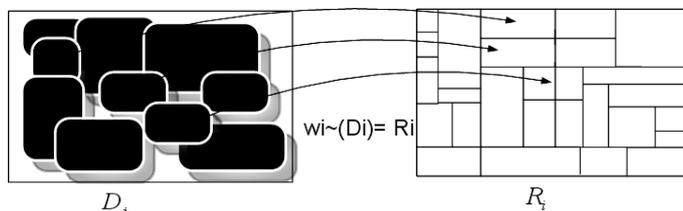


Рис. 1. Преобразование отображает домены в ранговые блоки

Отображение \tilde{w}_i является оператором интенсивности фрагмента изображения, которое изменяет значение интенсивности f – элементарной части (пикселя) следующим образом:

$$\tilde{w}_i(f) = s_i \cdot f + o_i, \quad (1)$$

где s – контрастность, o – яркость [2].

Распараллеливание алгоритма. При параллельной обработке изображений на основе фракталов в качестве одного из основных элементов является итератор. В процессе итерации указывается опорное множество отсчетов изображения, по которым осуществляется итерация, а также задаются тип и параметры преобразования (т.е. угол поворота, зеркальное отражение и т.д.), выполняемого на каждой итерации, и возможные связи с другими параллельно выполняемыми итераторами. То есть параллельно вычисляются яркость, оттенок и контрастность доменного блока, сопоставимого с ранговым блоком. Процесс, описывающий типовую операцию обработки изображения, представляет собой параллельную композицию итераторов различного типа.

Основная стратегия состоит в том, чтобы подсчитывать значения, которые понадобятся на следующей итерации как можно раньше и, переставлять независимые инструкции так, чтобы они выполнялись параллельно. Эти вычисления составляют критический путь всей программы, и общее время выполнения зависит от времени их завершения. В высокопроизводительных вычислительных системах применяются многоядерные процессоры. Процесс распараллеливания на многоядерных процессорах заключается в том, чтобы каждое ядро выполняло независимый набор инструкций с определенным подмножеством исходных данных [3].

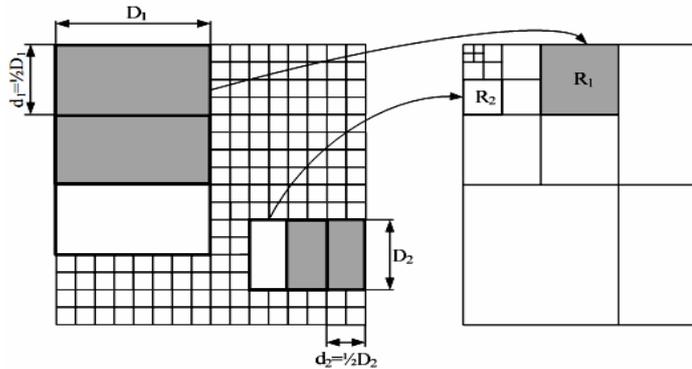
Подобный подход позволяет выполнять необходимые вычисления с меньшими затратами времени. Возможность получения максимального ускорения ограничивается только числом имеющихся процессоров и количеством «независимых» частей в выполняемых вычислениях, т.е. набором характеристик изображений и количеством заданных рангов. Алгоритм фрактального кодирования заключается в разбиении изображения на ранговые блоки и поиске для них на этом же изображении доменных блоков более крупного размера.

Реализация параллельного алгоритма. При реализации параллельных алгоритмов необходимо учесть следующие моменты параллельных вычислений:

- набор вычислений, притом такой, что каждое вычисление никак не зависит от результатов других вычислений;
- набор вычислений, среди которых имеются вычисления, зависящие от результатов других вычислений из этого же набора.

Независимыми вычислениями являются сравнения ранговых блоков с доменными блоками, т.е. каждое сопоставление независимо друг от друга. В процессе сжатия исходное изображение разбивается на ранговые блоки, которые не могут пересекаться, и на большие по размеру доменные блоки, которые могут пересекаться. На ранговые блоки разбиение производится методом квадродерева (рис. 2).

Рис. 2. Разбиение ранговых блоков по схеме квадродерева



Зависимые вычисления состоят в том, что входными данными следующего итератора являются результаты предыдущего итератора.

Для поддержки векторизации в алгоритме сжатия изображений на основе фракталов мы производим параллельные расчеты четырех итераций: все используемые в алгоритме данные заменяются массивом из четырех значений, по одному на каждой итерации. То есть сначала изображения разбиваются на четыре ранговых блока, и для каждого рангового блока создается свой процесс сопоставления с доменным блоком. И каждый вычислительный процесс работает в отдельном потоке функции ParallCompressor(). Если у процесса 1 выбранный ранговый блок не соответствует ни одному из доменных блоков, то процесс 1 разбивает выбранный ранговый блок на меньшие ранговые блоки, и процесс снова повторяется. Вычисления повторяются до тех пор, пока вся поверхность изображения не будет покрыта ранговыми блоками.

Оценка коэффициента сжатия и вычислительных затрат [1]. Размер данных для полного определения ранговой области рассчитывается по формуле (2):

$$R_{size} = N_{bit} + N_{type} + U + V, \quad (2)$$

где N_{bit} – количество бит, необходимых для хранения координат нижнего левого угла домена (3); N_{type} – количество бит, необходимых для хранения типа аффинного преобразования (их всего три); U и V – для хранения коэффициентов контраста и яркости.

$$N_{bit} = N_x + N_y, \quad (3)$$

где N_x и N_y – количество бит, необходимых для хранения каждой из координат, рассчитываются по формулам (4) и (5):

$$N_x = CEIL(N_{Hdomain}), \quad (4)$$

$$N_y = CEIL(N_{Vdomain}), \quad (5)$$

Здесь $CEIL$ – функция округления до максимального целого, $N_{Hdomain}$ и $N_{Vdomain}$ – количество доменов, уместяющихся по горизонтали и вертикали, которые рассчитываются по формулам:

$$N_{Hdomain} = \frac{(H - Size_domain + 1)}{Step}, \quad (6)$$

$$N_{Vdomain} = \frac{(V - Size_domain + 1)}{Step}, \quad (7)$$

где V и H – вертикальный и горизонтальный размеры изображения; $Size_domain$ – размер доменного блока; $Step$ – шаг поиска доменной области.

Для хранения преобразования N_{type} необходимо 3 бита.

Для хранения U и V необходимо 9 и 7 бит соответственно.

Для примера возьмём изображение размером 512×512 пикселей и будем исследовать доменную область с шагом 4 пикселя, подставляя данные в (6) и (7):

$$N_{Vdomain} = N_{Hdomain} = (512 - 8 + 1) / 4 = 126,$$

Затем полученные результаты подставляем в (4) и (5), а затем в (3).

$$N_x = N_y = CEIL(\log_2 126) = 7,$$

$$N_{bit} = 14$$

и получаем размер доменов из (2): $R_{size} = 14 + 3 + 7 + 7 = 31$.

Таким образом, коэффициент сжатия S составляет

$$S = (8 \times 8 \times 8) / 31 = 17.$$

Коэффициент сжатия не так велик, как хотелось бы, но и параметры сжатия далеко не оптимальны, и коэффициент может увеличиваться в разы.

Предположим, что $n \times m$ – размер исходного изображения в пикселях: rsz – сторона рангового блока. Тогда количество ранговых блоков в изображении будет

$$r_{size} = \frac{n}{rsz} \cdot \frac{m}{rsz}, \quad (8)$$

а доменных (учитывая, что сторона доменного блока всегда вдвое больше стороны рангового)

$$d_{size} = \frac{(n - 2 \cdot rsz)}{2} \cdot \frac{(m - 2 \cdot rsz)}{2}. \quad (9)$$

Таким образом, необходимо произвести поблочных сопоставлений, что уже для изображения размером 512×512 и стороной рангового блока 8 пикселей составляет 251 920 384. Также в данном алгоритме в каждом таком сопоставлении необходимо организовать цикл по всем пикселям блока для расчета математического ожидания и дисперсии. Более того, время, затрачиваемое на сжатие изображения в градациях серого, в простейшем случае утраивается. А если речь идет о цветном изображении (так как для представления информации о яркости и цвете пикселя требуется как минимум три составляющих), то в этом случае вычисления увеличиваются как минимум в три раза.

Результаты работы. В ходе исследования было использовано изображение размеров 512×512 пикселей, 24 бит на пиксель. Размер изображения составляет $512 \times 512 \times 24 = 6\,291\,456$ бит или 786,4 Кбайт. Была проведена серия экспериментов с различными значениями параметров как с обычным алгоритмом так и па-

раллельным алгоритмом. В состав параметров входят: размер рангового блока, шаг поиска домена, погрешность (среднеквадратическое отклонение), параметры режимов поиска: 1 – искать наилучший домен; 0 – искать домен в пределах среднеквадратического отклонения. В качестве вычислительных систем был использован двухъядерный процессор Intel Core2 2.13 ГГц. Результаты приведены в таблице.

Результаты экспериментов

<i>Обычный</i> алгоритм фрактального сжатия	Время сжатия, с	Размер выходного файла, Кбайт
Compressor (8,16,0.005,0)	15	87
Compressor (8,16,0.005,1)	76	87
<i>Параллельный</i> алгоритм фрактального сжатия	Время сжатия, с	Размер выходного файла, Кбайт
ParallCompressor(8,16,0.005,0)	3	80
ParallCompressor(8,16,0.005,1)	16	80

Заключение. Так как каждый ранговый блок изображения обрабатывается независимо друг от друга, то можно достичь коэффициента ускорения, близкого к числу ранговых блоков (разумеется, при возможности запустить число вычислительных процессов, соответствующее числу ранговых блоков, учитывая погрешность среднеквадратического отклонения).

В дальнейших исследованиях планируется адаптация алгоритма для вычислительных кластеров.

Исследования выполняются при финансовой поддержке НИР в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (госконтракт № 14.740.11.0398; шифр заявки 2010-1.1-215-138-022).

Литература

1. Ватолин Д.С. Фрактальное сжатие изображений // ComputerWorld-Россия. 1996. № 6 (23).
2. Уэлстид С.Т. Фракталы и вейвлеты для сжатия изображений в действии: Учеб. пособие. М.: Триумф, 2003. 320 с.
3. Немнюгин С. Параллельное программирование для многопроцессорных вычислительных систем / С. Немнюгин, О. Стесик. СПб., 2002.

УДК 519.688

РЕАЛИЗАЦИЯ КОМПЛЕКСНОЙ ПРОГРАММЫ НАПРАВЛЕННОЙ НА ИССЛЕДОВАНИЕ МОНО- И ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

А.Ф. Купрейчик, А.А. Андреева, О.Н. Минин

Разработан программный продукт по обработке экспериментальных данных по исследованию пластической деформации.

Ключевые слова: деформационное упрочнение, пластическая деформация, компонента тензора пластической дисторсии, локализация, сплайн, интерполяция, обработка экспериментальных данных.

Как установлено в ходе многочисленных экспериментов, пластическое течение металлов и сплавов в моно- и поликристаллическом состояниях протекает

локализовано, причем макрокартина локализации, имеющая автоволновой характер, определяется действующим на каждой стадии процесса законом деформационного упрочнения [1, 2]. В последнее время независимо были получены дополнительные доказательства подобного характера развития локализованного пластического течения. Одной из наиболее важных проблем при выяснении природы такой локализации является установление связи автоволновых параметров локализации с характеристиками структуры деформируемого материала, а также их связь с механическими параметрами материалов. Наиболее распространенным методом исследований пластической деформации и разрушения материалов является метод активного одноосного нагружения при постоянной скорости и нагрузке. Основным методом для получения данных о местах локализации пластической деформации является метод двухэкспозиционной спекл-интерферометрии.

Накопленные экспериментальные результаты позволяют утверждать, что можно выделить ряд стадий деформирования, характеризующихся определенными законами деформационного упрочнения.

Все эти исследования направлены на изучение одной проблемы – проблемы прочности и пластичности твердых тел и их долговечности при активной нагрузке и работе.

Однако обработка экспериментальных данных, и соответственно установление этих зависимостей, по-прежнему проводится практически вручную. Существует множество программ, способных облегчить работу исследователя, но в основном они направлены на построение графиков и зависимостей (*MathCad, Origin, Grapher, Surfer* и т.д.). Отсутствие комплексного программного обеспечения, способного помочь в анализе и представлении экспериментальных данных, полученных при исследовании пластической деформации и разрушения моно- и поликристаллических материалов, определяет необходимость в реализации комплексного программного продукта.



Рис. 1. Структура программы

На рис. 1 показана структура реализованной комплексной программы для обработки экспериментальных данных по исследованию пластической деформации. Программа написана на языках программирования C++ и C#, используя среду программирования *Microsoft Visual Studio* [3, 4].

Входные файлы для программы могут быть различными, например *.dat* файлы для определения коэффициента параболичности деформационной кривой или *.bmp* (или *.jpg*) файлы для обработки экспериментальных данных ультразвукового исследования.

После выбора входных данных происходит их численная обработка.

Для определения стадий упрочнения деформационного упрочнения соответствующие им коэффициенты параболичности, входные данные претерпевают математические преобразования – перевод данных в так называемые «истинные» координаты ($\ln(S-S_0) = f(\ln(e))$) по следующим формулам:

$$e = \ln(1 + \varepsilon), \quad (1)$$

$$S = \sigma(1 + \varepsilon), \quad (2)$$

$$S_0 = \sigma(\varepsilon = 0,002)(1 + 0,002), \quad (3)$$

$$\ln(S - S_0) = \ln(k) + n \cdot \ln(e), \quad (4)$$

где ε – деформация образца; σ – напряжение в образце.

Используя статистический модуль, задавшись коэффициентом корреляции $R = 0,98$, реализуем «грубый» поиск промежутков линейности функции. Коэффициент корреляции показывает степень зависимости двух случайных величин, в нашем случае – переведенные в «истинные» координаты значения напряжения (σ) и компонента тензора дисторсии (ε_{xx}).

Для повышения точности на каждом из найденных промежутков, задавшись $R = 0,99$, организуем повторный поиск промежутков линейности.

Найденные участки линейности с соответствующими им коэффициентами параболичности переводим в реальные координаты и выводим в файл *output.dat* и в консоль.

С помощью графического модуля (использует модуль OpenGL [5]) строим график зависимости напряжения (σ) от компонента тензора дисторсии (ε_{xx}).

Помечаем найденные границы линейности на построенном графике.

Вывод промежутков линейности и углового коэффициента на каждом промежутке в файл *output.dat*.

Для реализации модуля определения периода макролокализации пластической деформации был разработан алгоритм, делящийся на блоки.

Считываем координаты точек для каждой зависимости из файла. Дается входной файл, содержащий сведения о распределении компоненты ε_{xx} по образцу.

Математический метод, основанный на линейном сплайне [6] для нахождения пиков функции.

Для поиска пиков функции используется значение тангенса угла наклона прямой, т.к. его изменение характеризует изменение функции.

Сплайны – функции, которые широко используются в вопросах численного анализа, в машинной графике и в других областях. Сплайн позволяет определить характер функции на неизвестном промежутке при заданных граничных точках. Число этих промежутков является точностью, с которой интерполируются данные.

Сплайном первой степени называется непрерывная и линейная на каждом частичном промежутке функция. На каждом из этих промежутков функция описывается классическим уравнением прямой:

$$y = k \cdot x + b, \quad (5)$$

где k – коэффициент наклона прямой; b – свободный член.

Коэффициент наклона прямой k равен тангенсу угла наклона прямой. Тангенс угла наклона – это отношение изменения координаты по оси абсцисс и по оси ординат.

Интерполяцией для функции называется сплайн, удовлетворяющий условиям:

$$S(x_i) = y_i, i = 1, 2, \dots, n, \quad (6)$$

где $S(x)$ – значение функции сплайна; n – количество известных точек.

График линейного интерполяционного сплайна – это ломаная, проходящая через заданные точки.

В цикле по всем точкам находим для каждой пары точек уравнения прямой. В тот момент, когда коэффициент наклона полученной прямой становится отрицательным, текущую точку мы принимаем за максимум функции. И так далее по всем точкам собираем массив координат максимумов для каждой зависимости.

Дальше считаем среднее значение расстояния между максимумами для каждой зависимости и для всех зависимостей в целом. Вывод среднего значения расстояния между пиками, переход к следующему файлу (повтор всего алгоритма для каждого файла).

В пользовательском интерфейсе реализована идея модульности, т.е. работа начинается с запуска оболочки (Main), откуда уже можно запустить любой реализованный модуль. На рис. 2 показано главное меню.



Рис. 2. Вид оболочки Main

При выборе действия запускается окно, которое может быть индивидуальным для каждого действия и содержать нужные инструменты и вычисленные данные. Для обрабатывания данных нужно открыть файл (File → Open), после чего содержимое файла появится в текстовом окне. Текстовое окно (рис. 3) несет большой практический смысл, так как при получении экспериментальных данных на разных установках, записывается разный формат выходного файла, а при помощи текстового окна можно любой формат данных привести к стандартному виду. Также при помощи текстового поля можно оперативно исправить опечатки или ошибки в данных, после чего исправленный файл можно сохранить (File → Save).

По исходным значениям компоненты тензора пластической дилатации по поверхности образца, используя метод кубического сплайна [7], графический модуль позволяет представить картину распределения компоненты тензора по образцу.

После проверки текстового документа в текстовом поле приступаем к расчетам и построению графиков, для этого нужно нажать кнопку «Build», программа обрабатывает данные, находящиеся в текстовом поле на данный момент.

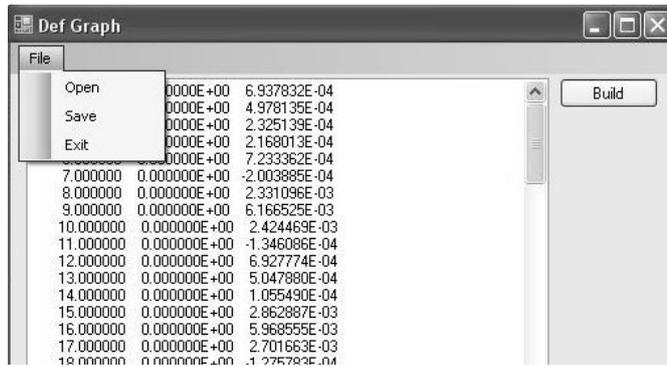


Рис. 3. Вид текстового окна

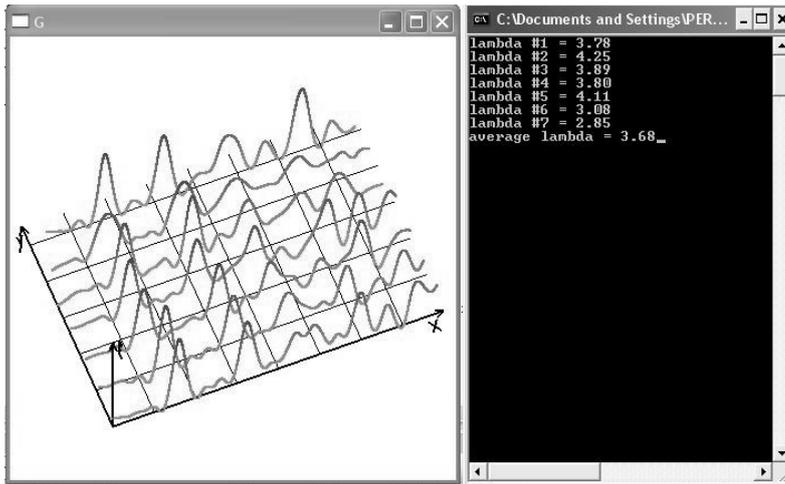


Рис. 4. Картина распределения компоненты тензора по образцу и результаты определения периода макролокализации пластической деформации

Результаты обработки также показываются в отдельных окнах (графическая модель и численные данные) (рис. 4). Численные данные, полученные программой, также дублируется в системный файл.

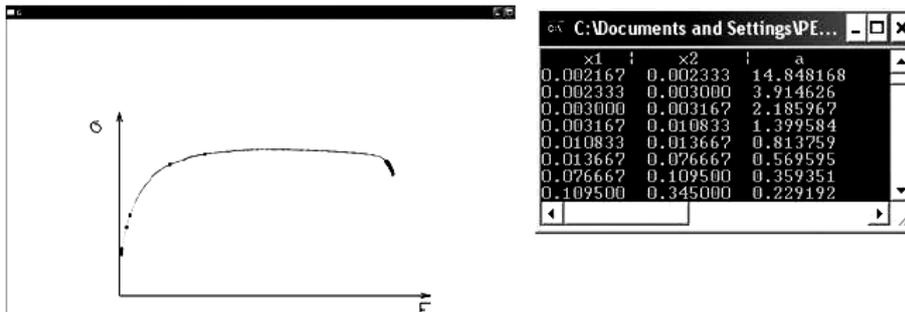


Рис. 5. Деформационная кривая и результаты определения стадий деформационного упрочнения и соответствующие им коэффициенты параболичности

Модуль по определению стадий деформационного упрочнения и соответствующие им коэффициенты параболичности, выводит результаты в графическом формате и численные данные (рис. 5).

Литература

1. Зуев Л.Б., Данилов В.И., Баранникова С.А. Физика макролокализации пластического течения. Новосибирск: Наука, 2008. 327 с.
2. Zuev L.B., Semukhin B.S., Zarikovskaya N.V. Deformation localization and ultrasound propagation rate in tensile Al as a function of grain size // Int. J. Sol. Str. 2003. Vol. 40, №4. P. 941–950.
3. Страуструп Б. Язык программирования C++. Специальное издание. М.: Вильямс, 2006. 1104 с.
4. Ватсон К., Беллиназо М., Корнс О. и др. C#. М., Лори, 2005. 861 с.
5. Тарасов И. OpenGL, 1-е изд. М.: Наука, 2000. 252 с.
6. Сплайн [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://ru.wikipedia.org/wiki/Сплайн>, свободный (дата обращения: 10.10.2011).
7. Кубический сплайн [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://ru.wikipedia.org/wiki/Кубический_сплайн, свободный (дата обращения: 16.11.2011).

УДК 681.2

КОМПЛЕКС ТЕСТИРОВАНИЯ СЕТЕВЫХ УСТРОЙСТВ И ПРИЛОЖЕНИЙ НА ПЛИС

Д.В. Шайкин

Представлены проблематика тестирования сетевых устройств и приложений, способы тестирования, архитектура экспериментального образца диагностического комплекса на ПЛИС.

Ключевые слова: тестирование, диагностика, сетевое устройство, сетевое приложение, Ethernet, ПЛИС.

Во многих современных микроконтроллерах существует поддержка одного или нескольких портов Ethernet, что позволяет достаточно быстро наладить обмен данными по локальной сети.

Прежде чем данные отправятся в сеть или будут переданы приложению из сети, они проходят весь коммуникационный стек (рис. 1) от уровня к уровню. Стек представляет собой аппаратно-программный интерфейс, обеспечивающий передачу прикладных данных, который условно можно разделить на независимые уровни:

1) TCP-стек – набор сетевых протоколов разных уровней модели сетевого взаимодействия DOD, используемых в сетях. Различные протоколы, входящие в состав стека, выполняют функции: взаимодействие хостов, логическая адресация и маршрутизация, контроль передачи данных.

В классическом варианте реализуется программно. Ввиду достаточно большой ресурсоёмкости зачастую используются облегчённые версии стека. Минимальный набор протоколов, который необходим для корректной работы в локальных сетях: IP, ARP, DHCP, ICMP, UDP или TCP.

2) Драйвер Ethernet контроллера – набор программных функций, прослойка для интеграции программного стека и аппаратного контроллера Ethernet.

3) Контроллер Ethernet – аппаратный блок для доступа к среде передачи. Выполняет физическую адресацию, кодирование и передачу данных по физическому каналу.

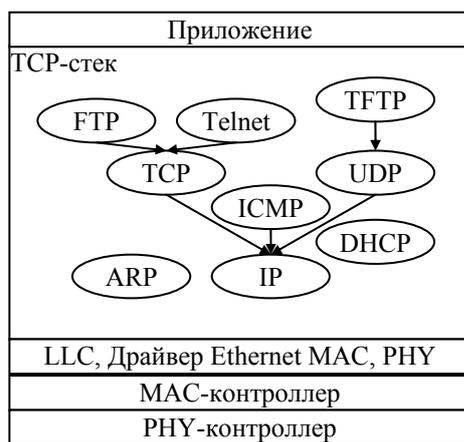


Рис. 1. Модель взаимодействия приложения со средой передачи данных

Каждый уровень обеспечивает определённый сервис, при сбое на одном из уровней возможны возникновения трудно диагностируемых неисправностей, которые могут привести к непредвиденным результатам работы устройства или приложения.

Аномальное поведение канала обмена данными может повлиять на работоспособность приложения как непосредственно – если алгоритм работы непосредственно зависит от данных получаемых из сети, так и косвенно – когда обработка стека протоколов требует большую часть процессорных ресурсов системы. Вторая проблема особенно актуальна для микропроцессорных систем низкой производительности при стрессовых нагрузках (DOS-атаках).

В первом случае возможны более разнообразные проблемы, связанные в первую очередь с нарушением логики работы протоколов обмена данными, что требует применения специальных механизмов выявления и исправления неисправностей. Ошибки возникают при аномальном поведении канала передачи, и проявляются: дублированием, уничтожением или чрезмерной задержкой части пакетов данных в сети.

Перечисленные ситуации трудно имитировать при тестировании разрабатываемого сетевого оборудования или приложения с помощью стандартных средств, поэтому существует вероятность некорректной отработки их в реальных условиях.

Поэтому существует потребность разработки специального оборудования, которое могло бы быстро интегрироваться в испытываемую систему и моделировать заданные аномальные ситуации.

В связи с высокой пропускной способностью канала Ethernet (на практике до 1 Гбит/с) применение стандартных микроконтроллеров для создания диагностического комплекса нецелесообразно, так как программная обработка данных на процессорном ядре может занять достаточно большое время. Это в свою очередь снижает детерминизм системы в целом.

В качестве элементной базы отлично подходит ПЛИС большой ёмкости типа FPGA. Достоинством данных ИМС является возможность заложить произвольный аппаратный функционал в разрабатываемую систему и наиболее эффективно подойти к решению поставленной задачи.

Исследуемая архитектура диагностического комплекса представлена на рис. 2. Разработка велась на FPGA фирмы ALTERA семейства CycloneIII в САПР Quartus II. Для диагностики отведено два порта Ethernet с поддержкой скоростей 10/100/1000 Мбит/с. Ethernet порты могут взаимодействовать как через системную шину – если требуется процессорная обработка или буферизирование в ОЗУ так и через блок-коммутатор – если требуется минимизировать время обработки данных. В этом случае принимаемый пакет может ретранслироваться на соседний порт синхронно с поступлением каждого байта данных. Третий порт служебный и необходим для удалённого конфигурирования комплекса и пересылки диагностической информации на ПК.

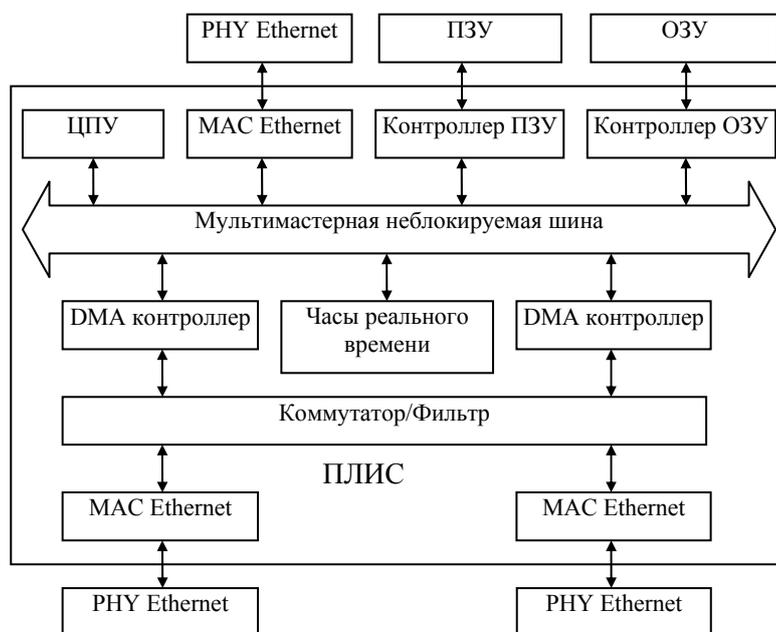


Рис. 2. Архитектура экспериментального образца комплекса тестирования

Для повышения детерминизма вся потоковая обработка информации выполняется аппаратными средствами ПЛИС синхронно с их поступлением. К такой обработке относятся: генерация полей заголовков пакетов, фильтрация данных по содержимому, маршрутизация и перекладка пакетов данных внутри системы.

Из расчёта полной загрузки обоих портов на максимальной скорости канала передачи следует, что подсистема коммутации и обработки трафика внутри кристалла должна обеспечивать пропускную способность не хуже 4 Гбит/с, вычисляемую по формуле

$$P_{\text{расч.мин}} = P_{\text{макс}} \times 2 \times N_{\text{порт}},$$

где $P_{\text{расч.мин}}$ – расчётная минимальная пропускная способность; $P_{\text{макс}}$ – максимальная пропускная способность канала передачи в одном направлении. При режиме передачи Full-duplex величина удваивается; $N_{\text{порт}}$ – количество портов.

Для разрядности шины данных 32 бита минимальная системная частота составляет 125 МГц.

При использовании единой памяти ОЗУ для нужд процессорного ядра и подсистемы коммуникаций требования к выбору микросхемы памяти и контроллеру

доступа к ОЗУ устанавливаются ещё жестче. Требуемая пропускная способность подсистемы оперативной памяти пропорциональна количеству абонентов работы с ресурсом. С ростом количества абонентов и их активности работы с ОЗУ возрастает и латентность доступа к общей памяти. Поэтому на стороне контроллера памяти требуется разработка отдельных буферизируемых портов для каждого потребителя и специального арбитра доступа к ресурсу.

В используемых для исследования ПЛИС семейства Cyclone III возможна поддержка ОЗУ типа SDRAM, DDR, DDR2 на частотах до 200 МГц. На исследуемом прототипе реализован контроллер доступа к памяти DDR с шириной шины данных 16 бит. Расчётная максимальная пропускная способность составляет 6400 Гбит/с.

Снижение влияния ЦПУ на подсистему памяти возможно при уменьшении количества обращений к памяти, что требует увеличения объёмов кэш-данных и кэш-инструкций, а также оптимизации исполняемой программы по минимизации кода и объёму обрабатываемых данных.

На программную часть отводится задача выполнения алгоритма управления работой комплекса и генерация диагностической информации. Данный подход позволил существенно снизить негативное влияние задержек, возникающих при программной обработке данных, и работать при полной загрузке канала передачи данных в реальном масштабе времени.

Для проведения тестов возможны схемы включения диагностического комплекса (рис. 3):

1) Одностороннее подключение – подключение диагностического комплекса непосредственно к тестируемому устройству.

2) Подключение через коммутатор – подключение к одному из портов коммутатора, находящегося в локальной сети тестируемого устройства.

3) Подключение в разрыв канала связи – схема, когда один из портов подключается к устройству, а второй в локальную сеть.

Первая схема тестов самая простая и позволяет проверить работу устройства или приложения при различной нагрузке на подсистему коммуникаций (стрессовую устойчивость).

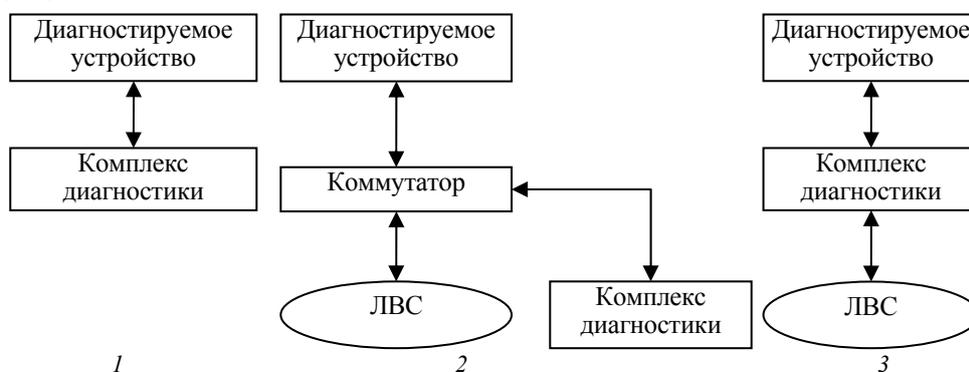


Рис. 3. Схема включения диагностического комплекса:

1 – одностороннее подключение; 2 – через коммутатор; 3 – в разрыв линии

Суть работы тестового комплекса заключается в том, чтобы, создать в сети дозируемую нагрузку с определенными параметрами трафика: тип протокола, направление и интенсивность трафика, длина кадров, адрес источника и прием-

ника. При росте объема поступающих данных на устройство скорость работы приложений снижается, поскольку процессорное ядро вынуждено уделять время на обработку протоколов принимаемых данных.

Во втором случае возможно отлаживать приложения, активно работающие в сети, коммутатор направит как полезные, так и тестовые данные на устройство. Рост объёмов принимаемых данных тестируемым устройством может привести к потере полезных данных. При переполнении буферов временного хранения данных контроллер Ethernet будет вынужден игнорировать все пакеты, пока центральный процессор не освободит место, скопировав данные в память для обработки.

Данная схема позволяет проверить работу как тестируемого устройства, так и средств маршрутизации, а также производить сбор и анализ трафика при «зеркалировании» потока данных с исследуемого порта коммутатором на порт к подключённому диагностическому комплексу.

Третья схема позволяет проводить тестирование, оказывая влияние непосредственно на «полезные» пакеты данных. Так как диагностический комплекс «включается» в разрыв кабеля, возможно проведение тестов по моделированию требуемых характеристик канала передачи:

- потеря части пакетов – путём фильтрации данных;
- задержка на заданное время – путём буферизации данных во внутреннюю память на заданное время;
- искажение – изменение части данных в пакете;
- дублирование данных – генерация копии, вслед за пакетом данных.

Реализация данного функционала требует разработки дополнительно аппаратных блоков (рис. 4):

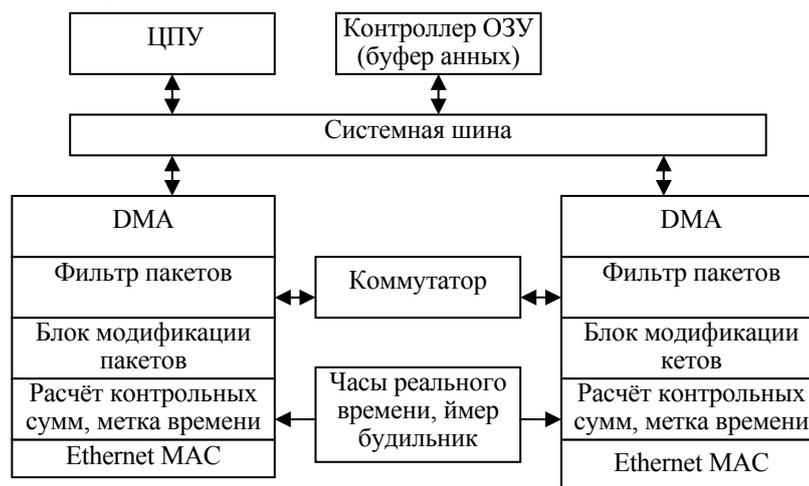


Рис. 4. Архитектура подсистемы коммутации данных

- блока фильтрации данных – для выделения пакетов данных, требуемых для обработки и перенаправления целевого трафика во временный буфер хранения или в Ethernet порт для передачи;
- блока коммутации – для передачи целевого трафика между Ethernet портами;
- часов реального времени – для присвоения меток времени для каждого пакета данных, с целью организации нормированной задержки пакета во временном буфере;

- DMA контроллера – для перекладки данных в ОЗУ минуя ЦПУ;
- блока модификации – для изменения отдельных, заданных полей в пакетах данных;
- блока расчёта контрольных сумм – для проверки и корректировки полей контрольных сумм в заголовках пакетов.

Данная схема подходит для исследования приложений, работающих со специализированными протоколами реального времени, так как позволяет в реальном масштабе времени обрабатывать ретранслируемый поток данных без промежуточного коммуникационного оборудования.

Заключение. В связи с тем, что многие аномальные ситуации трудно имитировать при тестировании сетевого оборудования и приложения с помощью стандартных средств, существует вероятность некорректной отработки их в реальных условиях. Для решения подобных задач был разработан экспериментальный образец диагностического комплекса, который в перспективе может стать отличным помощником для разработчиков и тестеров сетевого оборудования, а также для служб пуска налажки и инжиниринга.

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ОЦЕНКИ СТОИМОСТИ БИЗНЕСА

Т.А. Афиркина, С.В. Суркова

Предложено проектирование, разработка и реализация автоматизированной системы оценки стоимости бизнеса. Приведены базовые подходы по указанной проблематике, указаны их слабые стороны. На основании сделанных выводов в качестве теоретической основы разрабатываемого продукта предложено использовать модели, применяемые в западной практике.

Ключевые слова: оценка стоимости бизнеса, затратный подход, доходный подход, сравнительный подход.

Оценка стоимости бизнеса компании – это не только инструмент принятия стратегических решений, но и инструмент управления стоимостью как компании в целом, так и элементов, участвующих в ее формировании.

Объектом оценки является бизнес компании, при этом под компанией понимается один или несколько имущественных комплексов, выраженных в виде самостоятельных юридических лиц, в состав которых входят все виды имущества, предназначенные для осуществления деятельности (бизнеса). Исходя из данного определения, компанию можно рассматривать в двух срезах: с точки зрения элементов, ее формирующих (по сути – это элементы имущественного комплекса в виде активов и обязательств), и элементов, формирующих ее бизнес (совокупность бизнес-единиц). Данная трактовка позволяет выделить еще один уровень: если компания представляет собой структурно-сложный бизнес, то элементами, ее формирующими (как и элементами, формирующими ее бизнес), выступает совокупность имущественных комплексов. Данное деление необходимо для выделения элементов, не участвующих в формировании стоимости бизнеса компании, реструктуризация которых позволит получить дополнительный эффект, выраженный в виде денежных средств или иного рода актива.

В сложившейся практике оценки компании применяются доходный, затратный и сравнительный подходы. При этом в рамках каждого из подходов исполь-

зуются методы оценки, позволяющие получить итоговый вывод о величине стоимости компании. В рамках доходного подхода традиционно используются метод дисконтирования денежных потоков и метод капитализации. В рамках затратного подхода – метод чистых активов и метод ликвидационной стоимости и т.д. Каждый из этих подходов и методов имеет свои положительные и отрицательные стороны, обуславливающие целесообразность его применения, также акцентируется внимание на определенных характеристиках бизнеса. Например, доходный подход ставит акцент на доходности бизнеса, затратный – на активах и обременениях бизнеса, сравнительный – на оценке объекта путем сопоставления сделок по аналогичным объектам и т.п. [1, 2].

Практическое использование результатов оценки в части метода чистых активов и методов, базирующихся на сравнительном подходе, часто не отражает реальной ситуации, происходящей в бизнесе оцениваемой компании. Использование методов сравнительного подхода [2] затруднено в силу отсутствия адекватных аналогов на российском фондовом рынке, использование же западных аналогов является не совсем обоснованным для сопоставления стандартов бухгалтерского учета, а также бизнес-среды экономик различных стран. Определенного рода субъективность в расчеты также привносит взвешивание, используемое для получения итоговой величины стоимости.

Все перечисленные выше проблемы приводят к необходимости привлечения широкого финансового аналитического аппарата к оценке, основная цель которого – помочь эксперту-оценщику правильно выбрать приоритетные аспекты объекта оценки.

Создание автоматизированной системы оценки стоимости бизнеса даст возможность применять современные методы оценки для пользователей, обладающих знаниями базовых экономических понятий, моделировать параметры объекта оценки и той отрасли рынка, в которых он действует, ускорить процесс получения конечного результата оценки.

Практическая реализация модели включает в себя три блока: блок «Исходные данные», блок «Финансовый анализ», блок «Модели оценки».

Блок «Исходные данные» предполагает внесение информации, необходимой для осуществления расчетов в блоках «Финансовый анализ» и «Модели оценки». В качестве входных данных используются данные отчетной документации оцениваемой компании и компаний-аналогов, содержащие сведения об их финансовом состоянии, результатах хозяйственной деятельности, структуре капитала, инвестиционных проектах, информацию о рынке, в котором действует оцениваемое предприятие.

В рамках этой модели целесообразно использование в оценке стоимости компаний методов, широко применяемых в западной практике. Проектируемая модель автоматизированной системы должна позволять проводить анализ текущей деятельности компании, а также осуществлять оценку стоимости бизнеса, исходя из методов денежных потоков (Capital Cash Flows (CCF), Equity Cash Flows (ECF), Free Cash Flows (FCF)); методов, базирующихся на концепции остаточного дохода (Economic Value Added (EVA), Cash Value Added (CVA), Shareholder Value Added (SVA)), и др., а также моделей EBO и Black-Scholes.

Методы оценки [3] следует сгруппировать:

- методы оценки, базирующиеся на FCF, ECF, CCF;
- методы оценки, базирующиеся на NPV, APV, SNPV;
- методы оценки, базирующиеся на EVA, MVA, CVA;

- метод оценки, основанный на совмещении доходов и активов (ЕВО);
- метод оценки, базирующийся на рыночной стоимости активов с учетом корректировки на обременения.

Результирующим итогом является построение прогнозного баланса, фиксация результатов в части финансового анализа оцениваемой компании и получение величин стоимости бизнеса компании, определенных с помощью CCF, ECF, FCF, EVA, CVA, SVA, EBO, Black-Scoles и т.п.

Заключение. Таким образом, проектируемая система позволит проводить оценку стоимости бизнеса с учетом специфики предприятия. Программная реализация позволит пользователю проводить настройку методики оценки стоимости бизнеса. Дальнейшая работа авторов будет направлена на реализацию программного продукта и дополнение его новыми методами оценки.

Литература

1. Оценка бизнеса: Учебное пособие / Под ред. А.Г. Грязновой, М.А. Федотовой М.: Финансы и статистика, 2002.
2. Валдайцев И.И. Оценка бизнеса и управление стоимостью предприятия. М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2001.
3. Ван Хорн Дж. и М. Вахович Дж. Основы финансового менеджмента. М.: Вильямс, 2001.

УДК 004.7

РАЗРАБОТКА СРЕДСТВ ДИАГНОСТИКИ РАБОТЫ ПРОМЫШЛЕННЫХ СЕТЕЙ ETHERNET

Д.А. Григорьева, А.А. Зоркальцев, А.А. Овчинников, В.А. Онуфриев

Рассмотрены вопросы диагностирования промышленных сетей, построенных с применением технологии Ethernet. Приведены особенности таких сетей, основные диагностируемые параметры и сформулированы требования к диагностическому комплексу. Описан блок мониторинга и архивации данных, как часть комплекса. Отражено текущее состояние разработки аппаратного и программного обеспечения, а также обозначены направления дальнейшего развития.

Ключевые слова: комплекс диагностирования, промышленная автоматизация, промышленные сети.

Постановка задачи. В настоящее время при решении задач автоматизации технологических процессов для обеспечения взаимодействия различного оборудования широко используются промышленные сети на основе технологии Ethernet [1]. Эти решения, называемые Industrial Ethernet, были специально адаптированы для применения в системах промышленной автоматизации и приняты в качестве международных стандартов [2, 3]. Изменение метода доступа к среде, сокращение времени цикла передачи данных, обеспечение высокого детерминизма в работе позволило расширить область применения таких сетей. Industrial Ethernet (IE) обычно используется для обмена данными между промышленными логическими контроллерами (ПЛК) и передачи данных от ПЛК в сервера АСУ и рабочие места операторов. Все чаще IE применяется для подключения к контроллерам высокоскоростных датчиков и исполнительных устройств.

Для таких систем важно контролировать:

- точность времени выдачи сетевых кадров данных от источника;

- время передачи кадров в сети;
- время приема данных в разных узлах сети (для контроля синхронного управления);
- содержимое кадров данных;
- корректность маршрутизации Ethernet кадров;
- правильность конфигурации приоритетов данных;
- загрузку канала передачи данных;
- искажение данных;
- наличие недопустимых данных в технологической сети;
- доступность сетевых устройств;
- аварийные и диагностические сообщения устройств;
- время и правильность изменения маршрутов в сети при отказах и т.п.

Изменение параметров работы сети может вести к задержке получения данных или их потере. В то же время, сбой в работе сети не так просто поддается обнаружению и устранению. В промышленном секторе появление любых дефектов в сетях передачи данных может привести к материальным и людским потерям. Контроль работы сети важен как в процессе разработки системы, так и в процессе пуско-наладочных работ и эксплуатации.

На данный момент задача диагностирования промышленных сетей Industrial Ethernet актуальна, что подтверждается выпуском соответствующего оборудования такими известными производителями как Hilscher (netANALYZER), Backhoff (ET2000 Industrial Ethernet multi-channel probe) и др. Однако представленные на рынке устройства не позволяют осуществить в полном объеме контроль указанных выше параметров, в них отсутствует функция хранения и фильтрации данных, также они предназначены для работы в комнатных условиях. В связи с этим, авторы видят необходимость в разработке устройства, отличающегося от аналогов, расширенным функционалом, способным верно определять возникающие сбои и неисправности в работе сети, а в перспективе – прогнозирующем также их возникновение.

Предлагаемый метод решения проблемы. Для решения поставленной задачи предлагается использовать диагностический комплекс, включающего один или несколько блоков мониторинга/архивации данных и мобильную станцию оператора со специализированным программным обеспечением (ПО) для конфигурирования и анализа результатов работы системы. Блок мониторинга представляет собой устройство, включаемое в технологическую сеть, пропускающее через себя трафик контролируемого канала, позволяющий анализировать проходящий трафик для оценки состояния сетей передачи данных.

При этом устройство должно:

1. Обеспечить минимальную задержку прохождения данных (менее 1 мкс).
2. Исключить внесение помех в работу сети.
3. Обеспечить возможность работы с трафиком 200 Мбит/с (Full-Duplex 100 Mb/s).
4. Вести архивацию событий в сети.
5. Иметь возможность фильтрации сохраняемых данных.
6. Удовлетворять требованиям стандартов IEC 61850 [2], IEC 61158 [3], IEC 61784 [4], IEEE 1588 [5].

Ядро модуля представляет из себя Программируемую Логическую Интегральную Схему (ПЛИС) типа FPGA, задача которой – реализация интерфейсов передачи данных, а также обработка данных, их сохранение и извлечение по служебному интерфейсу. ПЛИС была выбрана в качестве ядра для блока, так как позволит реализовывать масштабируемую архитектуру с возможностью высоко-

скоростной аппаратно-программной обработки данных. Возможность использования в модуле до четырех параллельно работающих SD-карт позволит реализовать высокоскоростной массив хранения данных (скорость записи до 100 МБайт/с). За счет гибкой структуры и использования высокоскоростной ПЛИС возможна поддержка новых спецификаций SD-карт, что позволит увеличить емкость и скорость работы.

Актуальность проекта определяется:

1. Широким распространением сетей Industrial Ethernet в современных системах управления и их внедрением на новых и модернизируемых предприятиях энергетического и нефтегазового комплекса России.

2. Необходимостью диагностирования сетей в реальных промышленных условиях с обеспечением хранения больших объемов данных.

3. Получаемые преимущества при использовании устройства:

4. Устройство позволяет «прослушивать» весь технологический трафик на объекте, а также служебные сообщения. Это дает возможность отслеживания отклонения данных трафика от нормы, начиная с нижнего уровня. Возможность использования фильтра (по IP-адресу, протоколу, MAC-адресу, адресу устройства в промышленной сети, типу данных, их адресу и т.д.) избавляет от хранения лишних данных.

5. Система позволяет архивировать данные, в том числе и служебные.

6. Хранение и обработка данных непосредственно на объекте. Использование термоизолированного, искробезопасного и взрывобезопасные корпуса позволяет размещать систему в сложных промышленных условиях, непосредственно рядом с диагностируемым оборудованием для более полного контроля и точной локализации места неисправности.

7. Возможность контроля и управление, в том числе удаленного через туннелирование в сети INTERNET, по служебному интерфейсу.

8. Надежность хранения данных. Обеспечивается алгоритмом записи и кодирования данных.

Текущие достижения и направление развития проекта. На данном этапе разработки выполнены следующие работы:

- разработаны технические требования и техническое задание на разрабатываемые модули;
- разработана электрическая структурная, функциональная и принципиальная схема устройства;
- разрабатывается программное обеспечение для реализации функций обмена по интерфейсу Ethernet и функций записи/чтения SD-карты;
- проводится оценка производительности микроконтроллеров Renesas Electronics, используемых для реализации сервисных функций модуля.

Несмотря на то, что основные функции модуля будет обеспечивать специализированный контроллер реализованный на ПЛИС и описанный на языках описания аппаратуры (VHDL, Verilog), исполнители посчитали целесообразным вынести сервисные функции на отдельный высокопроизводительный 32-разрядный микроконтроллер (МК). Это позволит обеспечить уменьшение требуемой логической емкости ПЛИС, и повысить производительность программно реализуемых функции конфигурирования, управления взаимодействием с сетью и хранилищем данных, а также передачей данных в мобильную станцию оператора. Так же это позволит создать версию устройства, без применения ПЛИС, что может быть использовано для снижения стоимости комплекса. По предварительным

оценкам, упрощенный вариант устройства на базе 32-разрядного МК позволит обеспечить работу с сетями до 100 Мбит/с.

В процессе разработки устройства на базе 32-разрядного микроконтроллера было принято решение использовать операционную систему реального времени с поддержкой высокопроизводительного стека протоколов TCP/IP и поддержкой работы с хранилищем данных в виде файловой системы на базе SD-карт.

Поставленные ограничения приводят к необходимости проведения исследования предлагаемых различными компаниями операционных систем реального времени. Критерии пригодности системы для использования в проекте:

- системные требования, которым бы удовлетворял используемый микроконтроллер;
- достаточное быстродействие для обработки предполагаемого объема данных;
- совместимость с стеком протоколов TCP/IP;
- возможность работы с массивом SD-карт;
- достаточная надежность системы;
- ценовой критерий. Большинство из рассмотренных операционных систем являются коммерческими и в свободном доступе находятся только их версии для ознакомительного использования с ограниченным функционалом.

На данном этапе для использования в проекте выбрана операционная система uC/OS II компании Micrium. Исходный код системы предоставляется производителем, но использование системы в коммерческих целях требует лицензирования.

Выбор стека протоколов TCP/IP также требует предварительного исследования и выбора оптимального варианта в соответствии с необходимыми требованиями.

Заключение. Спроектированное в ходе работы устройство позволит осуществлять диагностику и мониторинг промышленных сетей на базе Industrial Ethernet, выявлять неисправности и возможные ошибки в передаче данных. Архивация данных дает возможность осуществлять анализ возникших ошибок с целью предотвращения их появления в будущем.

Можно сделать вывод и о коммерциализации устройства. По причине того, что сети Ethernet все больше внедряются в промышленность, потребителями устройства предполагаются:

- инжиниринговые компании;
- сервисные службы предприятий нефтегазового и энергетического комплексов.

Решения, полученные в ходе разработки, могут быть использованы для создания коммуникационных модулей для промышленных контроллеров, а также при создании учебных лабораторных стендов.

Литература

1. Орлов С. Ethernet – экспансия на производство // Журнал сетевых решений «LAN». №8, 2008. С. 70–80.
2. IEC 61158 «Industrial communication networks – Fieldbus specifications», P. 1–6. Technical Committee 65C – Industrial networks.
3. IEC 61784-2 ed.2.0 «Industrial communication networks – Profiles». P. 2: Additional fieldbus profiles for real-time networks based on ISO/IEC 8802-3 // Technical Committee 65C – Industrial networks, 2010. 230 p.
4. Technical Issues. IEC 61850 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://tissues.iec61850.com>, свободный (дата обращения: 7.09.2011).
5. IEEE1588 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.ieee1588.com/>, свободный (дата обращения: 7.09.2011).

**ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ,
АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ
УСТРОЙСТВ И СИСТЕМ**

*Председатель секции – Черкашин Михаил Владимирович,
к.т.н., доцент каф. КСУП, декан ФВС*

УДК 621.372: 004.94

**ПРОГРАММА ЭКСТРАКЦИИ ЭКВИВАЛЕНТНЫХ СХЕМ ПАССИВНЫХ
СВЧ-КОМПОНЕНТОВ В СРЕДЕ СИМВОЛЬНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ**

И.М. Добуш, М.В. Черкашин, Л.И. Бабак

Кратко представлен общий подход к построению моделей СВЧ-компонентов в виде эквивалентных схем (ЭС), приведены методики экстракции ЭС на основе решения системы компонентных уравнений. Описана программа SYMODEL, позволяющая осуществить вывод в символьной форме выражений для вычисления элементов ЭС пассивных СВЧ-компонентов по результатам измерений. Программа написана в среде символьных вычислений Maple V.

Ключевые слова: СВЧ-компонент, модель, эквивалентная схема, экстракция, символьные вычисления, программа.

Введение. Одним из способов построения эквивалентных схем (ЭС) пассивных и активных СВЧ-компонентов (резисторов, конденсаторов, катушек индуктивности, линий передачи и неоднородностей, транзисторов и т.д.) является метод прямой экстракции. При этом структура ЭС задается разработчиком, задача состоит в поиске таких значений элементов ЭС, при которых рассчитанные по модели характеристики СВЧ-компонента (например, S -параметры) хорошо совпадают с измеренными значениями в заданном диапазоне частот.

В [1] предложены две методики решения указанной задачи. Первая из них – аналитическая. Она предполагает, что все искомые элементы ЭС находятся непосредственно из решения системы уравнений, полученной приравнением аналитических выражений для моделируемых характеристик компонента заданным (измеренным) значениям в заранее указанных частотных точках. При этом число уравнений должно быть равно числу искомых элементов.

Такой подход может рассматриваться как один из вариантов общей процедуры синтеза цепи на основе решения полной системы компонентных уравнений (СКУ) [1]. Методика является универсальной, т.е. не зависит от типа СВЧ-компонента, структуры и сложности ЭС. Кроме того, она дает точное решение задачи (для используемой математической формулировки). Однако на практике ее применение для СВЧ-компонентов, имеющих сложные ЭС (с количеством элементов более четырех), затруднено из-за необходимости решать системы нелинейных уравнений высокого порядка.

Поэтому в [1] была предложена также комбинированная методика, объединяющая в себе экстракцию ЭС на основе решения СКУ и оптимизацию. Она позволяет уменьшить размерность решаемой системы уравнений и благодаря этому

применима к более сложным ЭС компонентам. Недостатком комбинированной методики относится необходимость индивидуального подхода к конкретной задаче построения ЭС.

В настоящей статье кратко описываются общий подход, а также аналитическая и комбинированная методики экстракции ЭС на основе решения СКУ. Представлена реализованная на этой базе программа определения элементов ЭС пассивных СВЧ-компонентов SYMODEL, написанная в среде системы символьных вычислений Maple V [2].

Общий подход к экстракции ЭС на основе решения СКУ. Общая процедура экстракции ЭС СВЧ-компонента включает два основных этапа:

1. Составление полной СКУ относительно всех неизвестных элементов ЭС.
2. Нахождение значений элементов ЭС в результате решения СКУ.

Рассмотрим первый этап. Для составления СКУ требуется вначале получить в аналитической форме соотношения для собственных параметров многополюсной цепи, представляющей собой ЭС пассивного компонента (например, Z -, Y - или S -параметров). Эти соотношения определяют в явном виде зависимости указанных собственных параметров цепи от элементов ЭС.

Из теории цепей известно, что, в частности, Y -параметры пассивной N -полюсной цепи на сосредоточенных RLC -элементах представляют собой дробно-рациональные функции и могут быть представлены в виде

$$Y_{ij}(\mathbf{e}, p) = \frac{\sum_{l=0}^s a_l(\mathbf{e}) p^l}{\sum_{l=1}^t b_l(\mathbf{e}) p^l} = \frac{A(\mathbf{e}, p)}{B(\mathbf{e}, p)}; \quad i, j = \overline{1, N}, \quad (1)$$

где $a_l(\mathbf{e})$, $b_l(\mathbf{e})$ – коэффициенты полиномов $A(\mathbf{e}, p)$ и $B(\mathbf{e}, p)$, выраженные в символьной форме как функции параметров элементов цепи; $p = j\omega$ – комплексная частота; $\mathbf{e} = \{\mathbf{R}, \mathbf{L}, \mathbf{C}\} = (e_1, \dots, e_n)$ – вектор параметров элементов цепи, его компоненты представляют собой сопротивления, емкости и индуктивности пассивных элементов; n – число элементов цепи. Выражения для Z - и S -параметров пассивной цепи на сосредоточенных RLC -элементах тоже могут быть представлены в виде, аналогичном (1).

Рассмотрим составление СКУ при экстракции ЭС, при этом полагаем, что структура ЭС задана. Компонентные уравнения получаются путем приравнивания выраженных в аналитическом виде собственных параметров цепи (ЭС СВЧ-компонента) заданным (измеренным, смоделированным) значениям на одной или нескольких частотах. Пусть известно численное (в общем случае комплексное) значение $Y_{ij}^0(\omega_q)$ элемента матрицы проводимости Y_{ij} СВЧ-компонента на частоте ω_q . Тогда с учетом (1) компонентное уравнение для этой частоты можно записать в следующей комплексной форме:

$$Y_{ij}(\mathbf{e}, \omega_q) = \frac{\sum_{l=0}^s a_l(\mathbf{e})(j\omega_q)^l}{\sum_{l=1}^t b_l(\mathbf{e})(j\omega_q)^l} = Y_{ij}^0(\omega_q). \quad (2)$$

СКУ составляется из компонентных уравнений вида (2), записанных для выбранных (всех или некоторых) Y -параметров компонента РЭУ и выбранных час-

уравнений, аналитические методы позволяют найти все решения системы, при этом не требуется начальное приближение. Для аналитического решения систем полиномиальных уравнений (СПУ) в математике был предложен ряд универсальных методов, основанных на теории последовательного исключения переменных, наиболее известными являются метод исключения с помощью элементарных преобразований и метод исключения на основе результатов полиномов. Однако эти методы трудоемки и на практике могут быть применены лишь к СПУ с небольшим числом неизвестных (3–5).

Решение СКУ может быть значительно облегчено при использовании значительного достижения, полученного недавно в теории исключения и компьютерной алгебре – алгоритмов решения СПУ на основе базисов Гребнера (стандартных базисов) [3]. Для любой СПУ вида (4) (или в развернутом виде (3)) *единственным образом* может быть записана эквивалентная каноническая система полиномиальных уравнений

$$\mathbf{G}(\mathbf{e})=0, \quad (5)$$

где $\mathbf{G}(\mathbf{e})=(g_1(\mathbf{e}), \dots, g_m(\mathbf{e}))$ – вектор-функция. Набор полиномов $\{g_1(\mathbf{e}), \dots, g_m(\mathbf{e})\}$, входящих в состав канонической системы (5), называется базисом Гребнера (стандартным базисом) исходной системы (4). При этом каноническая система уравнений (5) обладает следующими свойствами [3]:

1. Системы уравнений (4) и (5) имеют одинаковые множества решений.
2. Система уравнений (5) имеет гораздо более простой вид, чем исходная система (4), благодаря этому ее решение гораздо проще.

В литературе разработаны практические алгоритмы поиска базисов Гребнера для заданной СПУ [3–5], при этом каноническая система уравнений (5) находится в аналитическом (символьном) виде.

Комбинированная методика экстракции ЭС. При использовании комбинированной методики [1] вектор искомым элементов ЭС $\mathbf{e}=(e_1, e_2, \dots, e_n)$ разделяется определенным образом на две части:

$$\mathbf{e}=(\mathbf{e}_A, \mathbf{e}_B), \quad (6)$$

где $\mathbf{e}_A=(e_1, e_2, \dots, e_{n_1})$ – вектор *зависимых* элементов размерности n_1 ; $\mathbf{e}_B=(e_{n_1+1}, e_{n_1+2}, \dots, e_{n_1+n_2})$ – вектор *независимых* элементов размерности n_2 , назовем их элементами; $n=n_1+n_2$.

Систему (6) разделим на две подсистемы:

$$\mathbf{F}_A(\mathbf{e}_A, \mathbf{e}_B)=0, \quad (7)$$

$$\mathbf{F}_B(\mathbf{e}_A, \mathbf{e}_B)=0, \quad (8)$$

где $\mathbf{F}_A=(f_1, f_2, \dots, f_{n_1})$; $\mathbf{F}_B=(f_{n_1+1}, f_{n_1+2}, \dots, f_{n_1+n_2})$ – вектор-функции. С помощью первой подсистемы уравнений (7) установим связь между векторами \mathbf{e}_A и \mathbf{e}_B . Для произвольной системы нелинейных уравнений получить эту связь в явном виде далеко не всегда возможно. Однако в случае СПУ метод базисов Гребнера позволяет определить аналитические соотношения, выражающие элементы вектора \mathbf{e}_A через элементы вектора \mathbf{e}_B :

$$\mathbf{e}_A=\mathbf{H}(\mathbf{e}_B), \quad (9)$$

где \mathbf{H} – в общем случае нелинейная вектор-функция.

Подставим соотношения (9) во вторую подсистему (8), получим:

$$\mathbf{F}_B(\mathbf{H}(\mathbf{e}_B), \mathbf{e}_B)=0. \quad (10)$$

Теперь все уравнения подсистемы (8) зависят только от вектора \mathbf{e}_B .

Основная идея методики состоит в том, чтобы найти значения независимых элементов ЭС e_B , при которых удовлетворяются (точно или приближенно) уравнения (10). При этом уравнения первой подсистемы (7) выполняются автоматически, так как при формировании (10) учтена связь между векторами e_A и e_B , полученная из (9). После нахождения независимых элементов ЭС e_B с помощью уравнений связи (9) легко могут быть вычислены значения зависимых элементов ЭС e_A .

Для поиска значений независимых элементов ЭС e_B , точно или приближенно удовлетворяющих уравнениям (10), целесообразно использовать оптимизационные методы. Меньшая размерность подсистемы (7) позволяет упростить и облегчить ее решение с помощью базисов Гребнера по сравнению с полной системой уравнений (4), решаемой в случае строгой экстракции.

Решение задачи экстракции ЭС с использованием систем аналитических вычислений. В [1] отмечалось, что для автоматизированного решения задачи экстракции СВЧ-компонентов перспективным является применение универсальных программных систем компьютерной алгебры (аналитических вычислений) [5]. Такие известные системы, как MapleV, Mathematica, Derive и другие, представляют собой мощную специализированную среду для решения задач аналитических преобразований, включающую специальный язык, программы обработки символьной информации, математические подпрограммы, вывод графической информации и т.д. Эти системы позволяют выполнить разнообразные операции над математическими выражениями, представленными в символьной форме, а также реализовать весьма сложные алгоритмы, включающие различные математические операторы и преобразования.

Осуществление алгоритма символьного анализа цепей в системе компьютерной алгебры дает возможность автоматизировать процесс получения аналитических моделей сложных электронных цепей и устройств, существенно сократить затраты времени и избежать ошибок при выводе формул. В частности, программа символьного анализа СВЧ-цепей на этой основе была разработана в [6].

В задаче экстракции ЭС применение подобных алгоритмов символьного анализа позволяет автоматизировать получение в аналитической форме выражений для Z -, Y - или S -параметров цепи произвольной топологии и последующее составление СКУ. Алгоритмы символьного решения СПУ на основе базисов Гребнера также включены в распространенные системы компьютерной алгебры. Поэтому на основе этих пакетов появляется возможность полностью реализовать программу автоматического составления и решения СКУ для определения элементов ЭС СВЧ-компонентов.

Назначение и краткое описание программы SYMODEL. Аналитическая и комбинированная методики нахождения элементов ЭС реализованы в программе SYMODEL, написанной в среде системы аналитических вычислений Maple V [2]. Назначением программы SYMODEL является вывод в символьной форме выражений для вычисления элементов ЭС пассивных СВЧ-компонентов по результатам измерений, а также расчет численных значений этих элементов. Предполагается, что ЭС пассивного компонента включает в себя только пассивные сосредоточенные R -, L - и C -элементы.

Блок-схема алгоритма программы SYMODEL представлена на рис. 1. В качестве входных данных программа использует информационный массив, в котором описана структура ЭС пассивного СВЧ-компонента. Этот массив содержит данные о типах и узлах подключения элементов в ЭС.

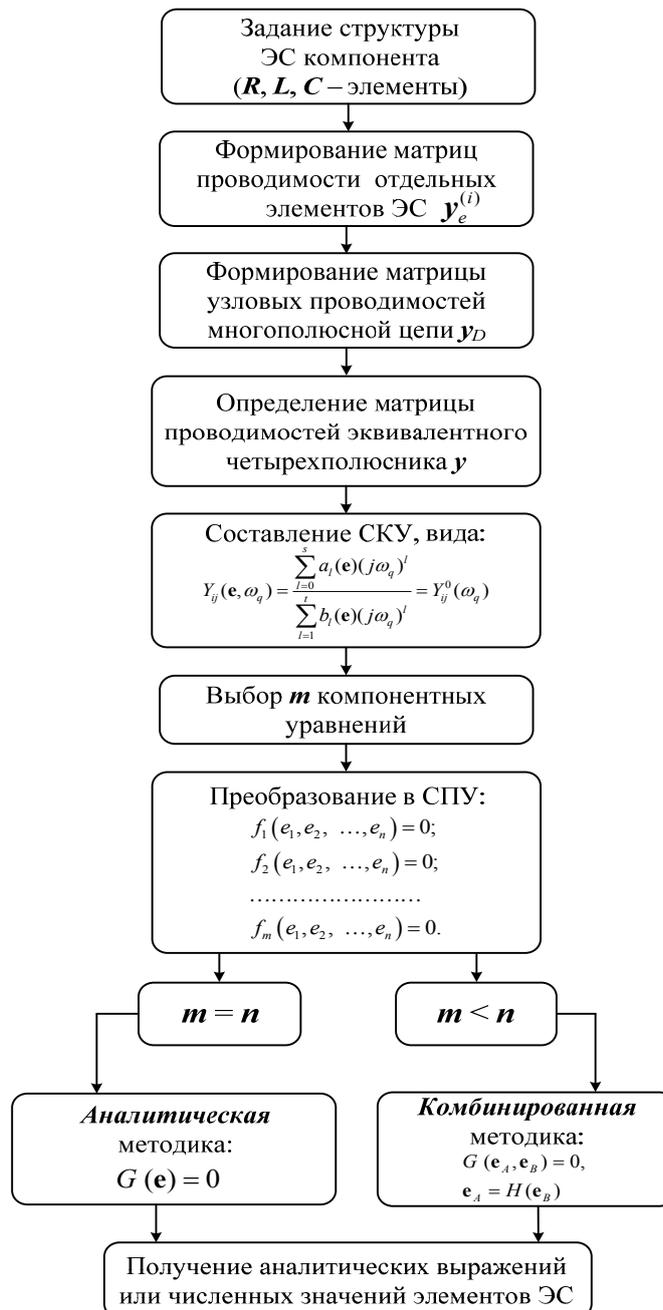


Рис. 1. Блок-схема алгоритма программы SYMODEL

По полученной информации о структуре схемы программа в аналитической форме строит матрицы узловых проводимостей многополюсной цепи и эквивалентного четырехполюсника. Далее производится составление СКУ путем приравнивания выражений для Z -, Y - или S -параметров измеренным значениям. Решение СКУ в аналитическом виде осуществляется на основе метода базисов Гребнера.

В зависимости от сложности ЭС пассивного компонента может использоваться аналитическая или комбинированная методика. При аналитической методике полная СКУ решается относительно искомым RLC -элементов, при этом число уравнений (m) равно числу неизвестных (n). В результате СКУ приводится к системе уравнений канонического вида. Из последней либо определяются аналитические выражения для нахождения RLC -элементов по измеренным Z -, Y - или S -параметрам пассивного компонента, либо вычисляются численные значения элементов.

В случае комбинированной методики из СКУ выбираются m уравнений (подсистема компонентных уравнений) таким образом, чтобы выполнялось соотношение $m < n$. С помощью этих уравнений часть RLC -элементов (зависимые элементы) выражается через остальные RLC -элементы (независимые элементы) и измеренные Z -, Y - или S -параметры пассивного компонента. Полученные аналитические выражения (уравнения связи) используются при поиске численных значений независимых элементов ЭС, соответствующих наилучшему совпадению измеренных и рассчитанных по ЭС частотных характеристик СВЧ-компонента. С этой целью применяются оптимизационные процедуры или средства «визуальной» настройки схем в коммерческих САПР СВЧ-устройств [7]. В заключение находятся численные значения зависимых элементов ЭС.

Оценка быстродействия программы SYMODEL. Программа SYMODEL была использована для решения задачи экстракции ЭС пассивных сосредоточенных компонентов СВЧ монолитных интегральных схем (МИС), выполненных по различным технологиям – полупроводниковых GaAs-резисторов, МДМ-конденсаторов и спиральных катушек индуктивности [1, 8]. Оценим быстродействие программы при использовании аналитической и комбинированной методик экстракции ЭС.

В случае аналитической методики основное время затрачивается на составление, преобразование и решение системы нелинейных уравнений в символьном виде (базис Гребнера). Для комбинированной методики добавляются временные затраты на поиск численных значений независимых элементов ЭС с помощью параметрической оптимизации или «визуального» подхода.

В таблице приведены затраты времени ЭВМ для определения элементов ЭС различной степени сложности с помощью аналитической и комбинированной методик. При осуществлении последней методики задача оптимизации решалась с помощью встроенного в САПР Microwave Office алгоритма оптимизации, время указано для случая выбора симплекс-метода при числе итераций не более 500.

Затраты времени ЭВМ для определения элементов ЭС с помощью аналитической и комбинированной методик

СВЧ-компонент	Число искомых параметров ЭС	Аналитическая методика – время, с		Комбинированная методика – время, с		
		Составление СКУ	Решение СКУ	Составление СКУ	Решение СКУ	Оптимизация
Резистор	2	<0,1	<0,1	–		
Конденсатор	4	18	24	0,1	0,1	<3
Катушка индуктивности	6	–		0,1	0,1	10

Заключение. Программа SYMODEL в среде Maple V позволяет получить в символьной форме выражения для вычисления элементов ЭС пассивных СВЧ-компонентов различной степени сложности. Реализованные методики и программное обеспечение могут использоваться для построения быстродействующих моделей пассивных компонентов МИС в САПР СВЧ-устройств.

Работа выполнялась в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы по направлениям «Создание электронной компонентной базы» (14.740.11.1261), «Микроэлектроника» (П669, П499, 16.740.11.0092, 14.740.11.1136) и «Проведение исследований коллективами НОЦ по направлению «Микроэлектроника» (14.740.11.0135).

Литература

1. Разработка методов, алгоритмов и интеллектуального программного обеспечения для синтеза микроэлектронных СВЧ-устройств с использованием точных моделей интегральных элементов: Отчет о НИР №П669 (3 этап) / ТУСУР; руководитель А.Н. Сычев. 2010. 247 с.
2. Манзон Б.М. Maple V Power edition. М.: Филинь, 1998. 240 с.
3. Бухбергер Б. Компьютерная алгебра. Символьные и алгебраические вычисления. М.: Мир, 1986. 392 с.
4. Быков В.И. Методы исключения в компьютерной алгебре многочленов / В.И. Быков, А.М. Кытманов, М.З. Лазман. Новосибирск: Наука, 1991. 233 с.
5. Дэвенпорт Дж. Компьютерная алгебра / Дж. Дэвенпорт, Й. Сире, Е. Турнье. М.: Мир, 1991. 352 с.
6. Черкашин М.В. Программа символьного анализа линейных шумящих электронных схем // Сб. трудов 2-й Рег. науч.-техн. конф. студентов и молодых специалистов «Радиотехнические и информационные системы и устройства». Томск: ТУСУР, 1997. С. 151–153.
7. Microwave Office [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://web.awg-corp.com/Usa/Products/Microwave-Office>, свободный (дата обращения: 01.09.2011).
8. Добуш И.М. Экстракция параметров эквивалентных схем пассивных компонентов СВЧ МИС в копланарном тракте // Наст. сб.

УДК 621.375.026

АВТОМАТИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ СОГЛАСУЮЩИХ ЦЕПЕЙ ДЛЯ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫХ СВЧ-УСИЛИТЕЛЕЙ МОЩНОСТИ КЛАССА F С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА *А.А. Коколов, Л.И. Бабак, П. Колантонио*

СВЧ-усилители мощности (УМ) класса F с настройкой импеданса согласующих цепей (СЦ) на высших гармониках сигнала обладают одними из наилучших показателей КПД и выходной мощности. В статье предложена методика синтеза СЦ для высокоэффективных УМ при помощи программы INDESYS-MATCH, основанной на генетическом алгоритме. Эффективность методики продемонстрирована на примере проектирования СВЧ УМ класса F с настройкой импеданса выходной СЦ по гармоникам. Усилитель построен на GaN HEMT-транзисторе и имеет центральную частоту 5,5 ГГц.

Ключевые слова: усилитель мощности, GaN HEMT-транзистор, синтез, согласующая цепь, генетический алгоритм.

Введение. Использование СВЧ монолитных интегральных схем (МИС) позволяет значительно улучшить характеристики современных радиоэлектронных

систем гражданского и военного назначения и создать качественно новые системы. При этом весьма перспективными являются гетероструктурные HEMT (High Electron Mobility Transistor) технологии на основе материала GaN, которые позволяют повысить термо- и радиационную стойкость, обеспечить высокие значения выходной мощности, КПД и т.д.

Необходимым компонентом передающих трактов СВЧ радиоэлектронных систем являются усилители мощности (УМ). К наиболее важным характеристикам СВЧ УМ, во многом определяющим качественные характеристики систем, относятся выходная мощность и кпд. Среди существующих классов УМ (А, В, С, D, E, F и др.) наибольшим кпд обладают усилители E- и F-классов (теоретически 100%) [1]. Прирост эффективности здесь достигается за счет соответствующим образом сформированных импульсов тока и напряжения – для класса E за счет организации переключаемого режима работы активного устройства, а для класса F за счет подавления нечетных гармонических составляющих сигнала.

Высокоэффективные СВЧ УМ классов E и F позволяют значительно увеличить выходную мощность и кпд по сравнению с УМ А-, В-, С- и D-классов. При этом СВЧ УМ E-класса проще в реализации, однако усилители F-класса являются более высокочастотными. Повышение выходной мощности и кпд в СВЧ УМ класса F получают путем настройки импеданса входной и выходной согласующих цепей (СЦ) усилительного каскада на частотах высших гармонических составляющих сигнала (обычно используют настройку на 2-й и 3-й гармониках) [1].

При разработке УМ с настройкой импеданса СЦ по гармоникам перед разработчиками возникает проблема проектирования реактивных четырехполюсных (нагруженных) цепей, обладающих заданным импедансом на основной и высших гармониках сигнала. Существующие аналитические методы расчета элементов СЦ для усилителей класса F [1, 2] весьма трудоемки и имеют ограниченные возможности. Поэтому разработка УМ с настройкой по гармоникам занимает довольно длительное время.

В настоящей работе предлагается простая и быстрая методика проектирования СЦ для высокоэффективных УМ с помощью программы INDESYS-MATCH, основанной на генетическом алгоритме (ГА).

Синтез СЦ на основе ГА. ГА – это класс алгоритмов, имитирующих эволюционные процессы в природе на основе механизмов генетического наследования и естественного отбора. Одним из отличий ГА по сравнению с классическими (детерминированными) методами оптимизации является то, что они оперируют не с единственным решением, а с целой совокупностью (популяцией) решений. Второй особенностью является использование одновременно стратегий детерминированного и случайного поиска. Это делает ГА более эффективными при поиске глобально-оптимальных решений в задачах высокой размерности, а также менее подверженными сходимости к локальным оптимумам, чем традиционные оптимизационные методы. В последнее десятилетие ГА с успехом были применены к задачам структурного синтеза различных технических объектов, в том числе радиоэлектронных устройств.

В [3, 4] был предложен численный метод синтеза лестничных СЦ на сосредоточенных элементах, основанный на ГА, и разработана программа автоматического синтеза СЦ GENESYN. Позже на этой базе создана более современная программа INDESYS-MATCH, позволяющая также синтезировать распределенные и смешанные (сосредоточенно-распределенные) цепи, в том числе с использовани-

ем различных типов моделей, учитывающих потери и паразитные параметры реактивных элементов [5, 6].

Задача, решаемая программой INDESYS-MATCH, состоит в синтезе реактивной четырехполюсной цепи, реализующей требуемую частотную характеристику передачи мощности $G(\omega)$ от генератора в нагрузку, при этом сопротивления генератора и нагрузки могут быть комплексными и частотно-зависимыми. Требования к коэффициенту передачи цепи представляются в виде ограничений, определяющих диапазон возможных значений $G_T(\omega)$ на выбранных частотах полосы согласования ω_k , $k = \overline{1, m}$:

$$G_T^-(\omega_k) \leq G_T(\omega_k) \leq G_T^+(\omega_k), \quad k = \overline{1, m}, \quad (1)$$

где $G_T^-(\omega_k)$ и $G_T^+(\omega_k)$ – граничные значения коэффициента передачи $G_T(\omega_k)$ на частоте ω_k .

К достоинствам программы INDESYS-MATCH, выделяющим ее среди известных программных продуктов, относятся:

- автоматический синтез цепей;
- возможность задания произвольной формы частотной характеристики передачи мощности;
- полный контроль пользователем структуры и значений элементов СЦ, что разрешает получить практически реализуемые цепи;
- возможность учета при синтезе потерь и паразитных параметров элементов;
- получение множества вариантов СЦ.

Более подробное описание программы INDESYS-MATCH представлено в [5, 6].

Процедура проектирования СЦ для высокоэффективных УМ. Текущая версия программы INDESYS-MATCH не позволяет непосредственно синтезировать СЦ с требуемыми импедансами на заданных частотах, так как синтез проводится только по одному критерию – обеспечению заданной формы частотной характеристики коэффициента передачи по мощности. Однако задачу можно решить косвенно, используя следующий факт: при $G_T = 1$ входной импеданс цепи равен комплексно-сопряженному импедансу генератора.

Методика проектирования СЦ для УМ с настройкой импеданса по 2-й и 3-й гармоникам содержит следующие этапы:

1) Определение оптимальных импедансов источника сигнала и нагрузки транзистора на основной частоте (f_0) и гармониках сигнала ($2f_0$, $3f_0$), при которых выходная мощность и КПД усилителя максимальны. Эти импедансы могут быть определены экспериментально с помощью специализированной измерительной установки, содержащей тюнеры импеданса [7]. Другой способ основан на моделировании цепи с использованием нелинейной модели транзистора и программных тюнеров [1].

2) Для синтеза выходной СЦ в программе INDESYS-MATCH необходимо задать импеданс генератора на основной частоте и гармониках сигнала, равный комплексно-сопряженным значениям оптимального импеданса нагрузки транзистора. Сопротивление нагрузки СЦ устанавливается равным $Z_0 = 50$ Ом.

3) Желаемый коэффициент передачи $G_T(\omega)$ СЦ на частотах f_0 , $2f_0$, $3f_0$ устанавливается равным 1, в результате синтезированной цепи на каждой из этих частот будет иметь входной импеданс, равный комплексно-сопряженному сопротивлению генератора, т.е. равный оптимальному значению (на практике можно также задавать величины $G_T(\omega)$, близкие к 1). Далее в программе INDESYS-

MATCH задаются количество и типы элементов СЦ, а также ограничения на структуру цепи и значения элементов, и запускается процесс автоматического синтеза выходной СЦ.

4) После синтеза разработчик из полученного множества схем цепей отбирает наиболее приемлемые с точки зрения характеристик и практической реализации. Для них может быть проведена дополнительная оптимизация характеристик с использованием коммерческих САПР. Если полученные решения не удовлетворяют разработчика, выполняется повторный синтез СЦ с помощью программы INDESYS-MATCH при других исходных данных.

5) Синтез входной СЦ осуществляется аналогичным образом (шаги 2–4).

На рис. 1 изображен внешний вид интерфейса программы INDESYS-MATCH, на котором показаны ограничения на АЧХ $G_T(\omega)$, синтезированная схема, график и численные значения ее коэффициента передачи.

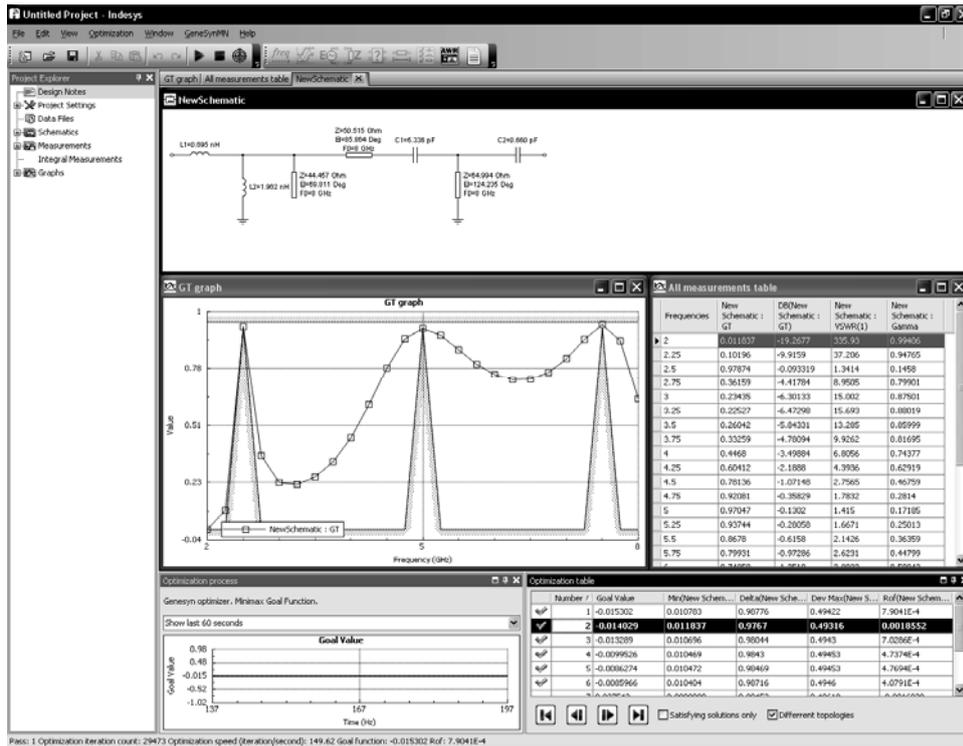


Рис. 1. Внешний вид интерфейса программы INDESYS-MATCH

Исследуем эффективность предложенной методики на примере.

Пример синтеза выходной СЦ для УМ класса F. Рассмотрим синтез выходной СЦ для описанного в [8] однокаскадного УМ класса F с настройкой импеданса по 2-й и 3-й гармоникам. Усилитель выполнен на GaN HEMT-транзисторе с шириной затвора 1 мм и предназначен для работы в С-диапазоне (центральная частота 5,5 ГГц). Оптимальные импедансы источника сигнала и нагрузки транзистора на основной частоте ($f_0 = 5,5$ ГГц) и гармониках, соответствующие максимальным выходной мощности и КПД, определены на основе моделирования усилителя с тюнерами при описании транзистора нелинейной моделью Ангелова. Требуемые значения входного импеданса выходной СЦ УМ на частоте

тах f_0 , $2f_0$ и $3f_0$ приведены в табл. 1 [8], они используются в качестве исходных данных при синтезе цепи.

Таблица 1

Требуемые значения импеданса выходной СЦ на основной частоте и гармониках

Оптимальный импеданс выходной СЦ	Частота, ГГц	Реальная часть, Ом	Мнимая часть, Ом
$Z_{in f_0}$	5,5	18,36	47,39
$Z_{in 2f_0}$	11	0	41,22
$Z_{in 3f_0}$	16,5	0	-186,6

На рис. 2, *а* графически показаны требования к АЧХ коэффициента передачи, использованные для решения этой задачи, на рис. 2, *б* показаны оптимальные значения импеданса на частотах f_0 , $2f_0$ и $3f_0$ и годограф одной из синтезированных СЦ. Требования к коэффициенту передачи цепи на второй и третьей гармонике сигналах снижены ($G_T = 0,8$) для повышения эффективности поиска и увеличения количества решений – вариантов схем СЦ. Синтез цепей выполнен на идеальных сосредоточенных и распределенных элементах. При этом задавались ограничения на структуру СЦ с целью обеспечения подачи питания на транзистор – напряжение питания должно подаваться на сток транзистора через параллельную индуктивность или шлейф, а последовательный конденсатор должен препятствовать прохождению постоянного тока в нагрузку усилителя. Для того чтобы выполнить условия практической реализуемости цепей, устанавливались также ограничения на значения емкостей и индуктивностей сосредоточенных элементов, волновые сопротивления и длины линий передачи.

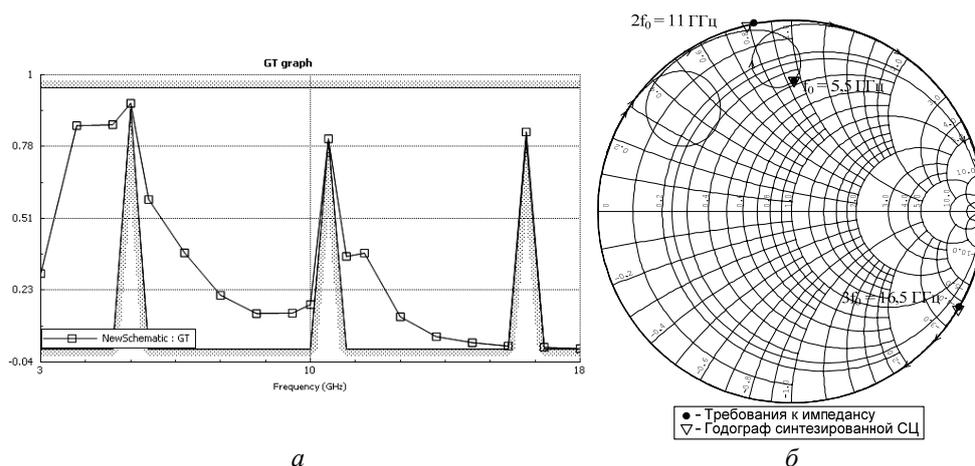


Рис. 2. Требования к коэффициенту передачи СЦ в программе INDESYS-MATCH (*а*); *б* – оптимальные значения импеданса на частотах f_0 , $2f_0$ и $3f_0$ и годограф синтезированной СЦ

С использованием программы INDESYS-MATCH и предложенной методики был получен ряд вариантов СЦ. Схемы лучших из них представлены на рис. 3 (опорная частота для линий передачи $F_0 = 5,5$ ГГц), а характеристики – в табл. 2 (цепи 1–4). Заметим, что после синтеза проводилась оптимизация СЦ с применением дополнительной цели – минимизировать коэффициент передачи на частотах $2f_0$ и $3f_0$, так как прохождение сигнала на этих частотах на выход УМ будет

вносить нелинейные искажения. При этом в качестве импеданса генератора использовались не фиктивные значения, комплексно-сопряженные к требуемым величинам импеданса СЦ, а сопротивление 50 Ом, близкое к выходному импедансу транзистора. Величины коэффициента передачи G_{70} в 50-омном тракте на частотах $2f_0$ и $3f_0$ также приведены в табл. 2.

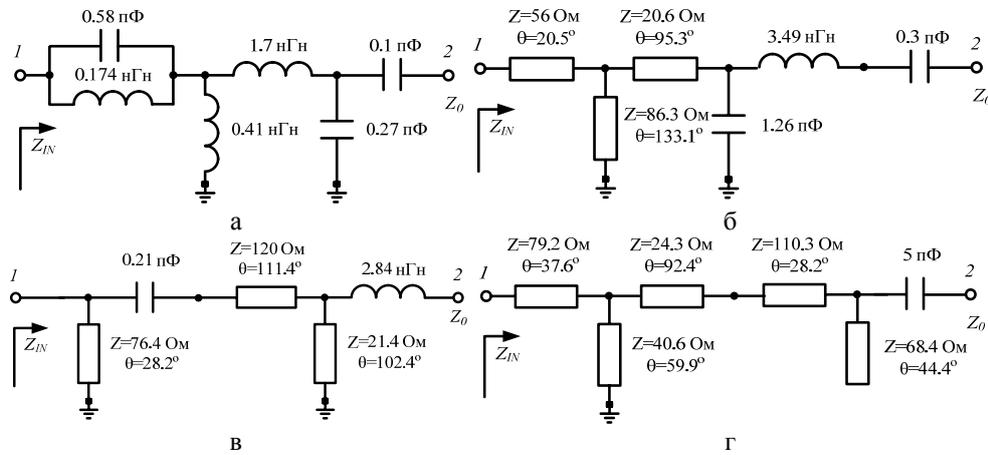


Рис. 3. Синтезированные СЦ для высокоэффективного УМ класса F

Таблица 2

Результаты синтеза СЦ для высокоэффективного УМ

Вариант СЦ	Импеданс СЦ на частоте f_0		Импеданс СЦ на частоте $2f_0$		Импеданс СЦ на частоте $3f_0$		Коэффициент передачи G_{70} в 50-омном тракте на частотах $2f_0/3f_0$, дБ
	$\text{Re}[Z_{in, f_0}]$, Ом	$\text{Im}[Z_{in, f_0}]$, Ом	$\text{Re}[Z_{in, 2f_0}]$, Ом	$\text{Im}[Z_{in, 2f_0}]$, Ом	$\text{Re}[Z_{in, 3f_0}]$, Ом	$\text{Im}[Z_{in, 3f_0}]$, Ом	
Цепь 1 (рис. 3, а)	18,36	47,39	0,24	44,04	0,15	-186,6	-19,6 / -30,4
Цепь 2 (рис. 3, б)	18,36	47,39	0,21	37,02	1,15	-195,8	-19,5 / -22,5
Цепь 3 (рис. 3, в)	18,36	47,39	0,1	39,42	1,33	-182,9	-23,08 / -21,3
Цепь 4 (рис. 3, г)	18,42	47,21	0,02	40,99	0,02	-188,9	-30,28 / -40,71

Проанализируем полученные решения с точки зрения удобства практической реализации. Как видно, каждая из синтезированных СЦ позволяет подать питание на транзистор и имеет разделительный конденсатор, значения их элементов находятся в границах практической реализуемости, как это было заложено в задании на синтез. Однако цепь 1 (рис. 3, а) содержит параллельный колебательный контур, что затруднит применение этой СЦ. Цепь 3 (рис. 3, в) неудобна тем, что на ее входе отсутствует подводящая линия, соединяющая транзистор и СЦ. Цепи 2 и 4 вполне подходят для практической реализации, к тому же значения входного импеданса цепи 4 (рис. 3, г) наиболее близки к требуемым, а коэффициент передачи на гармониках самый низкий.

В соответствии с результатами моделирования [8], однокаскадный GaN усилитель со входной и выходной СЦ, реализующими необходимые значения импедансов для основной и высших гармоник сигнала, на частоте 5,5 ГГц обеспечивает выходную мощность свыше 33 дБм и КПД около 60%.

Заметим, что в [8] представлена схема сосредоточенной выходной СЦ для рассмотренного примера, которая получена методом приближенного расчета и последующей оптимизации. Эта схема отсутствует в списке цепей, синтезированных с помощью программы INDESYS-MATCH. Недостатком цепи в [8] (как и цепи на рис. 3, а) является то, что параллельно включенные сосредоточенные индуктивности небольшой величины в С-диапазоне неудобны для реализации. По этой причине в указанной работе выполнен переход от сосредоточенной цепи к распределенному варианту, что потребовало дополнительных расчетов и оптимизации. Программа INDESYS-MATCH позволяет сразу получить распределенные и сосредоточенно-распределенные реализации СЦ.

Заключение. Рассмотренный пример продемонстрировал эффективность предложенной методики проектирования СЦ для СВЧ УМ класса F. Несомненными ее достоинствами являются простота и быстрота расчета, управление структурой и значениями элементов СЦ для получения практически реализуемых решений, генерация множества вариантов цепей, возможность синтеза сосредоточенно-распределенных цепей с использованием моделей «реальных» элементов [6]. К недостаткам следует отнести косвенный способ получения требуемого импеданса СЦ, а также невозможность задания многоцелевой функции для синтеза (одновременный контроль импеданса цепи и ее коэффициента передачи в 50-омном тракте). Возможность использования нескольких критериев при синтезе цепей предполагается реализовать в следующей версии программы INDESYS-MATCH.

Работа выполнялась в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы по направлениям «Создание электронной компонентной базы» (14.740.11.1261), «Микроэлектроника» (П669, П499, 16.740.11.0092, 14.740.11.1136) и «Проведение исследований коллективами НОЦ по направлению «Микроэлектроника» (14.740.11.0135).

Литература

1. Colantonio P. High Efficiency RF and Microwave Solid State Power Amplifier / P. Colantonio, F. Giannini, E. Limiti. John Wiley & Sons Ltd, 2009. 511 p.
2. Grebennikov A.V. Circuit design technique for high efficiency Class F amplifiers // IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Digest, Boston, MA. June 2000. Vol. 2. P. 771–774.
3. Бабак Л.И. Автоматизированный синтез согласующих цепей на основе генетического алгоритма. / Л.И. Бабак, В.А. Вьюшков // Сб. докл. междунар. науч.-практ. конф. «Электронные средства и системы управления». Томск: ТУСУР, 2005. С. 102–105.
4. Бабак Л.И. Программа синтеза согласующих цепей на основе генетического алгоритма / Л.И. Бабак, В.А. Вьюшков // Матер. междунар. конф. КрыМиКо'2006. Севастополь: Вебер, 2006. Т. 1. С. 209–210.
5. Дорофеев С.Ю. Синтез согласующих цепей на сосредоточенных и распределенных элементах с использованием генетического алгоритма / С.Ю. Дорофеев, Л.И. Бабак // 18-я Междунар. Крымская конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2008). Севастополь, 8–12 сентября 2008 г.: Материалы конф. Севастополь: Вебер, 2008. Т. 1. С. 133–134.

6. Коколов А.А. Синтез согласующих цепей на основе генетического алгоритма с учетом потерь и паразитных параметров элементов / А.А. Коколов, А.О. Абрамов, Л.И. Бабак // 21-я Междунар. Крымская конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2011). Севастополь, 12–16 сентября 2011 г.: Матер. конф. Севастополь: Вебер, 2011. Т. 1. С. 230–231.

7. Tsironis C. Highly accurate harmonic tuners for load pull testing / С. Tsironis, А. Jurenas, С. Liu // Microwave Conference. APMC 2001. Vol. 3. P. 1311–1314.

8. A C-band High Efficiency Second-Harmonic-Tuned Hybrid Power Amplifier in GaN Technology / P. Colantonio, F. Giannini, R. Giofre et al // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2006. Vol. 54? № 6. P. 2713–2722.

УДК 621.328

ОБЗОР ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ХРАНЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ И СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ СВЧ МИС

А.С. Сальников

Проведен обзор программных продуктов для хранения результатов измерений и статистического анализа с ориентацией на опытное и промышленное производство СВЧ МИС. Подобные программы играют важную роль в системах контроля качества на полупроводниковом производстве. Рассмотрены основные возможности распространенных программных систем. Результаты обзора могут быть использованы при проектировании исследовательских и промышленных систем контроля качества, сбора, хранения, обработки и анализа данных, используемых в производстве СВЧ МИС.

Ключевые слова: системы автоматизированного управления, программные системы, контроль качества, измерения, статистический анализ данных, СВЧ, монолитные интегральные схемы.

Введение. Технология изготовления монолитных интегральных схем (МИС), работающих в СВЧ-диапазоне, постоянно совершенствуется для достижения всё более высоких параметров радиоэлектронных устройств и систем. Важной задачей в промышленной технологии является контроль качества МИС. Главной целью контроля качества является сохранение параметров выпускаемых устройств в заданных пределах при непрерывном производстве. Значительную роль в вопросе контроля качества играют информационные системы, обеспечивающие различные возможности для автоматизированного сбора и хранения результатов измерений контролируемых параметров, а также статистического анализа измеренных данных.

Проблема сбора, хранения, обработки и анализа данных весьма актуальна, в частности, при опытном и промышленном производстве МИС, где для контроля качества в большом объеме проводятся зондовые измерения СВЧ-элементов и устройств непосредственно на полупроводниковой пластине.

В настоящее время существует достаточно большое количество программных продуктов для централизованного хранения результатов контрольных измерений и статистического анализа, встраиваемых в системы автоматизированного управления на производстве. Существующее программное обеспечение, используемое для решения таких задач, целесообразно разбить на три категории:

- 1) Универсальные программные продукты для статистического анализа.
- 2) Специализированные программные продукты для хранения данных и статистического анализа в промышленности.
- 3) Специализированные программные продукты для хранения и анализа результатов зондовых измерений МИС.

В статье проведен обзор программ, которые могут быть использованы для хранения результатов измерений и статистического анализа при опытном и промышленном производстве СВЧ МИС. Одной из целей исследования является определение функциональных возможностей и задание требований к программным продуктам собственной разработки для сбора, хранения и анализа результатов зондовых измерений СВЧ МИС.

Универсальные программные продукты для статистического анализа

Широкий спектр возможностей, которые могут быть полезными, в частности, при обработке данных зондовых СВЧ-измерений, имеется в универсальных программных продуктах для статистического анализа. Подобные программы обеспечивают проведение статистической обработки данных безотносительно области их применения.

Универсальные программы включают богатый набор методов математической статистики для решения широкого круга задач с применением этих методов, включая и задачи контроля технологического процесса. На данный момент существует ряд фирм-разработчиков математического программного обеспечения, ориентированных в первую очередь на промышленное производство и крупные исследовательские центры. Приведём примеры универсальных статистических программных продуктов.

Компания StatSoft, основанная в 1984 г., выпускает свой универсальный пакет STATISTICA [1]. К особенностям этого пакета относятся широкие возможности для статистического анализа и серьёзный математический аппарат в основе программы, разрабатываемый и совершенствуемый в течение долгого времени и включающий методы из многих областей математики.

Пакет, в частности, содержит следующие средства для статистического анализа:

- 1) анализ пригодности процесса использует расчёт коэффициентов пригодности процесса, построение статистических графиков отклонений и графиков квантиль-квантиль для оценки распределения;
- 2) анализ повторяемости процесса включает повторяемость величины, изменчивость параметров приборов в зависимости от устройства, методики опыта или оператора;
- 3) анализ процессов содержит графические средства для исследования мощности и обобщенности, распределения Вейбулла, используемые при анализе надёжности, оценку интенсивность отказов;
- 4) карты контроля качества включают несколько видов карт Шухарта, Парето, настройку отслеживаемых трендов. Система оповещения об ошибках может быть настроена на запуск различных типов «откликов» на определенное событие. Например, вы можете настроить систему для реагирования на неконтролируемую выборку.

Отдельно отметим версию программы STATISTICA Enterprise-wide Data Analysis System – вариант программы для работы с централизованным хранилищем. При установке данной системы на предприятии развертывается централизованная база данных, которая интегрируется в производственный процесс на данном предприятии и позволяет проводить статистический анализ в автомати-

ческом режиме с оповещением об ошибках выбранным способом (например, по электронной почте).

Компания SAS – самая большая независимая компания для аналитики в сфере бизнеса в различных сферах (более 45 000 пользователей в 118 странах) [2]. Компания предоставляет как общие, так и ориентированные на определённую сферу деятельности решения. Компания включает в свои продукты решения из таких областей, как интеллектуальный анализ данных, визуализация данных, оценка путей улучшения качества и математическая статистика. Для статистического анализа фирма SAS предлагает такие методы, как мультивариативный анализ отклонений; линейное и нелинейное моделирование данных; методы регрессионного анализа; анализ качественных показателей; многомерный анализ и др. Также компания предлагает специализированный продукт для применения на производстве и ведёт исследования в рамках методологии «6 сигма».

Подразделение компании IBM – SSPC (Statistical Package for the Social Sciences) [3] занимается разработкой программных продуктов, ориентированных в первую очередь на социальные исследования. Причина популярности программы среди социальных работников – простота использования и понятный дружественный интерфейс пользователя. Однако данный программный продукт отличаются разнообразие статистических методик, которые могут быть применены и в других отраслях. Возможности программы: анализ среднего, отклонений и доверительных интервалов, средства визуализации, проверка статистических гипотез, линейный регрессионный анализ и др. Однако продукт используется преимущественно для исследования рынка, информация об использовании в качестве инструмента контроля качества не найдена.

Анализ универсальных программ статистического анализа показал, что математический аппарат всех пакетов приблизительно одинаков. Это связано с тем, что компании постоянно следят за развитием математической статистики, а иногда и финансируют эти исследования, с тем, чтобы потом предоставить своим пользователям последние достижения в этой области и наиболее эффективные инструменты анализа. Также можно выделить ориентацию на бизнес и крупные исследовательские центры, что обуславливает довольно высокую цену. Указанные программы интегрируются с имеющимся оборудованием посредством централизованной базы данных. Поэтому в них отсутствуют инструменты для управления измерительным оборудованием.

Специализированные программные продукты для статистического анализа в промышленности. На сегодняшний момент существует множество различных программ, в той или иной степени пригодных для решения задач хранения производственных данных (в частности, результатов измерений), а также проведения статистического анализа на их основе. Такие программы, как правило, не ориентируются на отдельную особую область деятельности, например, зондовые СВЧ-измерения, а рассчитаны на работу с любыми данными при условии интеграции их в системы автоматизированного управления на предприятии.

Для производства важной является задача получения назначенных параметров изделия с заданными допусками изо дня в день – стабильность процесса. Обычно для изделия выбирают какой-либо измеряемый параметр или группу параметров и контролируют его значения. Для обработки экспериментальных данных и оценки качества продукта используют методы математической статистики. Существуют программные продукты, предназначенные для статистического анализа на производстве. Рассмотрим примеры таких программ.

Программный продукт WinSPC [4] компании DataNet является комплексным решением. Он включает в себя инструменты по контролю и анализу технологического процесса, составлению отчётов и автоматического оповещения о сбоях, управлению бизнес-процессами промышленного производства. Другим разработчиком программного обеспечения является компания CamLine [5], которая также предлагает комплексные решения. В промышленности используется программа LineWorks SPACE, позволяющая проводить контроль, оповещать об ошибках, применять разные стратегии контроля, экспортировать результаты анализа и выводить их в виде отчётов. Существуют многие другие компании (MetricStream, Harrington group, QPR и др.), предлагающие решения для анализа, контроля качества и управления технологическими и экономическими процессами.

Все указанные программы могут использоваться в любой отрасли промышленного производства, отличия будут лишь в контролируемых параметрах и средствах их измерения. Математический аппарат и возможности во всех программах практически одинаковые, а незначительные различия требуют более подробных исследований и с точки зрения статистического контроля несущественны. Недостающим элементом в этих программах могут быть узкоспециализированные инструменты для СВЧ-измерений. Основные возможности, присутствующие в промышленных программах для статистического контроля технологического процесса:

- несколько видов контрольных карт, гистограммы и другие графики, отражающие качество контролируемого процесса, как правило, в режиме реального времени;
- расчёт количественных характеристик качества технологического процесса, например коэффициентов пригодности технологического процесса C_{PK} , C_p и др.;
- средства планирования эксперимента для улучшения качества продукции;
- элементы методики строгого контроля качества «6 сигма».

Специализированные программные продукты для хранения и анализа результатов СВЧ-измерений. Наиболее близкой по области применения является программа IC-CAP Wafer Pro фирмы Agilent, решающая задачи хранения и анализа результатов зондовых измерений СВЧ-устройств.

Программа входит в состав комплекса IC-CAP, который может осуществлять управление измерительными приборами, моделирование и оптимизацию устройств; предоставляет возможности по проведению измерений электрофизических параметров, индуктивностей, емкостей, сопротивлений и комплексных импедансов, вольт-амперных и вольт-фарадных характеристик, СВЧ-измерений; предоставляет полный набор средств для создания моделей полупроводниковых приборов, выполненных по различным технологиям (CMOS, HBT, BJT, FET и др.). Отличительной особенностью IC-CAP Wafer Pro является ориентация на проведение зондовых измерений ИС. Программа включает в себя модули для управления приборами, алгоритмы проведения широкого круга измерений, возможности задания плана размещения схем на пластине и подключения к базе данных IC-CAP. На данный момент компания-производитель не указывает конкретных методик проведения статистического анализа, но заявляет, что пользователь может реализовать собственные методики.

В работе [6] описывается разработка макропрограммы (макроса) для программного обеспечения IC-CAP, которая предназначена для характеристики и статистического анализа СВЧ-элементов и устройств на основе зондовых измерений. Особенности разработанного модуля, помимо средств управления ав-

томатической зондовой станцией и проведения СВЧ-измерений по заложенным в IC-CAP алгоритмам, являются возможности оценки разброса параметра на гистограмме и по пластине.

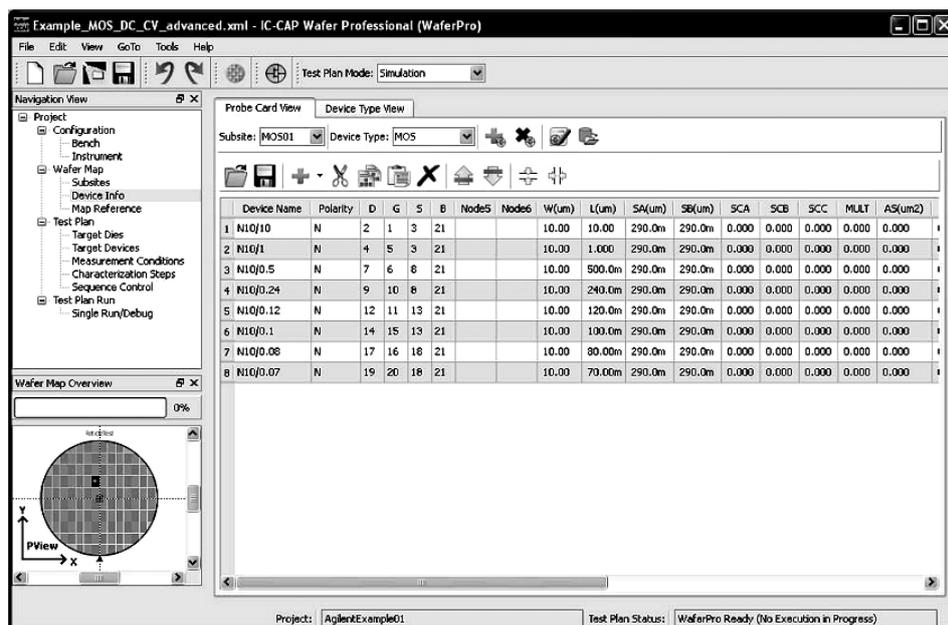


Рис. 1. Вид интерфейса программы IC-CAP WaferPro

На рис. 1 представлен вид интерфейса программы IC-CAP WaferPro, на котором можно отметить основные особенности этой программы при проведении анализа. Приведённая в правой части окна таблица связана с базой данных. Полученные параметры выводятся на подложке в правой нижней области окна. Также можно выводить различные графики на основе измерений из базы данных.

Таким образом, программа IC-CAP Wafer Pro обладает почти всей необходимой функциональностью для хранения и анализа результатов СВЧ-измерений. Среди ее недостатков можно выделить высокую цену, отсутствие средств долговременного контроля качества (от пластины к пластине), а также встроенных средств статистического анализа. Однако пользователи могут реализовать требуемые функции посредством языка макропрограммирования.

Открытый формат обмена информацией на основе стандарта XML. В статьях [7–9] приводится описание открытого формата обмена информацией XMLMeas на основе стандарта XML для измерений и моделирования в СВЧ диапазоне, разработанного в рамках европейского проекта TARGET (Top Amplifier Research Group in a European Team). Помимо этого формата, авторы рассматривают базу данных для хранения информации о СВЧ-измерениях в формате, близком к XMLMeas. Особенностью разработанного формата является его универсальность: формат разрабатывался для хранения результатов любых измерений, а не каких-то определённых видов. Авторы делают попытку отказаться от множества форматов (s2p, ivd, csv, txt и др.) в пользу одного формата, который сможет хранить любую информацию о любом виде измерений. Поэтому формат пригоден для хранения результатов измерения электрофизических параметров, вольт-

амперных характеристик, параметров рассеяния и, теоретически, любых других параметров.

Авторами проведена значительная работа по стандартизации СВЧ-измерений, предложены методики для универсального хранения информации о любом виде измерений. Предложен удобный метод для обмена результатами между различными измерительными лабораториями. Для хранения большого массива данных используется база данных на основе сервера MySQL. Однако авторами не ставилась цель рассмотрения статистического анализа.

Заключение. Проведен обзор различных систем для хранения результатов измерений и статистического анализа в области производства полупроводниковых интегральных схем (с ориентацией на производство СВЧ МИС). Приведены характеристики отдельных программных продуктов и их возможности. Результаты обзора могут быть использованы при проектировании собственных исследовательских и промышленных систем контроля качества, сбора, хранения, обработки и анализа данных.

Литература

1. Официальный сайт компании StatSoft [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.statsoft.com/>, свободный доступ (дата обращения: 03.03.2011).
2. Официальный сайт компании SAS [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.sas.com/>, свободный доступ (дата обращения: 03.03.2011).
3. Официальный сайт компании подразделения SSPC компании IBM [Электронный ресурс]. URL: <http://www.spss.ru/> (дата обращения: 03.03.2011).
4. Официальный сайт компании DataNet, посвященный продукту WinSPC [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.winspc.com/>, свободный доступ (дата обращения: 03.03.2011).
5. Официальный сайт компании camLine [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.camline.com/>, свободный доступ (дата обращения: 03.03.2011).
6. An automatic program suitable for on-wafer characterization and statistic analysis of microwave devices / G.W. Huang, D.Y. Chiu, K.M. Chen et al. // 61st ARTFR Conf. 2003, June. P. 157–161.
7. Teyssier J.P. An XML File Format and a Database for Measurement Data Storage / J.P. Teyssier, F. Groote // 68th ARFTG Microwave Measurement Conference. USA, Broomfiels. 2006. P. 1–5.
8. Teyssier J.P. The XML File Format as a General Solution for Measurement data storage and exchange / J.P. Teyssier, F. Groote // 69th ARFTG Microwave Measurement Conference. USA, Honolulu. 2007. P. 1–5.
9. Teyssier J.P. Software tool for RF measurements and modelling, from homemade to standards / J.P. Teyssier, P. Schlemko, F. Groote, M. Mayer // International Symposium on Microwave and Optical Technology. New Delhi. 2007. P. 16–19.

**ПРОГРАММНЫЙ МОДУЛЬ ДЛЯ ЭКСТРАКЦИИ ПАРАМЕТРОВ
ЭКВИВАЛЕНТНЫХ СХЕМ ПАССИВНЫХ КОМПОНЕНТОВ СВЧ МИС
В СИСТЕМЕ INDESYS-MS**

А.В. Степачева, И.М. Добуш

Разработан программный модуль для автоматического построения моделей пассивных сосредоточенных компонентов СВЧ монолитных интегральных схем (МИС) в виде эквивалентных схем. Модуль включен в состав системы автоматизации СВЧ-измерений INDESYS-MS.

Ключевые слова: монолитная интегральная схема, пассивный компонент, экстракция, эквивалентная схема, программный модуль.

Введение. Точность моделирования СВЧ монолитных интегральных схем (МИС) определяется качеством моделей активных и пассивных компонентов, находящихся в распоряжении разработчика. При этом распространение получили модели компонентов МИС в виде эквивалентных схем (ЭС), которые являются быстродействующими и легко интегрируются в современные системы проектирования СВЧ-устройств.

Построение ЭС-моделей пассивных компонентов МИС обычно осуществляется путем решения задачи экстракции (извлечения параметров) ЭС на основе результатов измерений и последующей оптимизации полученной модели. Однако такой процесс получения модели является трудоемким и требует значительных затрат времени.

В статье представлен разработанный программный модуль, позволяющий автоматизировать решение указанной задачи. Он обеспечивает автоматическое построение ЭС пассивных компонентов на основе измеренных параметров рассеяния. Модуль включен в состав системы автоматизации СВЧ-измерений INDESYS-MS (Intelligent Design System – Measurement Suite) [1].

Программа для экстракции параметров ЭС пассивных компонентов СВЧ МИС. Программный модуль Extraction-P предназначен для экстракции параметров ЭС пассивных сосредоточенных компонентов СВЧ МИС: резисторов, конденсаторов и спиральных катушек индуктивностей.

В качестве входных данных программы используется файл с измеренными параметрами рассеяния пассивного СВЧ-компонента на ряде фиксированных частотных точек в заданном диапазоне. В результате работы программы рассчитываются значения элементов модели (ЭС) компонента, структура которой выбирается разработчиком из списка типовых структур (рис. 1).

Программа Extraction-P позволяет также получить данные для построения параметрических моделей компонентов в виде ЭС, элементы которой зависят от геометрических размеров компонента. С этой целью предусмотрен ввод файлов с измеренными параметрами рассеяния для нескольких конструктивных состояний (сочетаний геометрических размеров) компонентов – например, длины и ширины резистора и т.д. Для каждого конструктивного состояния программа определяет значения элементов ЭС одной и той же структуры. Параметрическая модель может быть получена путем аппроксимации найденных значений элементов ЭС в пространстве геометрических размеров компонента.

В настоящее время в программе Extraction-P реализованы алгоритмы экстракции для нескольких вариантов моделей резистора, конденсатора и катушки

индуктивности (рис. 1). Модели представляются в виде как симметричных (рис. 1, *a–в*), так и несимметричных (рис. 1, *г–е*) цепей. Вид реализованных моделей выбран на основе анализа литературы, а также изучения библиотек моделей элементов для нескольких коммерческих технологий изготовления СВЧ МИС. Указанных моделей в большинстве случаев достаточно, чтобы с необходимой точностью в широком диапазоне частот описать характеристики сосредоточенных элементов, используемых в СВЧ МИС – полупроводниковых и тонкопленочных резисторов, МДМ-конденсаторов, квадратных и круглых спиральных катушек индуктивности.

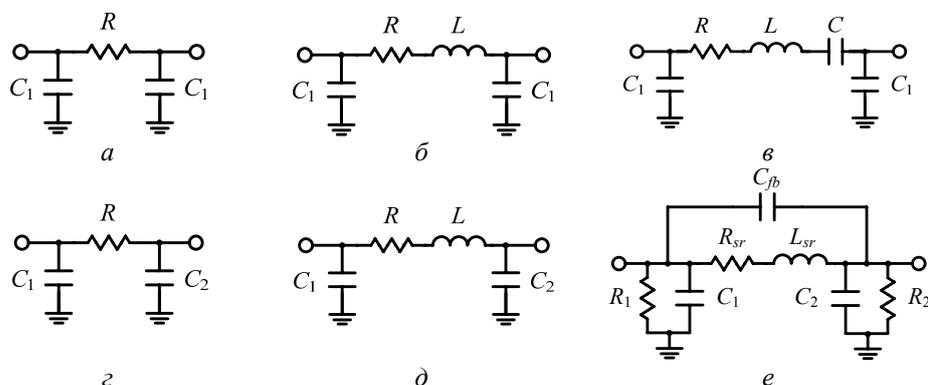


Рис. 1. Модели пассивных сосредоточенных компонентов СВЧ МИС в программе Extraction-P: резистор (*a, б, г, д*), конденсатор (*в*), катушка индуктивности (*д, е*)

Расчет элементов ЭС пассивных компонентов осуществляется по формулам, полученным с помощью аналитической методики экстракции [2]. По способу вычисления значений элементов, представленных на рис. 1, модели можно разделить на две группы:

- 1) расчет значений всех элементов ЭС производится по *S*-параметрам в одной частотной точке (рис. 1, *a, б, г, д*);
- 2) расчет части элементов ЭС производится по данным на одной частоте, для расчета оставшихся элементов используются измеренные параметры компонента в двух частотных точках (рис. 1, *в, е*).

В обоих случаях значения частот могут быть выбраны из их списка в файле. Возможно усреднение значений элементов ЭС, рассчитанных в нескольких частотных точках.

Пример использования программного модуля. Опишем процесс экстракции параметров ЭС (рис. 1, *a*) полупроводникового GaAs-резистора в диапазоне частот до 50 ГГц для множества конструктивных состояний, показанных на рис. 2 (длина резистора 5–100 мкм, ширина 5–15 мкм).

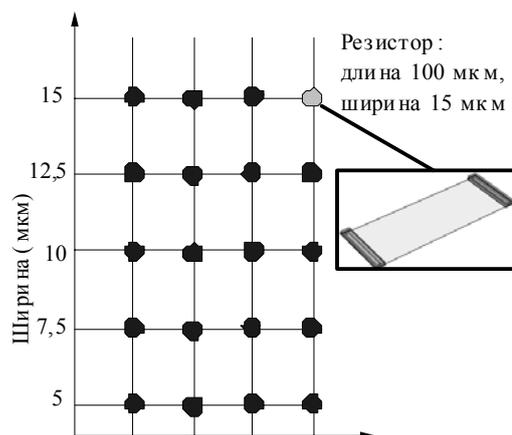


Рис. 2. Сетка конструктивных состояний GaAs-резистора

Для оценки точности метода экстракции в качестве исходных данных взяты значения параметров рассеяния, рассчитанные в среде Microwave Office (MWO) при использовании верифицированной модели GaAs-резистора в библиотеке моделей элементов ED02AH фирмы OMMIC (Франция).

На первом этапе построения модели разработчик выбирает вариант ЭС резистора и загружает файлы параметров рассеяния для необходимых конструктивных состояний (рис. 3, а). На втором этапе производится расчет и вывод значений элементов ЭС компонента для каждого конструктивного состояния (рис. 3, б). В диалоговой форме предусмотрена возможность усреднения значений элементов ЭС в нужном частотном диапазоне, итоговые значения параметров моделей для всех конструктивных состояний заносятся в результирующую таблицу.

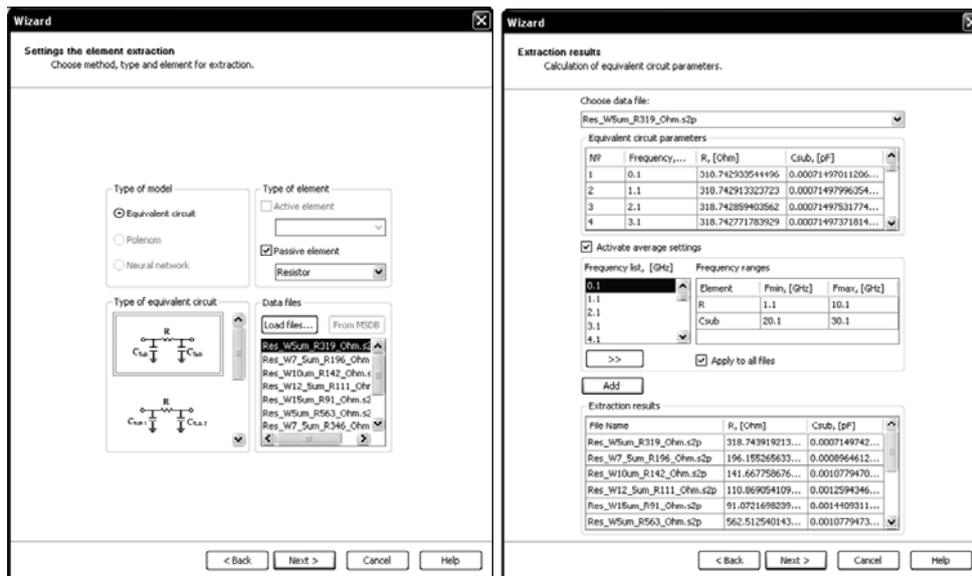


Рис. 3. Диалоговые окна для задания настроек (слева) и вывода результатов экстракции ЭС (справа)

В качестве примера представим результаты экстракции параметров ЭС GaAs-резистора длиной 100 мкм и шириной 15 мкм. Для него выбрана симметричная RC-схема замещения (см. рис. 1, а), в результате работы программы получены значения элементов модели: $R = 1414$ Ом, $C_1 = 8,75$ фФ. На рис. 4 представлены частотные зависимости параметров рассеяния GaAs-резистора, рассчитанные по модели OMMIC (исходные данные для экстракции) и по полученной модели.

В табл. 1 приведены значения относительных ошибок по модулю и фазе параметров рассеяния для рассчитанной модели резистора 15×100 мкм в интервале частот от 1 до 50 ГГц.

Из рис. 4 и табл. 1 видно, что параметры рассеяния модели OMMIC и рассчитанной модели GaAs-резистора для данного конструктивного состояния (15×100 мкм) хорошо совпадают. Это наблюдается и для остальных комбинаций геометрических размеров резистора. Максимальные в диапазоне частот 1–50 ГГц ошибки моделей для всех конструктивных состояний приведены в табл. 2.

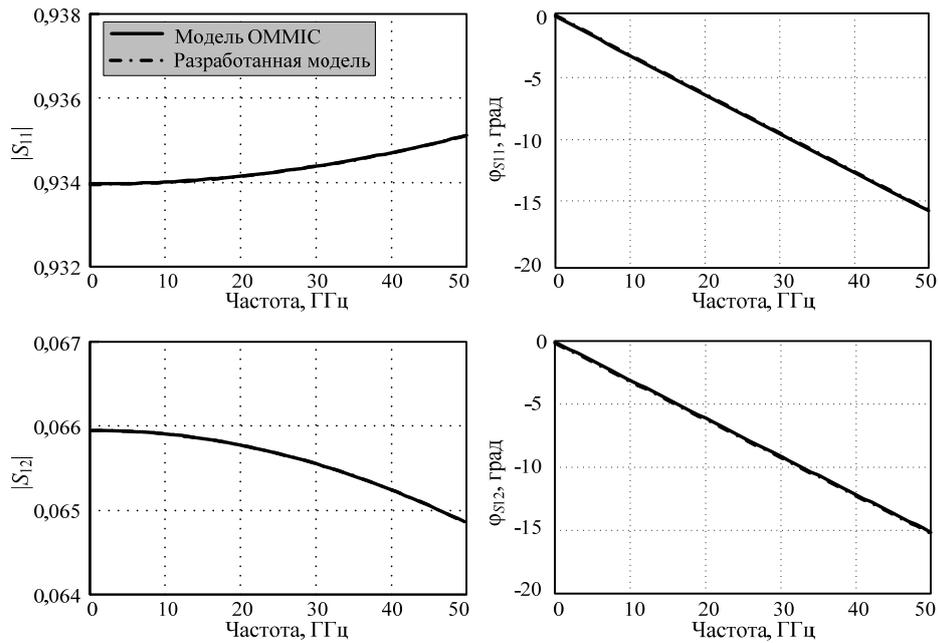


Рис. 4. Частотные зависимости параметров рассеяния GaAs-резистора 15×100 мкм, рассчитанные по модели ОММИС и по полученной модели

Таблица 1
Относительные ошибки параметров рассеяния модели
GaAs-резистора (15×100 мкм)

Частота, ГГц	Относительная ошибка, %			
	$ S_{11} $	$\text{Ang}(S_{11})$	$ S_{12} $	$\text{Ang}(S_{12})$
1	0,00029985	0,00093497	0,00030432	0,00016369
10	2,1202e-006	0,0012715	0,00014987	0,00025292
20	0,00011616	0,00034307	0,00057997	0,00079942
30	0,00045324	0,00045385	0,00030316	0,00036997
40	0,00026695	0,00033474	0,00046935	0,0038001
50	0,00039314	0,0023532	0,00013314	0,0025062

Таблица 2
Максимальные относительные ошибки параметров рассеяния модели GaAs-резистора для всех конструктивных состояний

Конструктивное состояние	Максимальная относительная ошибка, %							
	$ S_{11} $		$\text{Ang}(S_{11})$		$ S_{12} $		$\text{Ang}(S_{12})$	
	значение	частота	значение	частота	значение	частота	значение	частота
1	2	3	4	5	6	7	8	9
5×5	0,001103	10,1	0,003315	38,1	0,003546	10,1	0,004559	49,1
$7,5 \times 5$	0,0009583	18,1	0,003774	3,1	0,001868	19,1	0,004447	42,1
10×5	0,001122	35,1	0,003627	25,1	0,001573	46,1	0,004087	35,1
$12,5 \times 5$	0,001116	42,1	0,004102	19,1	0,001276	33,1	0,004038	33,1
15×5	0,001456	43,1	0,003455	2,1	0,001307	21,1	0,004528	30,1
5×10	0,0008898	43,1	0,004194	28,1	0,005174	35,1	0,004382	31,1

Продолжение табл. 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9
7,5×10	0,001011	10,1	0,004193	25,1	0,00352	34,1	0,00387	28,1
10×10	0,0009288	13,1	0,004167	19,1	0,002632	33,1	0,003868	3,1
12,5×10	0,0007902	47,1	0,004544	18,1	0,001598	2,1	0,004764	2,1
15×10	0,0008531	16,1	0,003649	14,1	0,001368	23,1	0,004834	19,1
5×40	0,0005279	9,1	0,004393	0,1	0,001249	14,1	0,003536	11,1
7,5×40	0,000539	3,1	0,002702	15,1	0,0006359	16,1	0,003299	1,1
10×40	0,0005664	49,1	0,00321	9,1	0,000606	45,1	0,003123	11,1
12,5×40	0,0006868	40,1	0,002639	11,1	0,004292	23,1	0,004146	8,1
15×40	0,0006106	36,1	0,003796	7,1	0,003441	4,1	0,00367	0,1
5×100	0,0005046	40,1	0,004192	4,1	0,002546	2,1	0,005002	37,1
7,5×100	0,0005067	0,1	0,00439	41,1	0,001722	44,1	0,004048	39,1
10×100	0,0005009	45,1	0,003756	41,1	0,001135	29,1	0,003921	42,1
12,5×100	0,0005397	10,1	0,004384	39,1	0,00111	45,1	0,004266	38,1
15×100	0,000509	35,1	0,003881	38,1	0,0007173	39,1	0,003967	4,1

Заключение. Разработанный программный модуль Extraction-L в составе системы INDESYS-MS позволяет выполнить экстракцию параметров ЭС пассивных компонентов СВЧ МИС для одного или нескольких конструктивных состояний, основываясь на результатах измерений параметров рассеяния, а также получить данные для построения параметрических моделей компонентов. Его использование дает возможность значительно сократить время и трудозатраты при построении моделей пассивных компонентов СВЧ МИС, изготавливаемых по различным технологиям.

Работа выполнялась в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы по направлениям «Создание электронной компонентной базы» (14.740.11.1261), «Микроэлектроника» (П669, П499, 16.740.11.0092, 14.740.11.1136) и «Проведение исследований коллективами НОЦ по направлению «Микроэлектроника» (14.740.11.0135).

Литература

1. Сальников А.С. Автоматизация зондовых измерений параметров рассеяния и вольт-амперных характеристик транзисторов с использованием программной среды Indesys-MS / А.С. Сальников, И.М. Добуш, С.Е. Кошевой, Ф.И. Шеерман // Доклады ТУСУРа. 2010. № 2 (22). С. 140–144.
2. Разработка методов, алгоритмов и интеллектуального программного обеспечения для синтеза микроэлектронных СВЧ-устройств с использованием точных моделей интегральных элементов: Отчет о НИР №П669 (3 этап) / ТУСУР; Руководитель А.Н. Сычев. 2010. 247 с.

ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

*Председатель секции – Шелупанов Александр Александрович,
д.т.н., профессор, зав. каф. КИБЭВС, проректор по НР*

УДК 004.056

ФУНКЦИЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ УДОСТОВЕРЯЮЩЕГО ЦЕНТРА ГОЛОВНОЙ СТАНЦИИ ИНФОРМАЦИОННЫХ УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ

К.О. Беляков, Р.В. Мещеряков, В.К. Сарьян, А.А. Шелупанов

Предложена структура обеспечения информационной безопасности Центра головной станции информационной управляющей системы. Предложена типовая структура удостоверяющего центра, обеспечивающая защиту информации.

Ключевые слова: информационная безопасность, защита информации, удостоверяющий центр.

Современное развитие инфокоммуникационного пространства с появлением множества телевизионных компаний, вещающих помимо с централизованных станций еще и с альтернативных; появление различных сред распространения медиаданных, средств и способов передачи, – все это неумолимо приводит к необходимости решения задач, связанных с идентификацией медиаданных.

И если, с одной стороны, эта задача выглядит как решения защиты авторских прав на произведение или медиаданные, то с другой стороны, эта же задача выглядит как определение достоверности произведения или медиаданных, получаемых пользователем.

Реализация масштабного интеграционного проекта ИУС позволяет предусмотреть в составе комплекс, отвечающий за функции Удостоверяющего центра, на который возлагается ряд соответственных задач.

Раздел ИУС, посвященный удостоверяющим технологиям, включает в себя:

1. Доверенные зоны абонента как зоны ответственного, удостоверенного приема-передачи медиаданных, включающие технологии ЭЦП и УЦ.
2. Удостоверяющие центры, опорные центры, контролирующие наличие и сроки действия подтвержденных сетрификатов.
3. Технология по типу «свой-чужой» в определении легальности и идентичности получаемого медиаконтента.
4. Идентификация медиаданных на уровне головных станций управления ИУС.

Параметры, влияющие на функционирование Удостоверяющего центра ИУС:

1. Децентрализация источников медиаданных.
2. Модификация медиаданных.
3. Умышленное синтезирование медиаданных.
4. Целевое воздействие на целевую аудиторию модифицированных или синтезированных медиаданных.

5. Наличие и постоянная генерация в инфокоммуникационном пространстве «обособленных информационных услуг», не связанных с реальной экономикой и реальностью

6. Оперативность (скорость выявления) поиска и выделения «обособленных информационных услуг»

Технологии, применяемые в Удостоверяющих центрах ИУС:

1. Внедрение «водяных знаков» в медиаданные.

2. Внедрение «меток целостности» в медиаданных.

3. Внедрение «меток количественной и качественной модификации» медиаданных.

Типовая структура Удостоверяющего центра

Структура УЦ включает в себя следующие организационные подразделения (службы):

– административная служба УЦ;

– служба регистрации УЦ;

– служба безопасности УЦ;

– техническая служба УЦ.

Административная служба УЦ

Служба УЦ предназначена для решения задач по:

– управлению деятельностью Удостоверяющего центра;

– координации деятельности остальных служб УЦ;

– взаимодействию с пользователями УЦ в части разрешения вопросов, связанных с применением средств ЭЦП, ключей и сертификатов открытых ключей, изготавливаемых и/или распространяемых Удостоверяющим центром;

– взаимодействию с пользователями УЦ в части разрешения вопросов, связанных с подтверждением электронной цифровой подписи уполномоченного лица Удостоверяющего центра в сертификатах открытых ключей, изготовленных Удостоверяющим центром в электронной форме, или подтверждения собственной подписи уполномоченного лица Удостоверяющего центра в копиях сертификатов открытых ключей, изготовленных Удостоверяющим центром на бумажном носителе.

Служба регистрации УЦ

Служба регистрации УЦ предназначена для решения задач по:

– регистрации пользователей УЦ;

– ведению реестра зарегистрированных пользователей УЦ;

– предоставлению служебных ключей и сертификатов открытых служебных ключей по обращению пользователей УЦ;

– распространению средств электронной цифровой подписи и шифрования.

Служба безопасности УЦ

Служба безопасности УЦ предназначена для решения задач по:

– организации и выполнению мероприятий по защите ресурсов Удостоверяющего центра;

– изготовлению и предоставлению ключей по обращению пользователей УЦ;

– изготовлению и предоставлению изготовленных сертификатов открытых ключей в электронной форме по обращению пользователей УЦ;

– изготовлению и предоставлению копий сертификатов открытых ключей на бумажном носителе по обращению их владельцев;

- аннулированию (отзыву) сертификатов открытых ключей по обращениям владельцев сертификатов открытых ключей;
- приостановлению и возобновлению действия сертификатов открытых ключей по обращению владельцев сертификатов открытых ключей;
- предоставлению пользователям УЦ сведений об аннулированных и приостановленных сертификатах открытых ключей;
- предоставлению копий сертификатов открытых ключей, находящихся в реестре изготовленных сертификатов, по запросам пользователей УЦ;
- техническому обеспечению процедуры подтверждения электронной цифровой подписи в документах, представленных в электронной форме, по обращениям пользователей УЦ;
- техническому обеспечению процедуры подтверждения подлинности электронных цифровых подписей уполномоченного лица Удостоверяющего центра в изготовленных сертификатах открытых ключей, по обращениям пользователей УЦ.

УДК 004.056

ЭЛЕМЕНТЫ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ОЦЕНКИ БИОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ В ЗАЩИЩЕННЫХ СИСТЕМАХ

Д.В. Черных, А.А. Конев, Р.В. Мещеряков

Предложена структура обеспечения информационной безопасности в автоматизированной системе. Предложена схема, заменяющая стандартные процедуры. Предлагается функциональное наполнение для системы аутентификации.

Ключевые слова: аутентификация, информационная безопасность, автоматизированная система.

Для проведения исследований речевых сигналов программный комплекс для исследования речевых сигналов должен обладать следующим функционалом:

- возможность отображать на экране результатов работы модулей;
- возможность сохранения результатов работы в файл;
- возможность задания различных параметров обработки;
- возможность пакетной обработки сигналов;
- возможность добавления сигналов;
- возможность добавления фильтров;
- возможность проведения свертки сигнала с фильтром;
- возможность изменения параметров алгоритмов сегментации.

Для создания различных сборок из модулей программный комплекс должен быть реализован в виде отдельных DLL-файлов.

На рис. 1 представлена структурная схема программного комплекса по исследованию и обработке речевых сигналов. Более темным цветом выделены новые модули.

Обозначения на рис. 1: t – время; k , kt , kw – номера каналов фильтрации; $h_c(t, k)$ и $h_s(t, k)$ – импульсные переходные параметров и фильтров для косинусной и синусной составляющих соответственно; W_0 – весовые коэффициенты одновременной маскировки; P_0 – результат одновременной маскировки, $Sig(t)$ – входной сигнал; $F(t, k)$ – мгновенные значения частоты сигнала; $Inten(t, k)$ – мгновенные интенсивности сигнала; $NumberHarm(n, t)$, $FreqHarm(n, t)$ – номера и значения

частот гармоник, отсортированных по убыванию интенсивности; $pgNum$ – порог на разницу номеров гармоник; pgT – порог на минимальную длительность по времени; $dmin(t)$ – сглаженные значения минимальных мер различия; GrC , $GrHarm$ – границы сегментов; $minV$, $minNV$ – пороги на минимальную длину вокализованного и невокализованного сегмента.

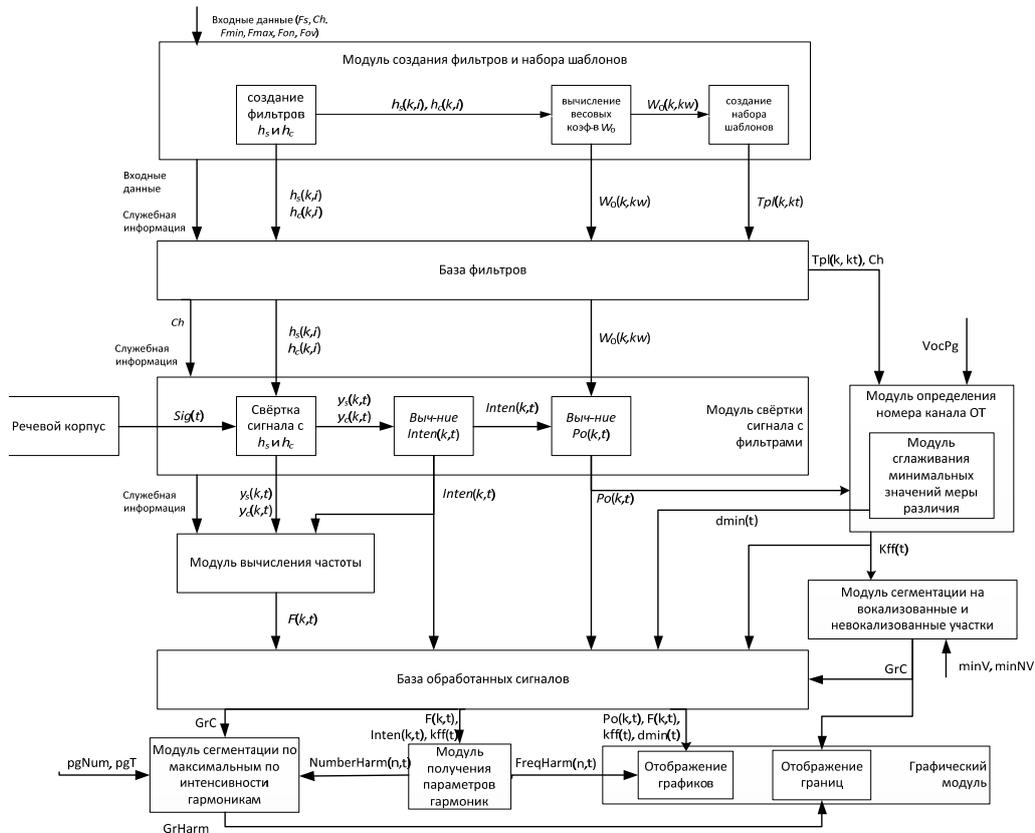


Рис. 1. Структурная схема программного комплекса

Модуль определения номера канала частоты основного тона вычисляет на текущем временном отсчете номер канала, в котором содержится частота основного тона. При этом происходит сравнение результата маскировки с набором шаблонов, которые заранее сгенерированы на этапе создания фильтра. Это сравнение можно провести несколькими способами – проверять на количество совпавших или различных элементов шаблона и результата маскировки, а также с использованием и без использования нормализации. Таким образом, можно получить четыре различных алгоритма определения номера канала частоты основного тона, один из которых был реализован ранее. Также по результатам проведенного сравнения происходит оценка вокализованности данного отсчета путем сравнения с заданным пользователем порогом.

Алгоритм для сглаживания значений минимальных мер различия необходим для того, чтобы сгладить влияние тех значений, которые были определены неправильно. Неправильно определенными считаются те значения, которые сильно отличаются от остальных значений в своей окрестности.

Алгоритм сглаживания действует следующим образом: задается длина окна анализа и для каждого значения минимальной меры различия вычисляется среднее арифметическое значений, которые попадают в окно анализа. Попавшим в окно анализа считается такое значение, которое отстоит от текущего не дальше чем на половину длины окна анализа.

В результате был реализован программный комплекс, с помощью которого можно проводить исследования в области речевых технологий на предмет выявления таких параметров звуковых единиц, которые бы позволили выделять различные классы звуков, а в конечном счете и отдельные звуки. Реализовано 8 модулей:

- модуль определения номера канала частоты основного тона;
- модуль сглаживания значений минимальных мер различия;
- модуль сегментации на вокализованные и невокализованные участки;
- модуль вычисления параметров гармоник;
- модуль сегментации вокализованных участков;
- графический модуль;
- модуль пакетной обработки;
- пользовательский интерфейс.

Множество задаваемых параметров позволяет проводить гибкую настройку под различные задачи пользователя. Централизованная база данных хранения результатов обработки позволяет пользователю работать с любого рабочего места.

Работа поддержана грантом Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг., в рамках реализации мероприятия № 1.2.2 «Проведение научных исследований научными группами под руководством кандидатов наук», контракт П1083.

УДК 004.853

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ОТРАБОТКИ НАВЫКОВ ЗАЩИТЫ СЕРВЕРА

И.Г. Ганюшкин

Предложено применение превентивных мер управления рисками, а именно создание комплекса, позволяющего отрабатывать навыки снижения количества уязвимостей в информационных системах, основанного на функционировании базы знаний и программных средств, выполняющих диагностику готовности системы к защите информации.

Ключевые слова: уязвимость, превентивные меры защиты, сервер, взлом.

Постановка задачи. Объективно категория «информационная безопасность» возникла с появлением средств информационных коммуникаций между людьми, а также с осознанием человеком наличия у людей и их сообществ интересов, которым может быть нанесен ущерб путём воздействия на средства информационных коммуникаций, наличие и развитие которых обеспечивает информационный обмен между всеми элементами социума. Для обеспечения этой безопасности необходимо обладать определёнными знаниями и навыками. Такие умения появляются в результате проб и ошибок, но шутить с информацией, которая может являться ценной, не стоит. По этой причине и создаются своего рода тренажеры, позволяющие развиваться без риска для себя и окружающих.

В условиях рыночной экономики информация имеет цену, и ее утечка может повлечь различного рода потери, в первую очередь финансовые. Развитие информационных технологий и их повсеместное внедрение привели к упрощению процесса обработки информации пользователем, одновременно с этим усложнились информационные системы. Как известно, чем сложнее система, тем больше в ней потенциальных уязвимостей. Уязвимость – параметр, характеризующий возможность нанесения описываемой системе повреждений любой природы теми или иными внешними средствами или факторами [1].

Создание программного комплекса – тренажера, структура которого представлена на рис. 1, позволит приобрести и отработать навыки устранения уязвимостей информационной системы. В основе разрабатываемого комплекса лежит принцип работы программных средств, выполняющих диагностику готовности системы к защите информации. К таким технологиям относят ликтест (leaktest, тест на утечку данных) и чекеры (checker – система для поиска уязвимостей) [2, 3].



Рис. 1. Структура тренажера

Суть идеи создания программного комплекса заключается в том, что предлагается применять более эффективные методы управления рисками. Управление уязвимостями – это превентивный способ снижения рисков (обнаружение и устранение), который позволяет даже при наличии угрозы избежать ущерба, т.к. угроза не может быть реализована без уязвимости. Это идеально хороший и оптимальный способ снизить риск, т.к. большинство угроз использует ограниченное число простых уязвимостей (под простыми уязвимостями подразумеваются уязвимости, описание которых доступны в Интернет). Таким образом, управляя известными уязвимостями в своей инфраструктуре, возможно избежать большинства угроз. Считается, что применение превентивных мер, а именно снижение количества уязвимостей хотя бы на 20%, приводит к снижению рисков на 80% (рис. 2).

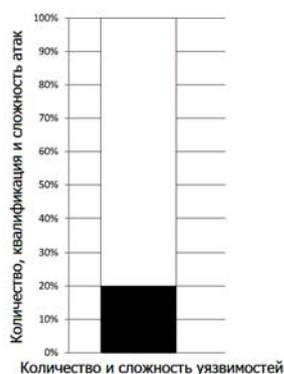


Рис. 2. Диаграмма зависимости надежности системы от состояния готовности системы

■ Злоумышленник низкой квалификации
 □ Злоумышленник высокой квалификации

Вышесказанное непосредственно связано с тем, что около 80% злоумышленников могут использовать около 20% уязвимостей (рис. 3) [4].

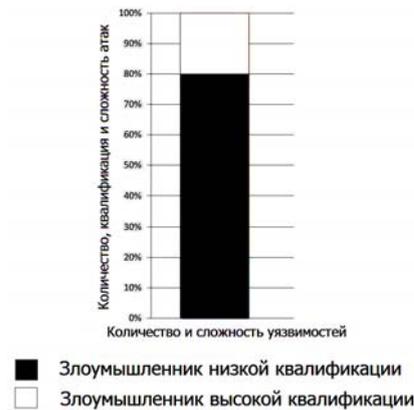


Рис. 3. Диаграмма зависимости надежности системы от класса подготовленности злоумышленника

Принцип работы с тренажёром отражает диаграмма Шухарта – Деминга (рис. 4).

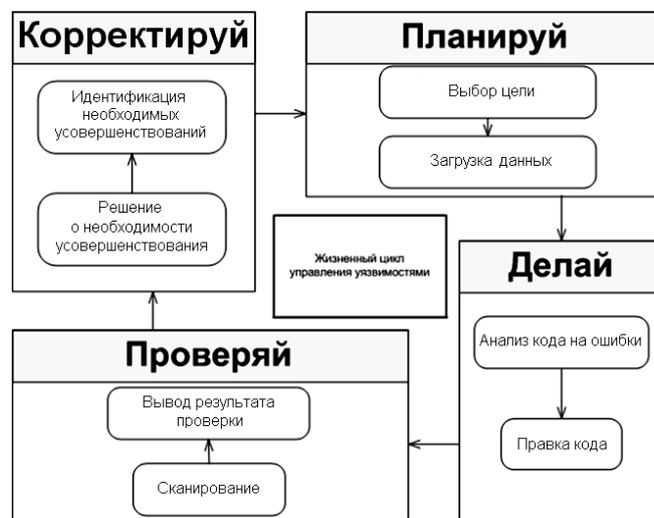


Рис. 4. Жизненный цикл устранения уязвимостей

Технологическая и функциональная схемы процесса эксплуатации системы. Система определения навыков подключается на первой стадии, перед началом прохождения обучения, и затем не участвует в процессе работы с комплексом до перехода к новым предпочтениям в выборе IT-специалиста. Формирование задания осуществляется следующим образом: IT-специалист выбирает направление своих интересов (тип уязвимости либо комплекс таковых) и указывает свою степень подготовки в этой области, из этой информации система генерирует набор задач и обращается в библиотеку уязвимостей, из библиотеки уязвимостей, согласно перечню, образы уязвимостей, сформированные в уязвимый образ, попадают в атакуемую систему и на этом система выбора тематики отключается от процесса обучения до момента выполнения предложенного задания либо до появления у участника пожеланий сменить задание обучения.

Процесс обучения: IT-специалист получает информацию от системы оповещения, что в системе присутствуют проблемы, а от базы знаний информацию о том, где узнать про решение подобных задач, отправляет исправление в атакуе-

мую систему; система проверки наличия уязвимостей сканирует уязвимый образ, отправляя в дальнейшем собранную информацию системе оповещения, которая в свою очередь анализирует полученные данные, обрабатывает их и формирует сообщение о том, справился ли конкурсант с заданием, а также необходимые для работы ИТ-специалиста сведения. Таким образом, процесс наладки системы длится до полного устранения в ней ошибок и восстановления её работоспособности (рис. 5).



Рис. 5. Технологическая схема

На вход системы подаётся информация об участнике, его предпочтениях и степени готовности к решению предлагаемых задач, а также информация о способе отчёта системы перед пользователем (рис. 6).

На выходе из системы пользователь получает информацию о реальной степени подготовки в выбранной им области и реальный опыт применения теоретических знаний (рис. 6).

На рисунке ниже представлена декомпозиция схемы. На вход первого функционального блока подаются данные, необходимые для регистрации и учёта степени подготовленности участника, в процессе обработки на выходе информация, полезная для формирования образа определённой сложности. Во втором функциональном блоке выполняется окончательный сбор данных о возможностях и предпочтениях конкурсанта и формируется запрос на формирование образа с заданными параметрами. Третий блок получает эту информацию и на выходе выдает уязвимый образ в соответствии с запросами пользователя. В блоке, следующем за третьим, образ, полученный на входе, непрерывно подвергается мониторингу, а отправка на выход данных о состоянии системы осуществляется только после решения системы о том, что участник справился с задачей. В пятом блоке происходит обработка поступивших на вход данных о системе, а на выходе из него пользователь получает информацию о своей степени готовности и результатах тестирования в форме отчёта, информация о формате которого также поступает на вход пятого блока (рис. 7).

На рис. 8 представлена схема информационных потоков между основными модулями системы.

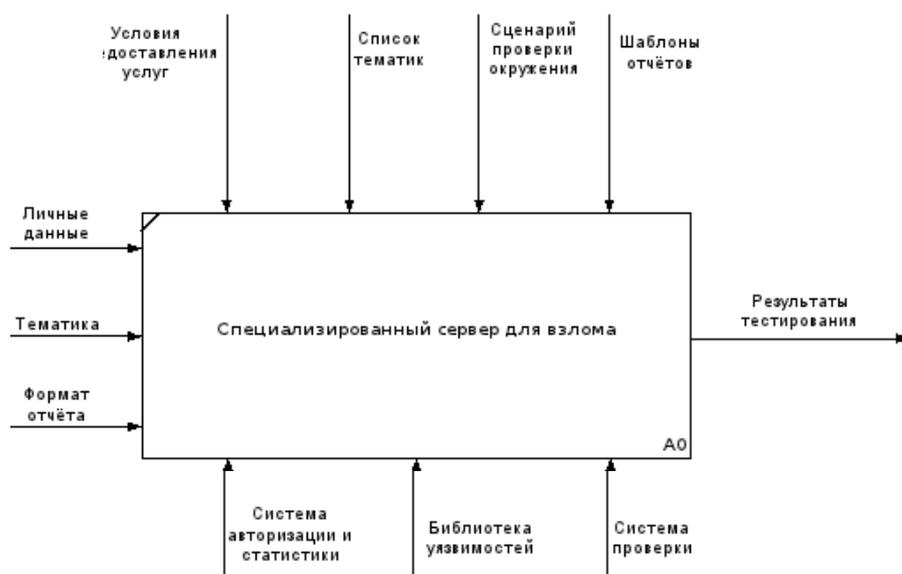


Рис. 6. Функциональная схема системы

Заключение. Исходя из вышесказанного, мы приходим к выводу о необходимости повышения количества квалифицированных специалистов, имеющих опыт обнаружения и устранения уязвимостей системы для повышения надежности ведения бизнеса. Разрабатываемый нами комплекс для отработки навыков защиты сервера от несанкционированного доступа будет полезен как на стадии повышения квалификации сотрудников ИТ-отделов, обеспечивающих информационную безопасность компании и сотрудников консалтинговых фирм, осуществляющих аудит информационной безопасности сторонних компаний, так и на более ранних стадиях подготовки кадров, например среди молодежи, обучающейся по направлениям информационной безопасности и еще только собирающейся начать обучение. Второе направление считается более перспективным, с точки зрения наличия у молодой аудитории большего свободного времени с возможностью посвящения его увлекательным своим многообразным заданиям с возможностью проведения соревнований.

С помощью данного комплекса предполагается решение следующих задач:

- допуск к работе лиц, удовлетворяющих соответствующим квалификационным требованиям в сфере ИТ-безопасности;
- обеспечение проведения подготовки и аттестации работников предприятий и учреждений в области ИТ-безопасности;
- отработка основных приемов в критических или чрезвычайных ситуациях;
- обучение работников служб безопасности действиям при критических или чрезвычайных ситуациях;
- анализ причин возникновения инцидентов и принятия мер по устранению выявленных причин.

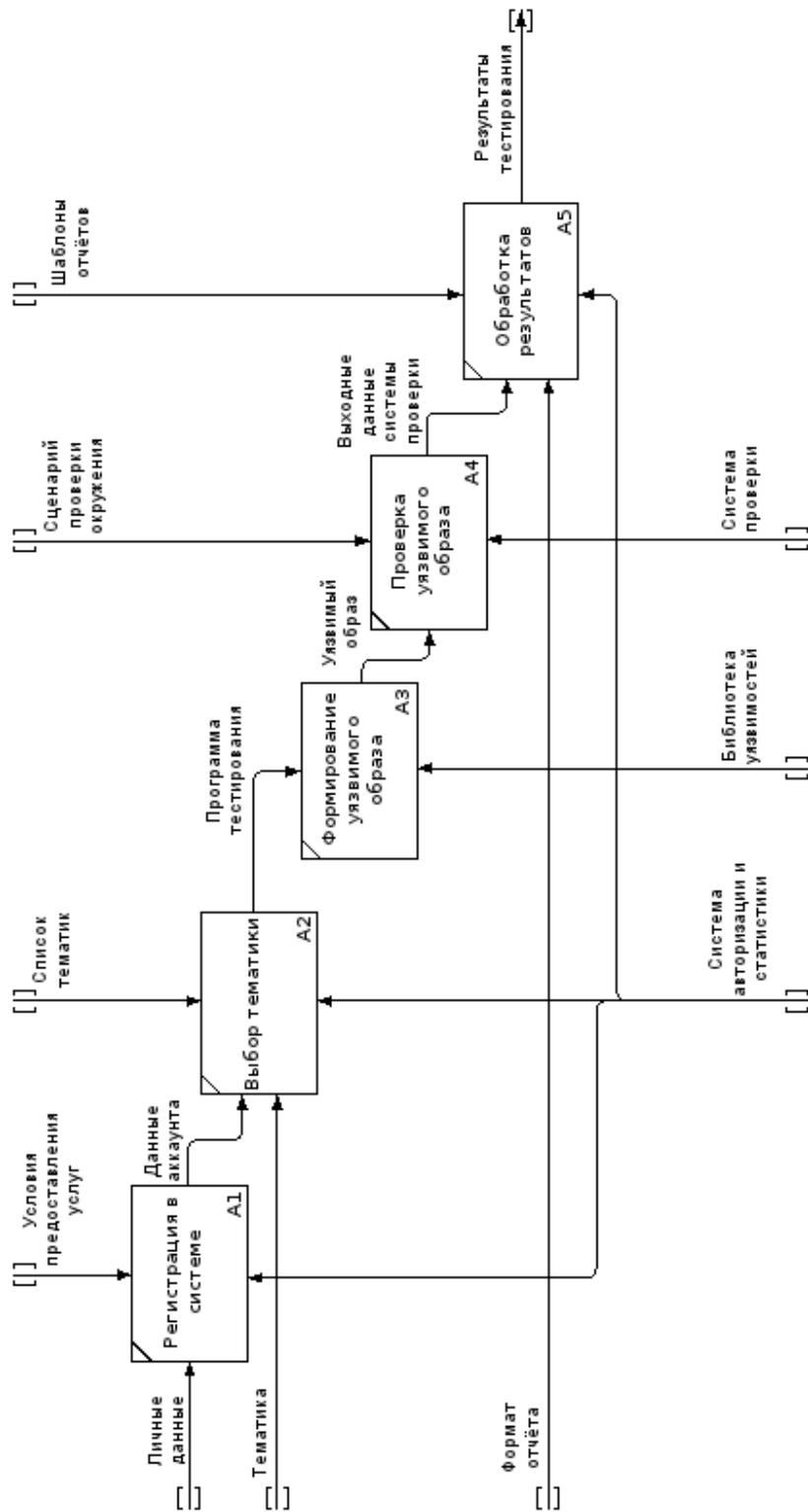


Рис. 7. Декомпозиция функциональной схемы системы

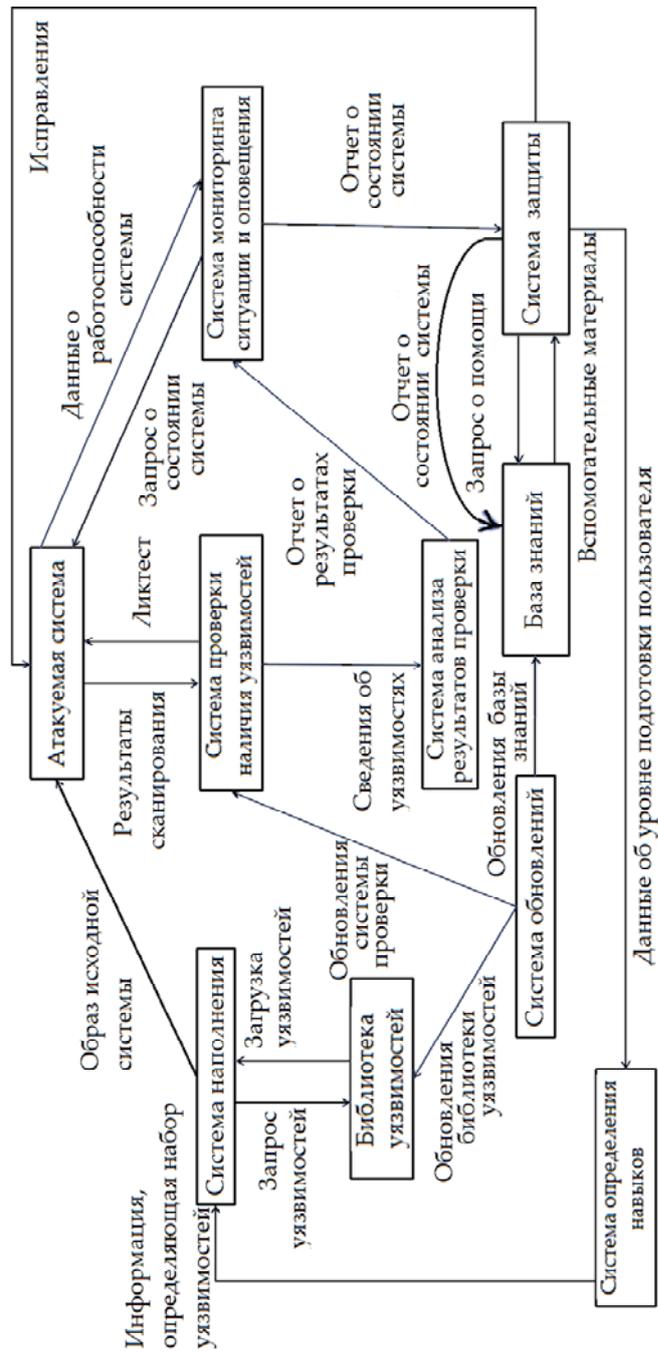


Рис. 8. Информационные потоки

Литература

1. Ломакин П., Шрейн Д. Антихакинг. М.: Майор, 2002. 510 с.
2. Ликбез по ликтестам [Электронный ресурс]: Электрон. дан. [Москва]. Режим доступа: <http://www.agnitum.ru/news/securityinsight/issues/october2008>, свободный. Загл. с экрана.

3. Серверный скрипт для поиска и проверки прокси серверов [Электронный ресурс]: Электрон. дан. [Москва]. Режим доступа: <http://www.proxy-tool.net/>, свободный. Загл. с экрана.

4. Превентивные меры снижения рисков считаются самыми эффективными [Электронный ресурс]: Электрон. дан. [Москва]. Режим доступа: http://www.penetrationtest.ru/service/Preventive_measures_detail.html, свободный.

УДК 004.415.2

ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ ОРГАНИЗАЦИИ БЕЗОПАСНОСТИ ДЛЯ СЕМАНТИЧЕСКИХ ВЕБ

Хоанг Ван Куэт

В данной статье рассмотрены основные задачи для поддержки безопасности семантических информационных систем (ИС). В частности, обсуждаются безопасность XML, безопасность RDF, безопасность OWL, а также обеспечение интеграции информации и доверие семантических ИС, приводятся некоторые детали исследований по контролю доступа и распространения XML, RDF и OWL документов. Затрагиваются вопросы конфиденциальности и защиты взаимодействия семантических ИС.

Ключевые слова: семантический веб, RDF, онтологии, OWL, XML.

Новейшие разработки в области информационных систем (ИС), технологий привели к созданию новых типов приложений в различных прикладных областях. Данные стали критическим ресурсом во многих организациях, следовательно, эффективный доступ к данным, обмен данными, извлечение информации из данных и использование информации стали насущной необходимостью. Появление семантических информационных систем обеспечивает взаимодействие и интеграцию различных существующих источников данных и систем, а также извлечение информации из баз данных организаций. Семантические ИС помогают специалистам уменьшить трудоемкость интеграции различных источников информации, а также выполнения в них поиска. В связи с тем, что семантические информационные системы только начали разрабатываться, до сих пор нет согласованного и обоснованного набора моделей и методов обеспечения безопасности доступа к хранящимся в них данным, информации и знаниям. В связи с выше-сказанным можно утверждать, что проблема поддержки безопасности семантических ИС является актуальной и недостаточно исследованной. Целью данной статьи является описание основных задач поддержки безопасности в семантических ИС.

Стандарты Semantic Web. Концепция Semantic Web является новым этапом развития современной Web-сети. На рис. 1 показаны уровни технологий Semantic Web. На самом низком уровне находятся протоколы взаимодействия, к которым относятся TCP/IP (Transmission Control Protocol/Internet Protocol), HTTP (Hypertext Transfer Protocol) и SSL (Secure Socket

Logic, Proof, Trust
Ontologies, Semantic Interoperability
RDF
XML, XML Schemas
TCP/IP, Sockets, HTML, Agents

Рис. 1. Слои для семантического веб

Layer). К следующему уровню относится язык XML (Extensible Markup Language), включая также язык XML Schema. Над ним располагается уровень языка RDF (Resource Description Framework). Далее идут уровни онтологий и взаимодействие. Наконец, на самом высоком уровне поддерживается технология управления доверием (logic, Proof, Trust). В настоящее время на основе данных технологий активно разрабатываются информационные системы.

Основные задачи для поддержки безопасности. На всех уровнях работы семантических ИС должен обеспечиваться высокий уровень безопасности. Это значит, что требуется обеспечение безопасности работы с каждым понятием (классом), используемым в онтологиях, на основе которых разрабатываются СИС. Также требуется обеспечивать безопасность взаимодействия между различными уровнями (рис. 2).

Logic, Proof, Trust
Secure Ontologies, Semantic Interoperability
RDF Security
XML Security, Secure XML Schemas
Secure TCP/IP, Sockets, HTML, Agents

Рис. 2. Слои для безопасности семантических информационных систем

данных [1]. Язык RDF обеспечивает лучшую поддержку возможности взаимодействия между данными, выполнения поиска и категоризации данных. Язык RDF описывает содержание документов и отношение между различными их разделами. Хотя язык XML предоставляет синтаксис и обозначения, язык RDF является дополнением, позволяющим описывать семантическую информацию стандартизированным способом. Для обеспечения безопасности семантических данных необходимо обеспечить безопасность RDF-документов [2]. Вопросы безопасности связываются с понятиями ресурсов, свойств и утверждений. В связи с этим необходимо решить следующие задачи:

1. Обеспечение контроля доступа к семантическим данным.
2. Защита свойств и утверждений.
3. Обеспечение управления доступом с различным уровнем детализации.
4. Задание свойств безопасности для контейнеров моделей.
5. Описание политики безопасности на языке RDF.
6. Выявление семантических несоответствий для используемых политик безопасности.
7. Описание ограничений безопасности на языке RDF.
8. Описание свойств безопасности, связанных с созданием утверждений об утверждениях.

На нижнем уровне требуется обеспечить безопасность протоколов TCP/IP, Sockets и HTTP. В настоящее время имеются безопасные версии данных протоколов. Требуется обеспечить высокий уровень безопасности «с нижнего – до верхнего» уровня. Нельзя просто иметь безопасные TCP/IP соединения, построенные на ненадежных слоях коммуникации.

На следующем этапе требуется обеспечить безопасность XML и XML-схем, т.е., доступ к различным частям XML-документа должен контролироваться при просмотре, чтении и модификации. Основная задача заключается в том, чтобы пользователи получили доступ ко всему или только к отдельным частям XML-документов.

Следующим шагом является обеспечение безопасности RDF-документов. Язык RDF является основным языком описания семантических

Все перечисленные задачи являются достаточно сложными и требуют проведения исследований. Обеспечение безопасности XML-данных является только началом решения поставленных задач. Язык OWL является более выразительным и имеет больше возможностей выполнения логического вывода, чем RDFS. Данный язык может использоваться для описания политики безопасности, как для XML, так и RDF-данных. Технология контроля доступа может быть применена и к OWL-документам.

Онтологии должны быть безопасными, т.е. доступ к онтологиям должен контролироваться. Контроль доступа может быть основан на содержании, контексте и времени. По мере развития онтологий может меняться и контроль доступа. Вместе с описанием OWL онтологий может описываться и политика доступа к ее элементам.

Как и для RDF-данных, проблема безопасности OWL-описаний заключается в определении степени детализации прав доступа. Пользователю может быть предоставлен доступ к OWL-документу в целом, или к отдельным частям документа [2].

Существуют два аспекта проблемы. Первый аспект заключается в управлении доступом к OWL-документам (рис. 3), а другой – в использовании самого языка OWL для описания политики доступа.

Алгоритмы для контроля доступа заключаются в следующем:

1. Субъекты запрашивают доступ к OWL-документам в двух режимах: просмотр и авторский доступ. При режиме просмотра пользователи могут читать и использовать документ. При авторском режиме доступа можно менять, удалять и добавлять содержание документов.

2. Модуль контроля доступа проверяет базы описания политик и применяет спецификацию политики.

3. Представления документа создаются на основе учетных данных и спецификации политики.

4. В случае конфликта используется правило наименьших привилегий доступа.

Насколько известно, исследования по организации безопасности для OWL-баз данных в настоящее время отсутствуют. Требуются методы для обработки запросов, управлений транзакциями и управления хранением данных для OWL-документов. Как и в случае с XML-данными, данные, касающиеся безопасности должны быть включены в такие OWL базы данных. Например, описания политик контроля доступа должны быть описаны в самих OWL-базах данных. А это также означает, что сами политики безопасности должны быть описаны на языке OWL.

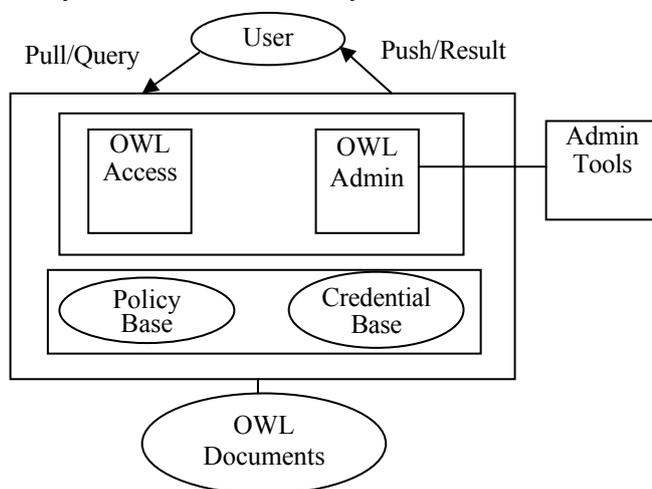


Рис. 3. Контроль доступа к OWL документам

Следующим шагом является обеспечение информационного взаимодействия. В сети Интернет имеется огромное количество информации. Данные могут быть структурированными и неструктурированными, могут быть представлены в виде таблиц или в виде текста, звука, изображения и видео [3]. Для безопасности информационных интеграций необходимо решить следующие задачи:

1. Создание собственной политики для каждой кнопки на веб-сайте, и общей политики сообщества в Интернете.
2. Создание более тесной интеграции централизованной политики или динамической интеграции политики.
3. Онтологии должны играть ключевую роль в интеграции информационной безопасности в сети.
4. Сочетание онтологии с политикой безопасности и использование онтологии для определения политики безопасности.

Одним из слоев семантической ИС являются логики, доказательство и доверие. В основном этот слой работает с управлением довериями, взаимодействием между различными агентами. Основными задачами обеспечения безопасности на данном уровне являются:

1. Поддержка доверия пользователя к информации на сайте, источнику информации.
2. Организация взаимодействия между участниками.
3. Возможность сочетать управление данными.

Безопасность не является не второстепенной проблемой ИС, а должна быть встроена в систему с самого начала. Аналогичным образом безопасность не может быть второстепенной для семантических ИС. Тем не менее система может стать неэффективной, если постоянно будет реализовываться 100% уровень безопасности. В связи с этим нужна гибкая политика поддержки безопасности. В некоторых случаях для работы системы будет требоваться 100% безопасность, а в других случаях нет.

Заключение. Кратко рассмотрены семантические ИС и основные задачи обеспечения безопасности их работы. Поясняются проблемы с безопасностью для уровня технологий семантических ИС. Отмечается, что безопасность должна поддерживаться на всех уровнях системы. Рассмотрены вопросы обеспечения безопасности XML, RDF, интеграции информации и доверия. Описывается некоторый способ контроля доступа к XML-документам. Как и обеспечение безопасности XML-документов, большое значение имеют вопросы безопасности RDF-документов. Поясняется роль онтологии для интеграции задач информационной безопасности.

Литература

1. Resource Description Framework [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.w3c.org>, свободный (дата обращения: 15.06.2011).
2. Hayes P., ed. RDF Semantics. W3C Recommendation [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.w3.org/TR/rdf-mt/>, свободный (дата обращения: 20.06.2011).
3. Thuraisingham B. Database and Applications Security: Integrating Data Management and Information Security, CRC Press, Boca Raton, FL, 2005.

РАЗРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ СЕТЕВОЙ СРЕДЫ И ЕЁ БЕЗОПАСНАЯ ИНТЕГРАЦИЯ В КОРПОРАТИВНУЮ СЕТЬ

А.А. Лисс, Т.М. Пестунова

При создании, освоении и внедрении новых компьютерных технологий возникает необходимость их исследования в лабораторных условиях, которые могут не соответствовать требованиям принятой политики безопасности. В таких условиях целесообразно создание некоторого специализированного сегмента, который будем называть экспериментальной сетевой средой (ЭСС). Наличие ЭСС, взаимодействующей с внешней сетевой средой, как правило, создает новые уязвимости и увеличивает информационные риски в корпоративной сети (КС). Предложенная технология безопасного взаимодействия КС и ЭСС обеспечивает защиту ЭСС от внешних и внутренних атак и предотвращает исходящие атаки из ЭСС в направлении КС, в том числе при наличии ошибок в политике безопасности в КС, которые не контролируются администратором ЭСС. Данное требование заложено в разработанную модель угроз. Результатом исследований является разработка модели ЭСС, отвечающей сформулированным требованиям безопасности и ее реализация в рамках создания учебно-исследовательского полигона по компьютерной и сетевой безопасности в НГУЭУ.

Ключевые слова: экспериментальная сетевая среда, корпоративная сеть, классификация угроз, свободное программное обеспечение.

При создании, освоении и внедрении новых информационных технологий возникает необходимость их исследования в лабораторных условиях, которые могут не соответствовать требованиям политики безопасности, принятой в корпоративной сети (КС). В этих случаях целесообразно создание *экспериментальной сетевой среды (ЭСС), представляющей собой совокупность компьютерного оборудования с установленным на нем системным и прикладным программным обеспечением (в том числе средствами защиты информации), объединенную в локальную сеть, которая может функционировать автономно или во взаимодействии с другими компьютерными сетями.* Такая потребность часто возникает в образовательном процессе и при проведении научно-исследовательских работ в сфере информационной технологий и компьютерной безопасности [1].

Наличие ЭСС в КС, как правило, повышает вероятность сетевых угроз, создает новые уязвимости и увеличивает информационные риски в КС. В частности, увеличиваются такие риски вмешательства в КС, как скрытое удаленное управление, анализ сетевого трафика, выявление доступных портов и протоколов и т.п. Рост уязвимостей обусловлен ослаблением политики безопасности в ходе тестирования и исследований, возникновением противоречий между политиками безопасности ЭСС и действующей КС, перегрузкой транспортных каналов.

В этих условиях *взаимодействие* КС и интегрированной в нее ЭСС должно быть организовано так, чтобы возможность *негативного воздействия* на КС со стороны ЭСС была *минимальна*. Исходя из этого обстоятельства, при разработке модели угроз ЭСС требуют анализа не только угрозы, направленные на нарушение безопасности ЭСС, но и потенциальные угрозы, которые могут исходить из ЭСС в направлении КС. Целью работы являлось моделирование и реализация ЭСС, безопасно интегрируемой в функционирующую сеть с учетом внутренних, внешних и исходящих угроз. Создание ЭСС должно обеспечить эффективную и

благоприятную сетевую среду для решения учебных и исследовательских задач в сфере компьютерной и сетевой безопасности.

Требования к ЭСС. Для достижения поставленной цели ЭСС должна удовлетворять следующим требованиям.

Требование 1. ЭСС должна быть приближена по функциям и сетевой структуре к реальной КС с функционирующими серверами и сервисами, поэтому в ней должны быть корректно сконфигурированы и функционировать аппаратные и программные средства типовой КС. В ЭСС должны присутствовать серверы для доступа к сети Интернет, веб-сервер, почтовый сервер, сервер безопасности, файловый сервер, сервер управления сетью. Кроме того, должны быть реализованы типовые сервисы безопасности [2].

В целом сетевая структура ЭСС должна быть подобна типичной сетевой структуре корпоративной сети, представленной на рис. 1, возможно, без DMZ-зоны ввиду проводимых экспериментов и тестирования. Межсетевой экран на входе в DMZ не всегда позволяет в полной мере провести обследование безопасности доступных серверов.

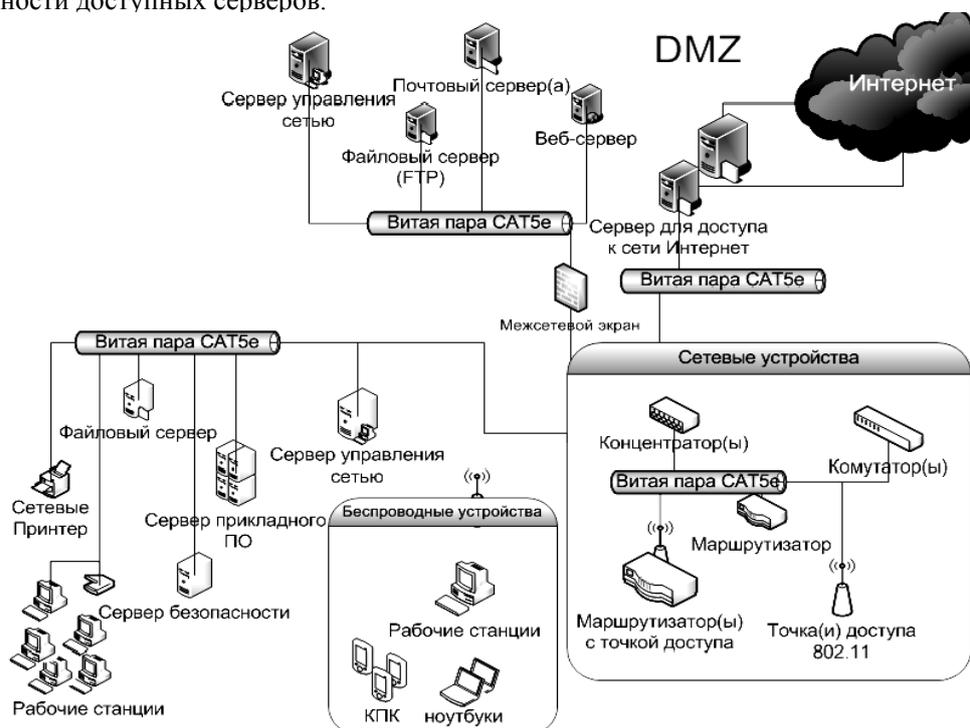


Рис. 1. Структура корпоративной сети

Требование 2. ЭСС должна взаимодействовать с функционирующей КС, в которую интегрирована ЭСС (такую КС будем называть «дружественная сеть»). Это необходимо для предоставления интернет-ресурсов, корпоративных ресурсов в ЭСС, возможности расширения мощности ЭСС. Для корпоративной сети ЭСС даёт возможность тестирования новых технологий, так, чтобы это не повлияло на работоспособность КС. Следовательно, серверы ЭСС и реализованные сервисы безопасности, а также аппаратные средства должны быть сконфигурированы с учетом этого требования.

Требование 3. ЭСС должна быть гибкой сетевой средой. Под гибкостью сетевой среды понимается возможность быстрого переконфигурирования ЭСС так, чтобы использовать разные операционные системы (ОС) и прикладное программное обеспечение одновременно, выделять в ЭСС подсети и выполнять другие преобразования без ущерба её работоспособности и безопасности. Для этого требуется реализовать технологию виртуальных машин, по возможности вынести ряд функций на сетевое оборудование, заложить потенциал для переконфигурирования сети, использовать серверы на различных платформах ОС.

Требование 4. ЭСС должна противостоять внутренним и внешним угрозам, направленным на ЭСС, и не допускать создания угроз информационной безопасности в направлении «дружественной сети».

Классификация угроз ЭСС. С учетом данных требований была разработана модель угроз ЭСС, в которой, в отличие от существующих подходов, введён новый параметр классификации угроз, выражающий **направленность угрозы**. Это обусловлено тем, что объектом исследования является ЭСС, взаимодействующая с «дружественной сетью», и хотя политика безопасности «дружественной сети» не может контролироваться администраторами ЭСС, должны быть предусмотрены меры, чтобы ЭСС в соответствии с *требованием 4* не являлась для неё дополнительным источником угроз.

Под угрозой информационной безопасности понимается совокупность условий и факторов, создающих потенциальную или реально существующую опасность нарушения безопасности информации [3].

С учётом цели ЭСС рассматриваются возможные угрозы целостности, конфиденциальности и доступности с применением программных и программно-аппаратных средств, которые можно классифицировать следующим образом:

угроза <ИМЯ> = <направленность>, <источник угрозы>, <уязвимость системы>, <способ реализации угрозы>, <объект воздействия>, <деструктивное действие>.

Параметр «**направленность**» может принимать два значения: «на экспериментальную среду» и «из экспериментальной среды».

Остальные параметры задают типовые характеристики угроз, представленные в научной литературе и нормативно-методических документах по защите информации [4]. Разработанная на основе данного подхода модель угроз включает формализованное описание двадцати пяти угроз, которые должны быть рассмотрены при создании ЭСС.

Для анализа актуальности этих угроз в конкретных условиях может быть адаптирована стандартная двухфакторная методика оценки рисков [5, 6]. В связи с отличием цели создания ЭСС от целей реальной корпоративной сети в стандартной методике были изменены некоторые градации шкалы, соответствующие степеням актуальности угрозы.

Модель ЭСС. Модель ЭСС основана на сетевой структуре типичной корпоративной сети, дополненной сервисами безопасного взаимодействия с КС, которые направлены на предотвращение актуальных угроз, определённых разработанной моделью угроз ЭСС.

Выбор технологий для реализации ЭСС проводился на основе таких критериев, как защищённость, стабильность, гибкость, быстроедействие, экономичность и др. Согласно этим критериям были определены операционные системы, средства виртуализации, технологии сетевого взаимодействия и средства защиты.

Структура ЭСС, реализованной на основе разработанной модели, представлена на рис. 2. Данная ЭСС создана в лаборатории компьютерной и сетевой

безопасности Новосибирского государственного университета экономики и управления в целях обеспечения условий для образовательного процесса по специальностям области информационных технологий и информационной безопасности и проведения исследовательских работ соответствующей направленности.

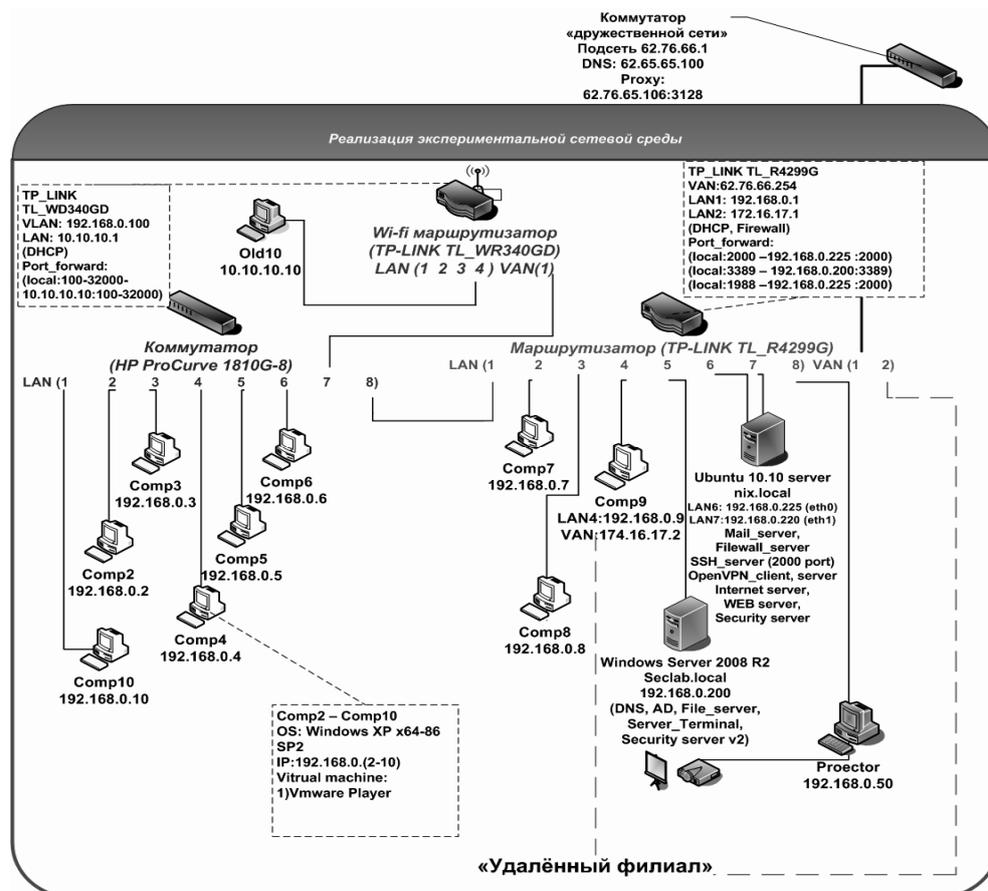


Рис. 2. Структура ЭСС

В созданной ЭСС реализованы сервисы безопасности на основе свободного программного обеспечения и программных продуктов, доступных для использования в соответствии с имеющимися в организации лицензиями. В частности, использованы встроенные средства доступных операционных систем и средства, распространяемые по лицензии GNU GPL. Так, например, экранирование было реализовано с использованием утилит iptables, route и авторского программного обеспечения, туннелирование трафика – на основе OpenVPN, OpenSSH, также дополненных авторскими программными разработками, шифрование – на основе авторского программного продукта с использованием алгоритма MD5. В результате создана гетерогенная среда на основе ОС Windows и Linux, безопасность которой обеспечивается предложенными средствами. Внутри ЭСС создана подсеть с беспроводной технологией и подсеть с технологией виртуальных машин. Данная ЭСС позволяет моделировать работу разнообразных корпоративных сетей. В частности, может быть смоделирована работа сетевой среды, которая характерна для территориально распределённых организаций, имеющих головное

предприятие, отдаленные филиалы и мобильных пользователей, взаимодействующих с использованием проводных и беспроводных технологий в условиях различных вариантов сочетания централизованного и децентрализованного управления информационными ресурсами. В рамках выполнения проекта апробирована также модель территориально распределенной ЭСС с безопасным взаимодействием между её сегментами на основе VPN-канала. При её реализации использовались, в частности, шифрование пакетов алгоритмом AES-256 и идентификация с использованием 2048-битного симметричного ключа.

Аналитические и экспериментальные исследования разработанной ЭСС подтвердили её соответствие функциональным требованиям 1–4, включая требование безопасной интеграции в корпоративную сеть. ЭСС используется в НГУЭУ в штатном режиме в учебном процессе и научно-исследовательских целях. В течение полугода на базе неё апробировано около двадцати различных технологий ИТ-безопасности, организовано несколько виртуальных учебных стендов для изучения комплексных решений по защите информационных процессов в компьютерных системах и программно-аппаратной защите информации (в том числе на базе сертифицированных средств защиты информации и технологий ведущих ИТ-производителей).

В настоящее время учебно-исследовательский полигон используется для решения следующих основных групп задач.

1. Удалённая демонстрация и изучение различных технологий безопасности и инструментов администрирования.

Данные задачи сложно было решить на функционирующем оборудовании в типовых компьютерных классах ввиду нехватки оборудования, объективной невозможности обеспечить полное соответствие действующей в организации политике безопасности. С помощью ЭСС данная задача была решена. Организован удалённый доступ как из «дружественной сети», так и из сети Интернет.

2. Удалённое использование для активных форм обучения и при выполнении исследовательских работ.

Задача возникла при подготовке и выполнении лабораторных работ, связанных с использованием и администрированием средств защиты информации. Доступ к работе в ЭСС предоставлен преподавателям с заданных удалённых компьютеров. Указанная функция особо востребована при развитии дистанционных форм обучения.

3. Организация распределённой экспериментальной среды с безопасным взаимодействием.

Компоненты экспериментальной среды территориально распределены, рабочие среды функционируют на разных платформах, и сетевое взаимодействие предоставляется различными провайдерами. Такая ситуация возникает, в частности, в условиях распределённой структуры организации, имеющей филиальную сеть, а также при проведении совместных учебных и исследовательских работ с участием разных научных и учебных организаций.

Заключение. Проанализирована типичная структура корпоративной сети, состав её программных и аппаратных средств, а также сервисов безопасности. Разработана модель угроз безопасности ЭСС. На основе разработанной модели угроз спроектирована и теоретически обоснована модель безопасной ЭСС. Выполнена практическая реализация ЭСС в виде учебно-исследовательского полигона в лаборатории компьютерной и сетевой безопасности НГУЭУ.

Литература

1. Козлов Е.Н. Создание учебно-экспериментальной метакомпьютерной вычислительной сети на базе корпоративной вычислительной сети. М.: Московский Энергетический институт (ТУ) [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://network-journal.mpei.ac.ru/cgi-bin/main.pl?l=ru&n=5&ra=12&ar=1>, свободный (дата обращения: 08.09.2011).
2. Запечников С.В. Информационная безопасность открытых систем: Учеб. для вузов: В 2 т. Т. 1: Угрозы, уязвимости, атаки и подходы к защите, 2006. 536 с.
3. ГОСТ Р 50922–2006. Национальный стандарт Российской Федерации. Защита информации. Основные термины и определения. Дата введения: 2008.02.01.
4. ФСТЭК. Базовая модель угроз персональных данных при их обработке в информационных системах персональных данных. Утверждена заместителем директора ФСТЭК России 15 февраля 2008 г. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.fstec.ru/_spravs/model.rar, свободный (дата обращения: 30.06.2011).
5. Guide to the Code of practice for Information Security Management. DISC PD 0007, 1995.
6. Risk Management Guide for Information Technology Systems. NIST: Special Publication 800-30.

УДК 608.2

ОСОБЕННОСТИ НАСТРОЙКИ РЕЧЕВОГО ПРОЦЕССОРА КОХЛЕАРНОГО ИМПЛАНТАТА ДЛЯ РУССКОЯЗЫЧНЫХ ПАЦИЕНТОВ С УЧЕТОМ ФОРМАНТНОГО СОСТАВА РУССКОГО ЯЗЫКА

Р.Ф. Нигматуллин

Предложена настройка речевого процессора для 12-канального кохлеарного имплантата, учитывающая формантное распределение в русском языке. Проанализировано влияние получаемых слуховыми органами формант на понимание устной речи.

Ключевые слова: кохлеарный имплантат, речевой процессор, слух, форманта, русский язык.

Актуальность проблемы. Кохлеарная имплантация является наиболее эффективным методом реабилитации высоких степеней периферической сенсоневральной тугоухости. Как известно, этот метод лечения представляет собой не только хирургическую операцию, но комплекс последующих реабилитационных мероприятий, в который входят регулярные настройки речевого процессора и занятия с сурдопедагогом. Речевой процессор представляет собой программируемое внешнее электронное устройство, обеспечивающее улавливание звука, его обработку и передачу в имплантированную часть [1]. От настройки процессора (речевой карты) напрямую зависит качество звуковосприятия у пациента, что подчеркивает важность этой процедуры.

Основные свойства речи. Рассмотрим процесс образования звуков речи голосовым аппаратом человека с точки зрения современной формантной теории, которая хотя и не объясняет полностью все явления, связанные с образованием и восприятием членораздельной речи, однако выводы из этой теории достаточно хорошо согласуются с практикой.

В образовании звуков речи принимают участие лёгкие, гортань с голосовыми связками, область носоглотки, язык, зубы и губы. В процессе произношения речи лёгкие через бронхи продувают воздух в гортань и далее и через вибрирующие голосовые связки – в полость рта. Голосовые связки, то сжимая, то открывая голосовую щель, пропускают воздух импульсами, частота которых приблизительно постоянна (рис. 1).

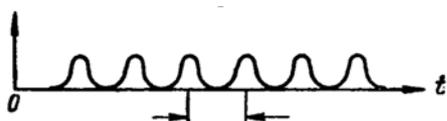


Рис. 1. Звуковое давление над голосовыми связками

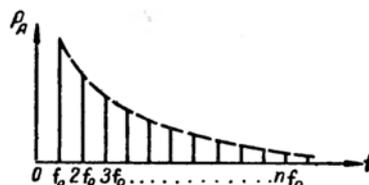


Рис. 2. Спектр звука над голосовыми связками



Рис. 3. Спектр сформированного звука

Частотный спектр получающегося при этом звукового давления содержит большое число гармонических составляющих, амплитуды которых уменьшаются с ростом частоты, как это представлено на рис. 2. Высота основного тона (первой гармоники) этого ряда характеризует собой тип голоса говорящего: бас, баритон, тенор, альт, контральто, сопрано, но в большинстве случаев почти не играет роли для различения друг от друга звуков речи.

Далее воздушная струя встречает на своём пути систему резонаторов, которые образуются воздушными объёмами полости рта и носоглотки и видоизменяются в процессе произнесения различных звуков положением языка и зубов. Проходя через эту систему резонаторов, одни гармонические составляющие получают усиление, а другие, наоборот, подавляются. Тогда картина спектра звука, излучаемого ртом, принимает вид, изображённый на рис. 3. На этом рисунке ясно видны усиленные области частот, характерные для спектра данного звука. Эти усиленные области частот называются формантными областями или просто формантами. Поскольку форманты значительно мощнее других составляющих, то они-то главным образом и воздействуют на ухо слушающего, формируя звучание того или иного звука.

Таким образом, оказывается, что по спектральному составу звуки речи различаются друг от друга числом формант и их расположением в частотном спектре. Отсюда видно, что и разборчивость передаваемой речи зависит, прежде всего, от того, какая часть формант дошла до уха слушающего без искажений и какая исказилась или по тем или иным причинам вообще не была услышана [2].

Основные процессы, проходящие во внутреннем ухе. Внутреннее ухо состоит из костяной улитки, наполненной жидкостью (перилимфой), в которой находятся основная мембрана уха с её колеблющимися под воздействием звуковых колебаний волокнами и около 30 000 окончаний слуховых нервов, передающих звуковые раздражения к слуховым центрам головного мозга.

Звуковые колебания через барабанную перепонку и систему среднего уха передаются перилимфе, которая, перемещаясь в улитке, колеблет волокна основной мембраны. При этом максимальную амплитуду колебаний получают те волокна, собственная частота колебаний которых совпадает или близка к частоте вынуждающего колебания. Если амплитуда колебаний достигнет определенной величины, то колеблющиеся волокна задевают окончания находящихся над ними слуховых нервов и импульсы звукового раздражения передаются в слуховые центры мозга. В зависимости от того, какие волокна мембраны и, следовательно, какие слуховые нервы участвуют в передаче этих раздражений, в мозгу создается слуховой образ той или иной высоты тона воспринимаемого звука [3]. Комбинация одновременно воспринимаемых колебаний различных частот (например, формант) создает слуховой образ того или иного сложного звука.

Настройка речевого процессора. Базовая настройка по частотам речевого процессора кохлеарного имплантата представляет собой разбиение звукового диапазона, воспринимаемого пациентом, на n частотных областей, которые соответствуют n электродам кохлеарного имплантата. Каждый электрод создает импульсное возбуждение определенного участка улитки, отвечающего за свою полосу воспринимаемых частот. Поэтому разные комбинации импульсов различных электродов имплантата дают разные звуки. Но эти полосы частот являются разными по ширине, так как диапазон воспринимаемых частот содержит в себе как места скопления формант, так и места с их редкой встречаемостью. Поэтому настройку необходимо проводить с учетом этой особенности. Но все имплантаты производятся за границей и настроены под иностранные языки, поэтому их базовые настройки являются малоэффективными для русскоязычных пациентов.

Основная идея адаптации зарубежных имплантатов под русский язык заключается в настройке этого имплантата с учетом относительной встречаемости формант русского языка. Из [4] были получены эти данные. Настройка составлялась исходя из того, что вероятность загрузки формантами каждого электрода будет одинаковой.

Литература

1. Староха А.В. Оптимальный алгоритм настройки речевых процессоров для повышения эффективности реабилитации после кохлеарной имплантации / А.В. Староха и соавт. // Оториноларингология. Бас, Мойын Хирургиясы. 2009. № 1–2. С. 24–25.
2. Покровский Н.Б. Расчет измерения разборчивости речи. М.: Государственное издательство литературы по вопросам связи и радио, 1962. С. 106–150.
3. Сапожков М.А. Речевой сигнал в кибернетике и связи. М.: Государственное издательство литературы по вопросам связи и радио, 1963. С. 85–120.
4. Варшавский Л.А., Литвак И.М. Исследование формантного состава и некоторых других физических характеристик звуков русской речи. Проблемы физиологической акустики. М.: Изд-во АН СССР, 1955. Т. 3.

КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ СЛУХОВОГО АНАЛИЗАТОРА ЧЕЛОВЕКА

А.Г. Позин

Предложена классификация методов исследований слухового анализатора человека, позволяющая выделить возможности создания элементов систем управления вычислительной техники. Рассмотрены наиболее популярные методы исследования слуха, проработаны вопросы недостатков и преимуществ отдельных методов, обозначены области применения методов исследования слуха.

Ключевые слова: метод исследования слуха, аудиометрия, классификация.

Методы исследования слуха. Существующие исследования слуха, начиная от речевых исследований человеком и заканчивая сложными специализированными методами с привлечением высокотехнологичной аппаратуры, оценивают качество слуха на разном уровне. Было выявлено отсутствие классификации исследований слуха, что существенно осложняет понимание методов исследования человеческого слухового анализатора. В существующих источниках приведены подробные описания методов исследования слуха, проработаны вопросы преимуществ и недостатков отдельных методов, обусловлены границы применения данных методов. Однако систематизации, позволяющей выделить возможности разработки систем управления в составе мобильных вычислительных устройств, не было найдено. Таким образом, была предложена классификация методов исследования слуха, изображённая на рис. 1.

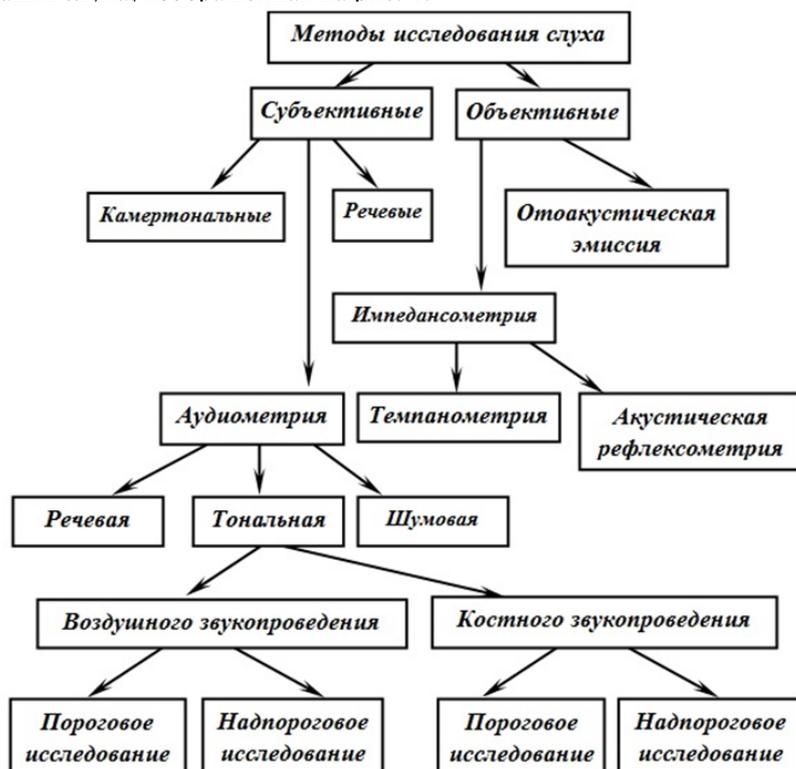


Рис. 1. Методы исследования слуха

Выявлено, что все исследования слухового анализатора человека можно разделить по психофизиологическому признаку на две большие группы: субъективные и объективные исследования. Объективная, или рефлекторная, аудиометрия основывается на рефлекторных безусловных и условных ответных реакциях обследуемого, возникающих в организме в ответ на звуковое воздействие и не зависящих от его воли [1].

Широко используемыми объективными методами являются исследование отоакустической эмиссии и исследования импедансометрии.

Отоакустическая эмиссия выступает в роли акустического ответа, который является отражением естественной работы рецептора, отвечающего за слуховую активность. Это очень слабые по частоте колебания звука, которые генерирует улитка. Данные колебания можно зарегистрировать во внешнем слуховом проходе благодаря микрофону высокой чувствительности. Такие колебания рассматриваются как результат деятельных автоматических процессов, которые проходят в кортиевоу органе, а точнее – в наружных волосковых клетках [2].

Акустическая импедансометрия – метод исследования, основанный на измерении акустического сопротивления (или акустической податливости) звукопроводящих структур периферической части слухового анализатора. В клинической практике чаще всего используются две методики импедансометрии – тимпанометрия и акустическая рефлексометрия [1].

Тимпанометрия позволяет оценить подвижность барабанной перепонки и слуховых косточек. Это быстрый и неинвазивный метод диагностики таких заболеваний, как экссудативный средний отит, отосклероз и др.

С помощью акустической рефлексометрии можно зарегистрировать сокращение внутриушных мышц в ответ на звуковую стимуляцию. Метод используется для дифференциальной диагностики заболеваний среднего и внутреннего уха, а также для определения порогов дискомфорта, используемых при подборе и настройке слуховых аппаратов [1].

Субъективное исследование слуха базируется на субъективных ощущениях обследуемого и на сознательной, зависящей от его воли ответной реакции [1].

Широко применяемыми методами субъективного исследования являются речевое исследование, исследование камертонами и исследование с использованием электроакустических приборов – аудиометров.

Речевое исследование слуха является одним из самых простых исследований слухового анализатора человека, оно широко применяется в амбулаторных исследованиях, при профессиональном отборе или осмотре, при прохождении медицинской комиссии на получение водительских прав или пригодности к военной службе. Главный недостаток речевого исследования – произносимая врачом речь нормируется в относительной шкале (шёпот, нормальная речь, громкая речь и крик), воспроизводимой на определенном расстоянии [1].

Исследование камертонами относительно речевого исследования обладает большим диагностическим эффектом, при помощи камертональных опытов возможно оценить как воздушное, так и костное звукопроведение [1]. Преимуществом камертональных опытов является то, что камертон представляет собой относительно не сложное в изготовлении мобильное устройство, основные камертональные опыты (опыты Ринне, Вебера, Желле и Федеричи) в аудиологии применяются больше века, что подчёркивает существенное диагностическое значение в исследованиях слухового анализатора человека [1]. Недостатками камертональных опытов являются определение интенсивности звука в относительных едини-

цах (время звучания камертона), а не в единицах интенсивности звукового сигнала (децибелы), кроме того, проведение камертональных опытов требует некоторой подготовки.

Аудиометрические исследования существенно отличаются от исследований камертонами и речевым исследованием тем, что звуковой сигнал воспроизводится не в относительных единицах, а в единицах измерения интенсивности звука. С развитием аудиометрической аппаратуры стало возможно отдельно проводить исследования воздушного и костного звукопроведения, речевой аудиометрии [1]. Главным недостатком аудиометров служит их дороговизна.

Диагностика с использованием аудиометрических исследований осуществляется достаточно просто. Прибор оснащен наушниками. При помощи излучателя (наушники или костный вибратор) подаются звуковые сигналы разной частоты. Пациент, воспринимая сигналы, сообщает об этом. Результатом слуховых тестов является график (аудиограмма), отражающий характер и степень нарушения слуха у человека.

По результатам исследования врач диагностирует степень нарушения различных показателей слуха. Процедура проходит комфортно и безболезненно.

Речевая аудиометрия обеспечивает постоянство речевого материала и дикции; возможность регулировки и регистрации интенсивности передаваемых слов; определение потери слуха в сравнимых единицах (децибелах). Этот метод дает возможность количественного определения слуховой функции по степени разборчивости речи, которая связана с поражением тех или иных звеньев звукового анализатора [2].

Речевая аудиометрия заключается в том, что разговорная речь или отдельные слова записывают с помощью высококачественной звукозаписывающей аппаратуры, а затем без искажения передают на динамический телефон, надетый на ухо испытуемого. Группы слов должны быть фонетически однородными и соответствовать словесной и ритмико-динамической структуре русского языка. Все слова при записи произносятся диктором одинаково громко, что контролируется при помощи специальной аппаратуры. Каждая запись – таблица – содержит 50 слов. Сила, с которой слова передаются к уху испытуемого, регулируется при помощи аттенюатора.

Шумовая аудиометрия. Другой психофизиологической функцией звукового анализатора является маскировка – величина, обратная помехоустойчивости. По мнению многих исследователей, маскировка – это процесс взаимодействия полезного и помехообразующих звуков, при которых последние подавляют первых и функцию выделения из общего звукового поля полезной информации. Применяется, как правило, в экспериментальных исследованиях [2].

Проводят также исследование разборчивости речи при шуме. Хотя их результаты порой в качественном отношении существенно разнятся, общий итог свидетельствует о большой ценности метода «речешумовой» аудиометрии. Во-первых, этот метод позволяет оценить слуховую функцию в реальных условиях жизнедеятельности человека, во-вторых, он более эффективен и адекватен при проведении профессионального отбора, в-третьих, он позволяет при соответствующем методическом обеспечении исследовать глубинные процессы переработки звуковой информации и выявлять верные механизмы слуховой функции, экстраполируемой на другие сенсорные и моторные функции организма.

Тональная пороговая аудиометрия – исследование включает определение порогов при воздушном и костном звукопроведении. Для этого определяют по-

роговую чувствительность органа слуха к восприятию звуков различных частот, подаваемых через воздушные наушники или костный телефон. Результаты исследования заносятся на аудиограмму. Таким образом, тональная пороговая аудиометрия прежде всего дает возможность определить остроту слуха. По характеру пороговых кривых воздушной и костной проводимости и их взаимосвязи можно получить и качественную характеристику слуха человека, т.е., имеется ли нарушение звукопроведения, звуковосприятия или смешанное (комбинированное) поражение.

Тональная надпороговая аудиометрия – исследование тихими пороговой интенсивности звуками не дает полного представления о способности звукового анализатора воспринимать разнообразные, постоянно встречающиеся в повседневной жизни звуковые раздражители, интенсивность которых намного превышает пороговую, в частности звуки разговорной речи. При некоторых патологических изменениях в рецепторе большого уха, например при кохлеарном неврите, наряду с понижением слуха развивается повышенная чувствительность только к громким звукам, при этом нарастание восприятия громкости происходит так быстро, что уравнивается со здоровым или лучше слышащим ухом. Такое явление получило название феномена рекрутирования или выравнивания громкости. В нашей стране этот феномен известен как феномен ускоренного нарастания громкости (ФУНГ). Вся надпороговая аудиометрия прямо или косвенно выявляет данный феномен, имеющий большое дифференциально-диагностическое значение для топического определения уровня поражения кохлеарного аппарата. Существует более 30 методик обнаружения этого феномена. Общеизвестными и наиболее распространенными считают классические методы Фоулера, Люшера, sisi-тест – индекс чувствительности к короткому нарастанию звука.

Заключение. Таким образом, все исследования слухового анализатора человека можно разделить по психофизиологическому признаку на две большие группы: субъективные и объективные исследования.

К объективным исследованиям относятся те исследования, которые не зависят от психофизиологического состояния испытуемого.

Субъективные исследования зависят от психофизиологического состояния испытуемого и сводятся к оценке (по ответам испытуемого) реакции на исследуемый акустический сигнал. Субъективные исследования на сегодняшний момент имеют больший диагностический эффект, нежели объективные.

Речевое исследование слуха является одним из самых простых и распространенных исследований слухового анализатора человека. Главный недостаток речевого исследования – произносимая врачом речь нормируется в относительной шкале (шёпот, нормальная речь, громкая речь и крик), воспроизводимой на определенном расстоянии.

Исследование камертонами относительно речевого исследования обладает большим диагностическим эффектом, при помощи камертональных опытов возможно, оценить как воздушное, так и костное звукопроведение. Недостатками камертональных опытов являются определение интенсивности звука в относительных единицах (время звучание камертона), а не в единицах интенсивности звукового сигнала (децибелы), проведение камертональных опытов требует некоторой подготовки.

Аудиометрические исследования существенно отличаются от исследований камертонами и речевым исследованием тем, что звуковой сигнал воспроизводится не в относительных единицах, а в единицах измерения интенсивности звука. С

развитием аудиометрической аппаратуры стало возможно отдельно проводить исследования воздушного и костного звукопроводения, речевой аудиометрии. Главным недостатком аудиометров служит их относительно высокая цена, порядка 0,5 млн руб. за один прибор.

В процессе исследования было выявлено, что высокая рыночная цена аудиометров обусловлена прежде всего созданием аудиометра как отдельного прибора и мелкосерийным выпуском этих приборов. Исходя из этого, было предложено создать аудиометр не отдельным прибором, а как элемент системы управления мобильного вычислительного устройства.

Также было выявлено, что в камертональных опытах причиной оценки интенсивности звукового сигнала в относительных единицах служит использование аналогового приспособления (камертон). Таким образом, была предложена модифицированная методика проведения основных камертональных опытов с использованием элементов систем управления мобильных вычислительных устройств и разработан лабораторный макет для апробации предложенной методики.

Литература

1. Пальчун В.Т., Крюков А. И. Оториноларингология: Руководство для врачей. М.: Медицина 2001. С. 78–81.
2. Эдельштейн Э.А., Бондаренко Е.С., Быкова Л.И. Перинатальные гипоксические неврологические синдромы: Метод. реком. М., 1988. С. 101–103.

УДК 004.056

ОРГАНИЗАЦИОННО-ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СТРУКТУРА ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ АУТЕНТИФИКАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

М.В. Савчук, М.А. Сонов, Р.В. Мещеряков

Предложена структура обеспечения информационной безопасности в автоматизированной системе. Предложена схема, заменяющая стандартные процедуры. Предлагается функциональное наполнение для системы аутентификации.

Ключевые слова: аутентификация, информационная безопасность, автоматизированная система.

Большинство крупных систем реализуют собственную реализацию механизмов аутентификации, в том числе и с поддержкой модульной структуры. В относительно небольших программных продуктах проблема интеграции не стоит столь остро ввиду малого количества пользователей и отсутствия необходимости частой синхронизации. Однако даже в этом случае разработка является оправданной ввиду того, что обычно используется несколько информационных систем, слабо интегрированных друг с другом.

В ходе проектирования была выбрана следующая четырехкомпонентная система, представленная на рис. 1.

Модуль сопряжения (*I*) является частью клиентской программы и встраивается в процессе компиляции. Он выполняет следующие функции:

– Обеспечивает инициализацию и связь с ядром. Эта функция включает в себя поиск ядра, установление связи и прохождения процесса идентификации приложения.

– Выполняет функции обеспечения диалогового обмена между пользователем и соответствующими модулями аутентификации.

– Обеспечивает загрузку и корректное исполнение средств дополнительной обработки специальных типов данных, получаемых от пользователя.



Рис. 1. Структура разрабатываемой системы

Ядро (2) выполняет следующие функции:

– Принимает запросы от приложений на прохождении процедуры аутентификации или смены пароля.

– Загружает необходимые данные из базы данных.

– Использует полученные данные для инициализации соответствующих модулей.

– Обеспечивает интерфейсными указателями приложения и модули.

– Обеспечивает канал передачи данных между модулями и приложениями.

База данных настроек (3) представляет собой совокупность текстовых файлов или таблиц реляционных баз данных, содержащих настройки аутентификации для конкретных процессов.

Совокупность модулей (4) обеспечивает необходимый рабочий функционал системы, включающий в себя следующие возможности:

– Аутентификация и изменение пароля.

– Централизованное хранение аутентификационных данных.

– Ведение журнала времени работы пользователей.

– Вывод информационных сообщений.

– Дополнительные фильтры, позволяющие ввести дополнительные ограничения, связанные с временем регистрации, сетевых параметров, временной блокировки пользователей, связанной с проведением регламентных или профилактических работ, и т.д.

– Иные функции.

Для использования подобных механизмов необходима поддержка со стороны приложения, поскольку корректно реализовывать механизмы внедрения непосредственно в исполняемый код крайне сложно, неэффективно и потенциально опасно. Таким образом, на этапе компиляции подключается модуль, ответственный за подключение ядра системы и организацию работы с ним, также отдельно разрабатываются функции, позволяющие корректно обработать и вывести так называемые «элементы диалога аутентификации».

Под элементами диалога аутентификации или просто элементами будем понимать консольные или графические виджеты, обеспечивающие ввод и/или вы-

вод информации, полученной от пользователя. Элементы можно классифицировать по следующим типам:

- метка;
- поле ввода открытой информации;
- поле ввода пароля;
- изображение;
- специальные (элементы для ввода графического пароля, снятия биометрических характеристик и т.д.).

Предполагается, что для базовых типов, покрывающих значительное количество типов аутентификации, осуществляется полная поддержка со стороны приложения. Это справедливо в первую очередь для аутентификации, использующей пару имя пользователя и пароль. При всей простоте в реализации существует больше количество вариаций, связанных прежде всего с различными хранилищами паролей. Это и обычные текстовые файлы, и реляционные базы данных, и базы данных типа LDAP (Lightweight Directory Access Protocol), Active Directory и др.

УДК 004.045

АУТЕНТИФИКАЦИИ КАНАЛА ТЕЛЕУПРАВЛЕНИЯ МАЛЫМ СПУТНИКОМ АППАРАТНЫМИ КРИПТОГРАФИЧЕСКИМИ СРЕДСТВАМИ

О.Н. Жданов, Ф.А. Лукин, В.Х. Ханов, Т.А. Чалкин

Представлена разработанная авторами аппаратная реализация алгоритма аутентификации для управления малым спутником.

Ключевые слова: малый спутник, аутентификация, алгоритм.

Основные требования к системе аутентификации канала телеуправления космическим аппаратом (КА). При передаче сообщений по каналу телеуправления КА механизм аутентификации решает следующую задачу: предоставить способ подтверждения того, что сообщение передано с Земли на борт легитимным передающим центром. Вследствие особенностей спутникового канала связи можно выделить следующие основные требования к данной системе:

1. Устойчивость к атакам на основе перехвата сообщений (вследствие общедоступности среды передачи) на протяжении срока службы борта.
2. Высокая скорость работы на аппаратной платформе бортового комплекса управления (предполагается, что Земля способна обеспечить необходимые вычислительные ресурсы; «узкое место» возникает именно вследствие ограниченности вычислительных ресурсов КА). Процесс аутентификации не должен вызывать больших задержек в процессе передачи сообщений (длительность процедуры аутентификации не должна превышать минимальное время отклика борта).
3. Минимальное число и объем сообщений, передаваемых между Землей и бортом; в идеале должно передаваться единственное сообщение вместе с полезной информацией (в одном кадре данных).

В настоящее время аппаратные реализации симметричных криптографических систем по скорости работы значительно превосходят реализации асимметричных систем. Кроме того, в силу меньшей сложности (сравнительно с реализациями асимметричных систем) у аппаратных реализаций симметричных систем

при сравнимой криптостойкости больше вероятность безотказной работы в течение заданного времени, т.е. выше надежность. Поэтому для применения в системе «борт–Земля» предпочтительной является аппаратная реализация симметричной криптосистемы. В [3] было показано, что применение режима имитовставки ГОСТ 28147–89 обеспечивает необходимый уровень надежности проведения аутентификации.

Режим имитовставки. Алгоритм выработки имитовставки основывается на том же преобразовании в ходе раунда шифрования, что и в режиме шифрования стандарта ГОСТ 28147–89. Отличие заключается в том, что вместо 32 раундов используются только 16 и изменен порядок использования подключей раундов. В качестве имитовставки используется часть блока, полученного на выходе, обычно 32 его младших бита. При размере имитовставки в N бит считается, что вероятность успешного навязывания ложных данных равна величине 2^{-N} на одну попытку подбора. При использовании имитовставки размером 32 бита эта вероятность равна $2^{-32} \approx 0,23 \cdot 10^{-9}$.

При этом может быть использован как режим выработки имитовставки по ГОСТ 28147–89, так и любой другой блочный симметричный итерированный шифр, например AES – современный стандарт блочного шифрования США, несмотря на различия в алгоритмах ГОСТ и AES. В этом случае в поле аутентификации записывается XOR-сумма шифртекстов, полученных при шифровании разбитого на блоки передаваемого сообщения (аналогично тому, как это происходит в ГОСТ 28147–89).

Операции, используемые в ГОСТ 28147–89 и AES, эффективно реализуются на любых 32-разрядных аппаратных платформах общего назначения, поэтому требование высокой скорости работы алгоритмов на борту будет удовлетворено.

Несмотря на высокую практическую стойкость алгоритмов ГОСТ 28147–89 и AES, знание большого количества пар «открытый текст – зашифрованный текст», передаваемых по открытому каналу, может дать аналитику противника возможность делать предположения о вероятных значениях битов ключа. Для защиты от такой атаки необходима эффективная схема управления ключевой информацией.

Схема управления ключевой информацией. Для устранения угрозы компрометации системы путем криптоаналитической атаки предлагается двухуровневая схема управления ключевой информацией.

В этом случае используются 2 вида ключей: долговременные и сеансовые. Долговременные ключи генерируются из отрезков псевдослучайной последовательности бит необходимой длины на этапе разработки системы (до запуска борта) с последующим тестированием на отсутствие статистических закономерностей по известным методикам. Затем они записываются в энергонезависимую память бортового комплекса управления и сохраняются в памяти передающего центра на земле. При этом долговременные ключи должны быть недоступными третьим лицам, так как именно их использование обеспечивает криптостойкость аутентификации. Число необходимых долговременных ключей зависит от срока службы борта и частоты смены ключей. Достаточная частота смены представляется 1 раз в год. Таким образом, необходим 1 ключ на каждый год работы системы передачи сообщений между бортом и Землей.

Долговременные ключи не используются непосредственно для выработки имитовставки. Они применяются для получения гаммы шифра, отрезки которой становятся сеансовыми ключами, которые используются при вычислении значения имитовставки. В случае использования алгоритма ГОСТ 28147–89 используется алгоритм гаммирования, определенный в стандарте (с минимальным периодом, равным 2^{64} различных ключей), в случае использования шифра иностранно-

го происхождения может использоваться стандарт выработки гаммы ANSI X9.17, в котором может использоваться любой блочный шифр. Таким образом, для выработки гаммы и для вычисления имитовставки используется один и тот же модуль шифрования, что упрощает аппаратную реализацию системы аутентификации.

Сеансовый ключ вырабатывается каждый раз на Земле перед отправкой телекоманды на борт и на борту – перед выполнением процедуры аутентификации полученного кадра. Таким образом, каждый новый сеанс передачи телекоманды аутентифицируется новым ключом, что делает такую систему устойчивой к атакам на блочные шифры на основе анализа пар «открытый текст – шифрованный текст» (при условии секретности долговременных ключей).

Генерация элементов ключевой информации. Как известно, для всех современных итерированных блочных шифров, таких как ГОСТ 28147–89 и AES, ключ шифрования представляет собой последовательность бит определенной длины. Надежность шифрования определяется, в частности, качеством этой последовательности с точки зрения криптостойкости.

Ранее в [2] и [3] были получены следующие результаты:

- проведено исследование и сравнительный анализ наиболее распространенных в настоящее время подходов к формированию ключевой информации для алгоритмов блочного шифрования;

- разработана методика оценки зависимости криптостойкости шифрования по алгоритму ГОСТ 28147–89 от выбранной ключевой информации. Данная методика позволяет выбирать таблицы замен (S-блоки), обеспечивающие устойчивость к наиболее распространенным методам криптоанализа (линейный и дифференциальный криптоанализ);

- программно реализованы алгоритмы генерации и тестирования ключей.

Аппаратная реализация алгоритма аутентификации. Основываясь на полученных ранее результатах, авторы настоящей работы аппаратно реализовали алгоритм аутентификации. Реализация выполнена на базе программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС) в виде netlist'a. Разработка произведена на отладочной плате Terasic DE-0 FPGA Altera Cyclone III; Среда разработки Quartus 11 v11.0. Язык разработки VHDL. Разработка осуществлялась в контексте общей схемы взаимодействия космического аппарата (КА) с наземным комплексом управления.

Управление КА осуществляется через тракт телеуправления (рис. 2). Аутентификация производится после кадровой синхронизации до начала работы вычислителя.

После приема команды телеуправления происходит аутентификация: сверка полученного значения имитовставки с расчетным. В случае совпадения команда передается на вычислитель, в противном случае команда не выполняется. В штатном режиме вычислитель (Leon 3) обращается к ведомым устройствам через внутрикристальную шину (AMBA). Поэтому блок аутентификации выполнен в качестве ведомого slave устройства шины AMBA. Предложено использование резервного конура обработки команд телеуправления без участия вычислителя (в случае его отказа). Для этого используется жесткая привязка блока аутентификации к блоку кадровой синхронизации и резервному контроллеру. В будущем предполагается использование сетевого режима на базе шинно-сетевой архитектуры SpiceWire (рис. 3).

Основными функциональными возможностями блока аутентификации являются:

1. Управление через шину AMBA.
2. Управление через сетевой интерфейс (SpiceWire).

3. Расчет сеансового ключа из долговременного.
4. Расчет имитовставки для команды телеуправления.
5. Сравнение расчетной имитовставки с полученной.

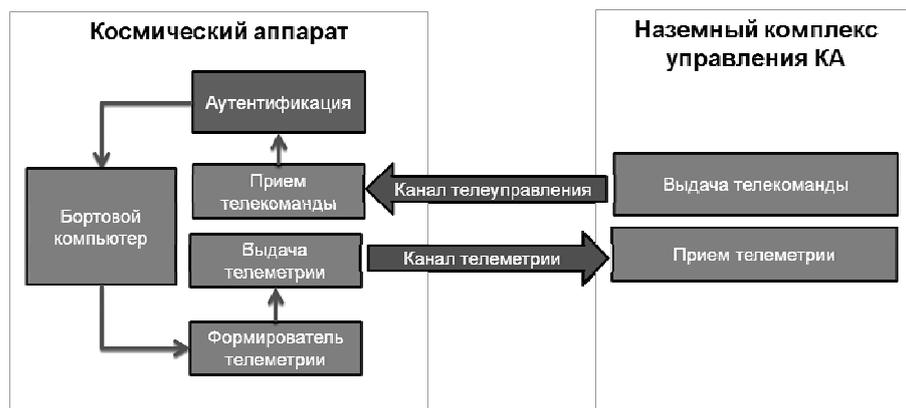


Рис. 1. Общая схема взаимодействия космического аппарата и наземного комплекса управления



Рис. 2. Структурная схема тракта телеуправления

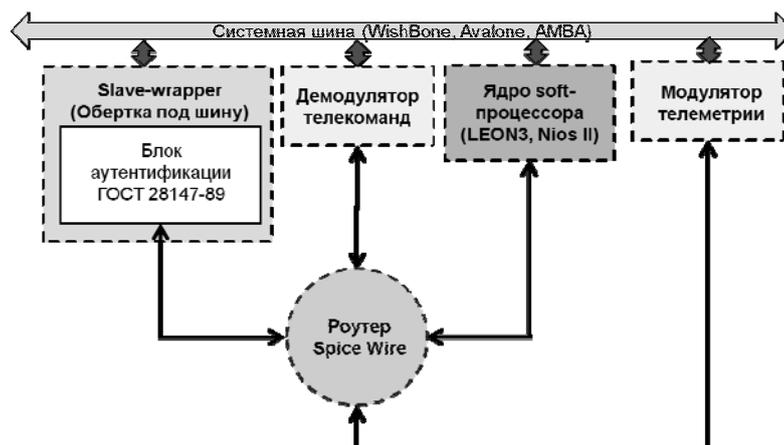


Рис. 3. Связь блока аутентификации с другими блоками

Блок аутентификации состоит из контроллера, вычислителя криптопреобразования, интерфейса внешней памяти.

Контроллер отвечает за вычисление нового сеансового ключа, запись новых значений ключа и таблиц замен в регистрах вычислителя, выполняет сверку расчетной имитовставки с полученной и в случае успешной аутентификации инициирует передачу команды вычислителю.

Как отмечалось ранее, к блоку аутентификации предъявляются повышенные требования по скорости обработки данных: вычисление имитовставки должно выполняться максимально быстро. Наибольшие затраты времени происходят при

вычисления криптопреобразования, состоящего из 16 раундов. Нами были проведены предварительные исследования по выбору оптимальной архитектуры вычислителя криптопреобразования. В таблице показано соотношение логических элементов ПЛИС (LEs) и число тактов, требуемое для выполнения расчета.

Количество эквивалентных вентилях и тактов в зависимости от типа архитектуры

Аппаратная архитектура	Примерное быстродействие, тактов	Количество эквивалентных вентилях, 1К LEs
Параллельный каскад	1	16
Итерационный автомат	16	4
Процессорная программа	> 100	6

Полученные результаты исследований позволяют сделать вывод: оптимальной для обеспечения высокой скорости работы является потоковая архитектура.

Для выбранной потоковой архитектуры нами предложена следующая структурная схема вычислителя (рис. 4).

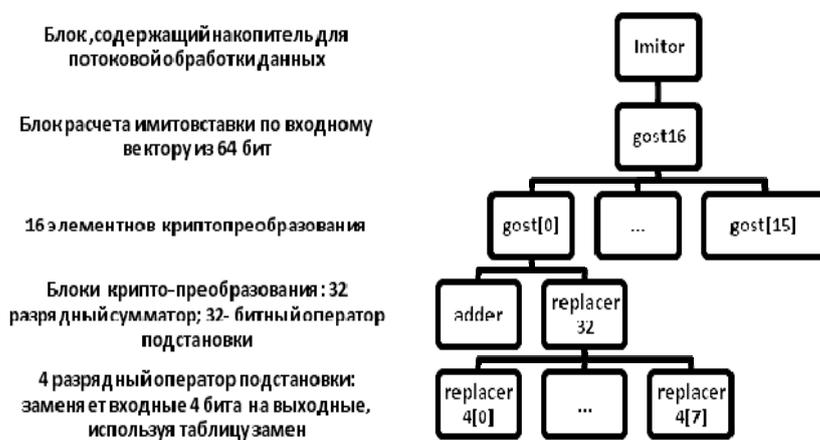


Рис. 4. Структурная схема вычислителя имитовставки

Описанная аппаратная реализация алгоритма аутентификации удовлетворяет как требованиям надежности (проведены доказательства оценок), так и требованию к скорости работы.

Работа выполнена в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 годы» ГК №П757 от 20.05.2010 и №Т1032 от 27.05.2010.

Литература

1. Шнайер Б. Прикладная криптография. Протоколы, алгоритмы, исходные тексты на языке Си. М.: ТРИУМФ, 2003. 816 с.
2. Чалкин Т.А. Разработка методики выбора параметров для алгоритма построения узлов замен блочного шифра ГОСТ 28147–89 // Актуальные проблемы безопасности информационных технологий: Матер. III Междунар. науч.-практ. конф. / Под общ. ред. О.Н. Жданова, В.В. Золотарева. Красноярск, 2009. С. 33–38.
3. Жданов О.Н., Чалкин Т.А. Аутентификация сторон при передаче сообщений по спутниковому каналу «Земля–борт» // Информационные технологии моделирования и управления. №5(64). С. 656–662.

**ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В УПРАВЛЕНИИ
И ПРИНЯТИИ РЕШЕНИЙ**

*Председатель секции – Ехлаков Юрий Поликарпович,
д.т.н., профессор, зав. каф. АОИ,
проректор по информатизации и управлению ТУСУРа*

**ВЕБ-СЕРВИС О ТЕКУЩЕЙ УСПЕВАЕМОСТИ СТУДЕНТОВ,
ОТРАЖАЮЩИЙ ИНФОРМАЦИЮ В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ**

Э.К. Ахтямов

Рассматриваются преимущества информирования в реальном времени студентов и их родителей о текущей успеваемости. Описана реализация веб-сервиса, отражающего информацию о текущей успеваемости внутри информационной инфраструктуры ТУСУРа.

Ключевые слова: информационная система, сетевые технологии, веб-сервис.

Частичная, а зачастую и вовсе полная изолированность используемых систем успеваемости в школах, средних и высших образовательных учреждениях не позволяет в должной мере реагировать на изменения в скоротечном образовательном процессе. Родителям требуется прозрачная, постоянно обновляющаяся информация об успеваемости их детей.

Повышение качества информирования руководства образовательных учреждений, преподавателей, родителей и самих учащихся окажет благоприятное влияние на успеваемость и качество получаемого образования. Внедряемые информационные системы управления и мониторинга оказывают положительное влияние на общую успеваемость учащихся в образовательных учреждениях. Однако основное предназначение существующих информационных систем – управление учебным процессом, и, как следствие, обобщение результатов.

Получение высшего образования минимизируется и сводится к получению оценки в период сессии. В свою очередь снижается оперативная информированность об успеваемости и качестве получаемого образования учащегося. Внедрение промежуточных аттестаций, так называемых контрольных точек, позволяет не только консолидировать полученные учащимся компетенции, но и оценить их уровень. Кроме того, оперативность получения информации об уровне полученных компетенций вызовет «подстегивающий» фактор в учащемся. А это уже новый виток стимулирования успеваемости.

Опыт использования информационных систем позволяет оценить человеческий фактор при вводе любых данных в 10–12% от общего их общего числа. Соответственно потребность учащегося в обратной связи возрастает колоссально. Вкупе человеческий фактор, при вводе информации, и обратная связь заставят учащегося научиться держать «руку на пульсе» – контролировать вводимые сведения о своей успеваемости, оперативно сообщать о допущенных при вводе ошибках, что в свою очередь выступит очередным «подстегивающим» фактором для «повышения успеваемости».

Информирование родителей студентов позволит по-новому взглянуть на педагогическое отношение к своему ребёнку. Доступность информации об успе-

ваемости студентов позволит старостам, кураторам студенческих групп и родителям проводить необходимые социально-педагогические мероприятия.

Динамично развивающиеся информационные технологии уже сейчас позволяют предоставлять качественно новые сервисы для информирования всех заинтересованных в непрерывном повышении успеваемости. В настоящее время многие учебные заведения широко используют информационные технологии для составления нагрузки, учета полученных учащимися оценок, но практически ни у кого не отражается ситуация по успеваемости в реальном времени.

В данной статье рассмотрены:

- преимущества информирования в реальном времени студентов и их родителей о текущей успеваемости;
- описание и реализация сервиса внутри информационной инфраструктуры, отражающего текущую успеваемость учащихся;
- требования, предъявляемые к разработке подобных сервисов.

Проблема

Родители иногородних студентов не могут узнать текущую успеваемость своих детей в режиме реального времени. Не всегда есть возможность узнать успеваемость по звонку. Студентам, чтобы узнать свою текущую успеваемость, нужно приходить и стоять в очередях в деканат.

Задача

Информировать студентов и их родителей о текущей успеваемости и успеваемости по сессии в режиме реального времени.

Цели

- Предоставить удобный и простой сервис для студентов и их родителей, отражающий актуальную информацию по успеваемости.
- Показать ТУСУР как современный инновационный вуз, активно использующий современные информационные технологии.

Решение

Реализовать веб-сервис, отражающий информацию о текущей успеваемости учащихся в режиме реального времени.

Требования

- Доступность. Сервис должен быть доступен 24 ч в сутки для пользователей из любых стран с любыми программными платформами.
- Безопасность. Необходимо, чтобы сервис имел встроенные средства обеспечения защиты от хакерских атак.
- Удовлетворение законам. Так как сервис будет обрабатывать персональные данные, то он должен полностью удовлетворять требованиям 152 Федерального закона от 27.07.2006 г. «О персональных данных».

Реализация

Веб-сервис – клиент-серверное приложение, в котором клиентом выступает браузер, а сервером – веб-сервер. Логика веб-приложения распределена между сервером и клиентом, хранение данных осуществляется преимущественно на сервере, обмен информацией происходит по сети.

Клиент – аппаратный или программный компонент вычислительной системы, посылающий запросы серверу.

Сервер – программный компонент вычислительной системы, выполняющий сервисные функции по запросу клиента, предоставляя ему доступ к определённым ресурсам или услугам.

Веб-сервер – это сервер, принимающий HTTP-запросы от клиентов, обычно веб-браузеров, и выдающий им HTTP-ответы, обычно вместе с HTML-страницей, изображением и другими данными.

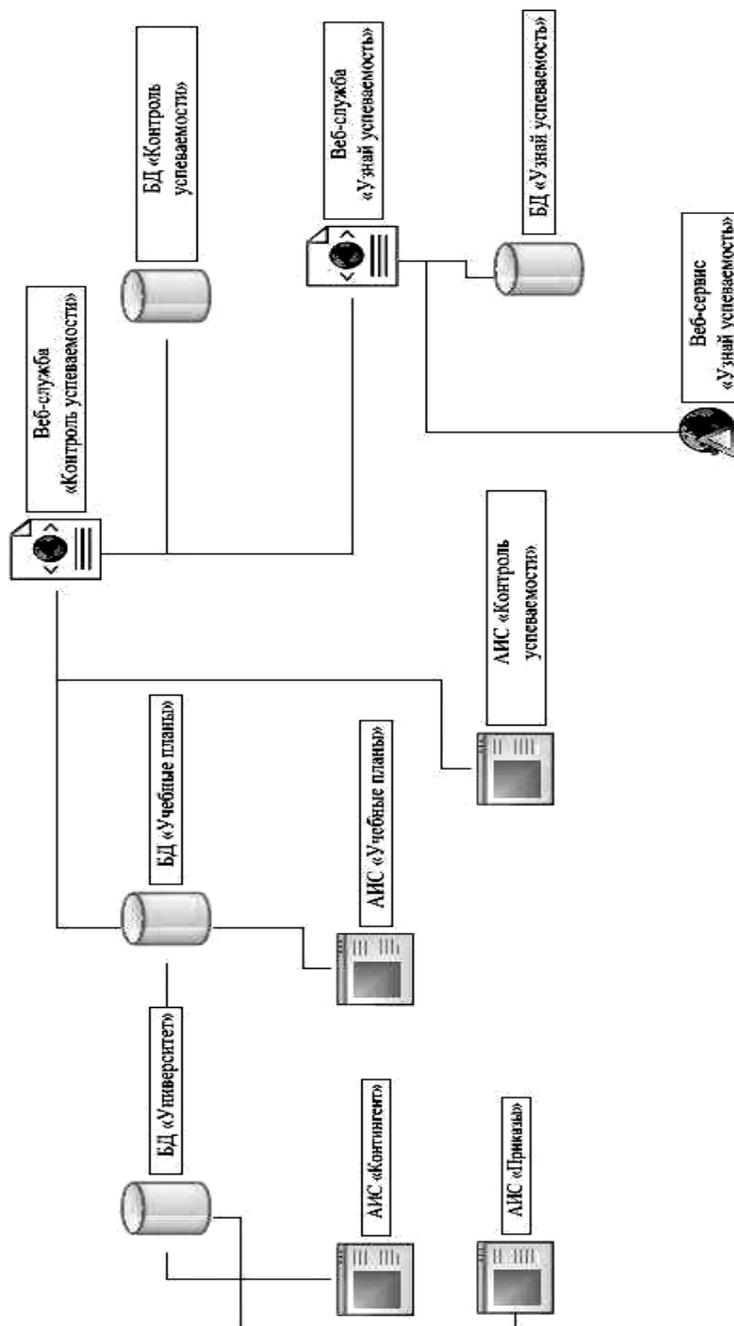


Рис. 1. Концептуальная схема взаимодействия информационных систем

Веб-браузер – программное обеспечение для просмотра веб-сайтов.

Веб-служба – программная система, чьи общедоступные интерфейсы определены на языке XML. Описание этой программной системы может быть найдено другими программными системами, которые могут взаимодействовать с ней согласно этому описанию посредством сообщений, основанных на XML и передаваемых с помощью интернет-протоколов.

Для отображения актуальной успеваемости студентов через веб-сервис необходимо иметь следующие данные:

- ФИО студента;
- номер группы;
- дисциплины в текущем семестре;
- отчётность по дисциплинам;
- циклы дисциплин;
- статус студента по приказам;
- успеваемость студента.

В информационной инфраструктуре ТУСУРа уже существуют информационные системы, хранящие и обрабатывающие необходимые для веб-сервиса данные.

В автоматизированной информационной системе (АИС) «Контингент» и АИС «Приказы» хранятся и обрабатываются персональные данные и приказы студентов ТУСУРа.

В АИС «Учебные планы» происходит назначение учебных планов обучающимся студентам, после чего экзаменационные ведомости и ведомости текущей успеваемости становятся доступны в АИС «Контроль успеваемости».

Чтобы получить информацию для веб-сервиса «Узнай успеваемость», отражающего успеваемость студентов, была создана веб-служба, которая получает информацию из веб-службы АИС «Контроль успеваемости», которая в свою очередь агрегирует данные из информационных систем «Контингент», «Приказы» и «Учебные планы».

В целях соблюдения Федерального закона №152 от 27.07.2006 «О персональных данных» у студентов бралось письменное согласие на обработку персональных данных.

Для обеспечения безопасности данных информационных систем, взаимодействующих с веб-сервисом «Узнай успеваемость», была создана отдельная база данных для этого сервиса, хранящая данные об успеваемости студентов. Таким образом, даже если удастся нанести вред данным сервиса «Узнай успеваемость», это не отразится на данных информационных систем.

Заключение

За год эксплуатации веб-сервис «Узнай успеваемость» зарекомендовал себя как у родителей, так и у студентов. За время эксплуатации сервиса:

- снизилось количество звонков родителей в деканаты;
- за счёт информирования об успеваемости в режиме реального времени родители вовремя могут проводить необходимые социально-педагогические мероприятия со своими детьми, что положительно сказывается на текущей успеваемости учащихся;
- снизилось количество ошибочно проставленных в информационных системах оценок преподавателями;
- как следствие, снизилось количество ошибок в формируемых карточках студентов и в приложениях к диплому.

Всё это ведёт к повышению успеваемости, а также является дополнительным стимулом для учащихся.

Литература

1. Ньюкомер Э. «Веб-сервисы. XML, WSDL, SOAP и UDDI. Для профессионалов. СПб.: Изд. дом «Питер». 256 с.
2. Федеральный закон РФ от 27 июля 2006 г. № 152 «О персональных данных».
3. Захарова И.Г. Информационные технологии в образовании. М.: Академия, 2010. 192 с.

УДК 004.42

**РЕАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМА ГЕНЕРАЦИИ КЛЕТОЧНЫХ АВТОМАТОВ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЯЗЫКА ПРОГРАММИРОВАНИЯ NEMERLE**

Д.В. Алимов, В.В. Соколова

Показана возможность разработки программного обеспечения с использованием гибридного языка программирования высокого уровня Nemerle на примере игры «Жизнь». Описаны правила игры. Спроектирована архитектура программы, выбран алгоритм реализации и представлен исходный код.

Ключевые слова: Nemerle, игра «Жизнь», гибридный язык программирования.

Одним из актуальных направлений в программировании является разработка универсального языка, который бы сочетал широкие функциональные возможности и простоту в использовании. Примером таких языков являются Scala и Nemerle. Scala – мультипарадигмальный язык программирования, в котором сочетаются возможности функционального и объектно-ориентированного программирования [1]. Scala может быть использован при разработке программ, однако имеет сложный синтаксис, низкую скорость компиляции из-за использования виртуальной машины Java и плохую поддержку со стороны интегрированных сред разработки [2].

По этой причине был выбран гибридный язык высокого уровня – Nemerle. Особенностью данного языка является сочетание возможностей функционального, императивного и объектно-ориентированного программирования [3]. Главная особенность языка – развитая система метапрограммирования. Он может быть использован для платформ .NET и Mono (язык компилируется в CIL и является CLS-совместимым). Базовый синтаксис языка похож на синтаксис языка C#, но использование макросов и замыканий, характерных для функциональных языков типа Lisp, кардинальным образом отличает его от C#, Java, C++. Развитая система макросов языка Nemerle позволяет не только использовать встроенные управляющие конструкции, но и создавать новые. Уникальное сочетание этих возможностей позволяет говорить о языке Nemerle как о новом этапе в развитии программирования [4].

Постановка задачи. Особенности программирования с использованием языка Nemerle были выявлены при разработке математической игры «Жизнь» (англ. Conway's Game of Life), которая представляет собой клеточный автомат, придуманный английским математиком Джоном Конвеем в 1970 г. [5].

Место действия этой игры – «вселенная» – это размеченная на клетки поверхность. Каждая клетка на этой поверхности может находиться в двух состояниях: быть «живой» или «мёртвой». Клетка имеет восемь соседей. Распределение «живых» клеток в начале игры называется «первым поколением».

Каждое следующее «поколение» рассчитывается на основе предыдущего по таким правилам: пустая («мёртвая») клетка, рядом с которой находятся только три «живые» клетки, «оживает»; если у «живой» клетки есть две или три «жи-

вые» соседки, то эта клетка продолжает «жить»; в противном случае (если соседей меньше двух или больше трёх) клетка «умирает» (от «одиночества» или от «перенаселённости»).

Игрок не принимает прямого участия в игре, а лишь расставляет начальную конфигурацию «живых» клеток, которые затем взаимодействуют по заданным правилам уже без его участия.

Эти простые ограничения приводят к огромному разнообразию форм, которые могут возникнуть в игре. Некоторые такие фигуры остаются неизменными во всех последующих «поколениях», состояние других периодически повторяется, в некоторых случаях со смещением всей фигуры [6].

Проектирование игры. Спроектируем архитектуру игры следующим образом: клетка представляет собой наименьший объект на уровне и может принимать два состояния («жива» или «мертва»). Клетки помещаются на карту уровня, которая имеет определенный размер (количество клеток по длине и по ширине) и, соответственно, может содержать на каждой ячейке одну клетку. Таким образом, игра содержит карту из клеток. Также игра позволяет перейти на следующее «поколение», поэтому необходимо предусмотреть хранение его номера.

На UML-диаграмме представлены основные классы: карта и игра (рис. 1).

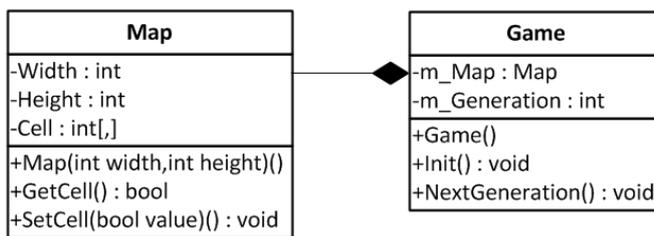


Рис. 1. UML-диаграмма классов игры

Для реализации создадим алгоритм, который последовательно просматривает все ячейки карты и для каждой ячейки подсчитывает соседей, определяя текущее состояние каждой клетки: «не изменится», «умрет» или «родится». Данный алгоритм использует два двумерных массива – один для текущего поколения, второй – для следующего.

В соответствии с вышеописанными правилами игры, если клетка с координатами (i, j) «живая» и её окружает более трёх «живых» клеток, то она «погибает». «Живая» клетка также «погибает», если в её окружении находится менее двух «живых» клеток («от одиночества»). «Мёртвая» клетка «оживает», если вокруг неё появляются три «живые» клетки [7]. На рис. 2 изображена блок-схема алгоритма.

Исходный код. На основе разработанных UML-диаграммы и алгоритма был реализован класс игровой карты (листинг кода 1), а также главный класс игры (листинг кода 2) с использованием языка программирования Nemerle.

```

Листинг 1. Реализация класса игровой карты
class Map // Класс карты (поля) уровня
{
    public Wight : int { get; set; }
    public Height : int { get; set; }
    private Cell : array[2, int]; // двумерный массив клеток
    // Конструктор класса
    public this(width: int, height: int)
  
```

```

{
this.Wight = width;
this.Height = height;
this.Cell = array(width, height); // инициализировать массив
}
// Индексатор класса
public Item[x : int, y : int] : int
{
get { Cell[x, y] }
set { Cell[x, y] = value }
}
}

```

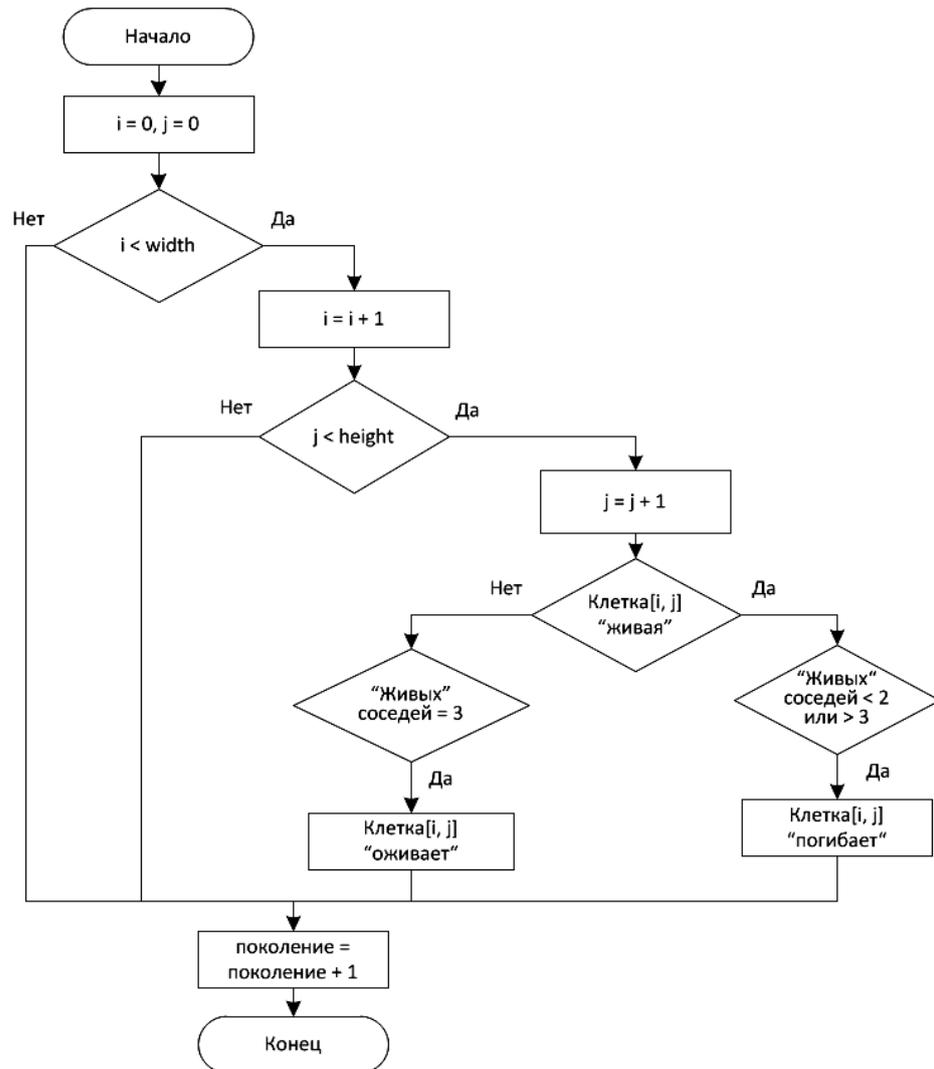


Рис. 2. Блок-схема алгоритма игры «Жизнь»

Для рисования карты клеток необходимо добавить компонент, позволяющий отображать графику, для этого воспользуемся стандартным компонентом .NET Windows Forms PictureBox.

Листинг 2. Реализация главного класса игры

```
class Game // Главный класс игры
{
private static CELL_BORDER_SIZE : int = 10;
private static CELL_SIZE : int = 8;
private mutable m_Map : Map;
private m_Graphics : Graphics;
private mutable m_Generation : int;
public Generation : int { get { m_Generation; } }
// Конструктор класса игры
public this(graphics : Graphics, width : int, height : int)
{
this.m_Graphics = graphics;
this.m_Map = Map(width, height);
this.m_Generation = 0;
FillMapRandomly();// заполнить поле клетками
}
// Перейти на новое «поколение»
public Next() : void
{
m_Graphics.Clear(Color.White); // очистить область вывода графики
def newMap = Map(m_Map.Width, m_Map.Height); // создать карту (поле)
for (mutable i = 0; i < m_Map.Width; i++)
{
for (mutable j = 0; j < m_Map.Height; j++)
{
mutable near : int = 0; // количество живых клеток соседей
near = m_Map[i - 1, j - 1] + m_Map[i, j - 1] + m_Map[i + 1, j - 1] +
m_Map[i + 1, j] + m_Map[i + 1, j + 1] + m_Map[i, j + 1] +
m_Map[i - 1, j + 1] + m_Map[i - 1, j];
newMap[i, j] = m_Map[i, j];
if (m_Map[i, j] == 1)
when (near < 2 || near > 3) newMap[i, j] = 0;
else
when (near == 3) newMap[i, j] = 1;
}
}
m_Map = newMap;
// Вывести графику
def brush = SolidBrush(Color.Black);
for (mutable i = 0; i < m_Map.Width; i++)
{
for (mutable j = 0; j < m_Map.Height; j++)
{
when (m_Map[i, j] == 1) m_Graphics.FillEllipse(brush,
i * CELL_BORDER_SIZE + 1, j * CELL_BORDER_SIZE + 1, CELL_SIZE, CELL_SIZE);
}
}
m_Generation++; // следующее «поколение»
}
// Заполнить карту произвольным образом
public FillMapRandomly() : void
{
m_Generation = 0;
m_Graphics.Clear(Color.White); // очистить область вывода графики
def randomSeed = unchecked(DateTime.Now.Ticks :> int); // привести тип long к int
def rnd = Random(randomSeed);
```

```

for (mutable i = 0; i < m_Map.Wight; i++)
{
for (mutable j = 0; j < m_Map.Height; j++)
{
m_Map[i, j] = 0;
// Регион, в котором будут созданы «живые» клетки
when ((i > 20 && i < 40) && (j > 15 && j < 25))
{
when (rnd.Next(0, 999) > 800) m_Map[i, j] = 1;
}
}
}
// Вывести графику
def brush = SolidBrush(Color.Black);
for (mutable i = 0; i < m_Map.Wight; i++)
{
for (mutable j = 0; j < m_Map.Height; j++)
{
when (m_Map[i, j] == 1) m_Graphics.FillEllipse(brush,
i * CELL_BORDER_SIZE + 1, j * CELL_BORDER_SIZE + 1, CELL_SIZE, CELL_SIZE);
}
}
}
}

```

Для отображения результатов игры был разработан простой оконный интерфейс, содержащий форму и две кнопки, позволяющие перейти к следующей итерации или задать первоначальные значения. Результат генерации 70 «поколения» игры показан на рис. 3.



Рис. 3. Результат игры «Жизнь» для 70-го «поколения»

Генерируя «поколения», можно добиться того, чтобы на поле, в итоге, остались только устойчивые и периодические фигуры (рис. 4).

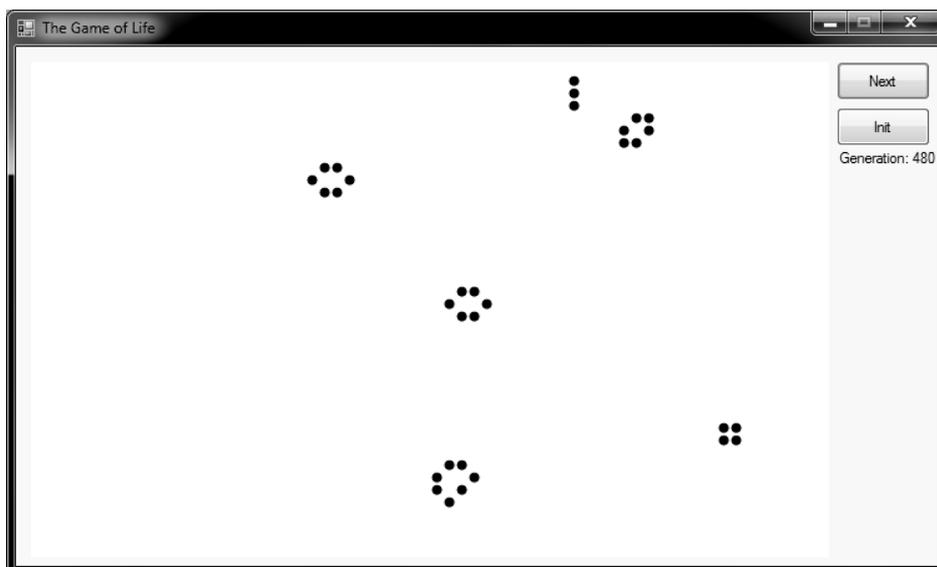


Рис. 4. Результат игры «Жизнь» для 480-го «поколения»

Заключение. При разработке игры «Жизнь», имитирующей процесс генерации «поколений», был использован язык Nemerle. Интуитивно понятный синтаксис языка позволил реализовать семантические конструкции наглядным и простым способом. Таким образом, можно сделать вывод об эффективности применения этого языка при разработке программного обеспечения для платформ .NET и Mono.

Литература

1. Scala (язык программирования) – Википедия: свободная электронная энциклопедия на русском языке [Электронный ресурс]. Режим доступа [http://ru.wikipedia.org/wiki/Scala_\(язык_программирования\)](http://ru.wikipedia.org/wiki/Scala_(язык_программирования)), свободный (дата обращения: 03.09.2011).
2. Да, Вирджиния, Scala сложна! [Электронный ресурс]. Режим доступа <http://habrahabr.ru/blogs/scala/127727/>, свободный (дата обращения: 06.09.2011).
3. Nemerle – Википедия: свободная электронная энциклопедия на русском языке [Электронный ресурс]. Режим доступа <http://ru.wikipedia.org/wiki/Nemerle>, свободный (дата обращения: 03.09.2011).
4. Туленцев С.А., Чистяков В.Ю. Nemerle // RSDN Magazine. 2006. № 1.
5. Жизнь (игра) – Википедия: свободная электронная энциклопедия на русском языке [Электронный ресурс]. Режим доступа [http://ru.wikipedia.org/wiki/Жизнь_\(игра\)](http://ru.wikipedia.org/wiki/Жизнь_(игра)), свободный (дата обращения: 03.09.2011).
6. Гарднер М. Крестики-нолики. М.: Мир, 1988. С. 287–343.
7. Проблемы предметной области. Информатика. Имитационные модели [Электронный ресурс]. Режим доступа http://www.orenipk.ru/kp/distant_vk/docs/2_1_1/inf/inf_im_mod.html, свободный (дата обращения: 06.09.2011).

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕНЕРАТОРА ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ЗАДАНИЙ ПРИ
РАЗРАБОТКЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ОБУЧАЮЩЕЙ СИСТЕМЫ
«ЛИНЕЙНОЕ ПРОГРАММИРОВАНИЕ»***Н.Ю. Хабибулина, Е.И. Афанасьева*

Рассматривается автоматизированная система генерации и проверки индивидуальных заданий по теме «Линейное программирование» и ее использование при разработке обучающей системы. В основе работы системы лежит алгоритм генерации задания по шаблону. Применение системы позволит решить задачу индивидуализации подхода в обучении.

Ключевые слова: компетентностный подход, индивидуализация обучения, автоматизация процесса обучения, генерация заданий, тренажер, линейное программирование, тестирование.

Система высшего образования в России претерпевает в настоящее время значительные перемены, связанные, в частности, с переходом на двухуровневую систему образования. В качестве ведущего пути модернизации современного российского образования выступает компетентностный подход, реализация которого требует [1]:

- пересмотра возможностей каждого студента, развития у студентов личностных качеств – умения ориентироваться в нестандартных ситуациях, ибо все они могут стать компетентными, сделав свой выбор в широчайшем спектре занятий;
- переформулировки целей образования: на первый план выходит задача развития личности с помощью индивидуального подхода в обучении;
- изменения методов обучения, которые должны содействовать выявлению и формированию компетентности студентов;
- применения новых форм и процедур оценивания учащихся.

Развитие компетентностей студента наиболее успешно происходит в результате индивидуализации процесса обучения при увеличении объема самостоятельной работы студента. В этой связи огромное значение принимает процесс создания и выдачи индивидуальных заданий. Однако слабое развитие технологий автоматизированной генерации заданий существенно усложняет данный процесс, т.к. в сравнительно короткий период времени на фиксированный набор заданий формируется банк их решений. Появляются фирмы и Web-ресурсы, которые аккумулируют подобного рода информацию и предоставляют соответствующие услуги.

Одним из возможных решений является создание нового класса программных систем – генераторов заданий. Генераторы, с одной стороны, решают проблемы защиты от взлома, т.к. не имеют заранее заготовленных ответов, программа генерирует правильный ответ в процессе опроса, с другой стороны, практически каждый студент получает индивидуальное задание.

Структура обучающей системы. В данной работе представлена система, позволяющая автоматически генерировать, проверять индивидуальные задания, проводить контрольные и тестирующие работы по теме «Линейное программирование». Структура системы представлена на рис. 1.

Система представляет собой три приложения:

- 1) приложение для студентов: тренажер по алгоритмам решения задачи линейного программирования с помощью симплекс-метода, решение двойственной

задачи и анализ линейной модели на чувствительность; генератор заданий на индивидуальную контрольную работу;

2) приложение для преподавателя: в нем реализован еще и блок «Проверка решения»;

3) приложение «Экзамен»: автоматизированная система генерации заданий экзамена, проверки введенных решений и сохранения результатов.

Модуль «Тренажер» предназначен для закрепления на практике полученных теоретических знаний студентом и подготовки к контрольной работе либо экзамену. При этом студент получает возможность потренироваться на большом количестве вариантов, повторить изучаемую тему «Линейное программирование» целиком либо одну из ее частей. При работе с тренажером студент сразу получает информацию о правильности полученных на каждом шаге результатов. Методический учебный материал по теме контрольной работы оформлен в формате Windows-справки (модуль «Help» системы).

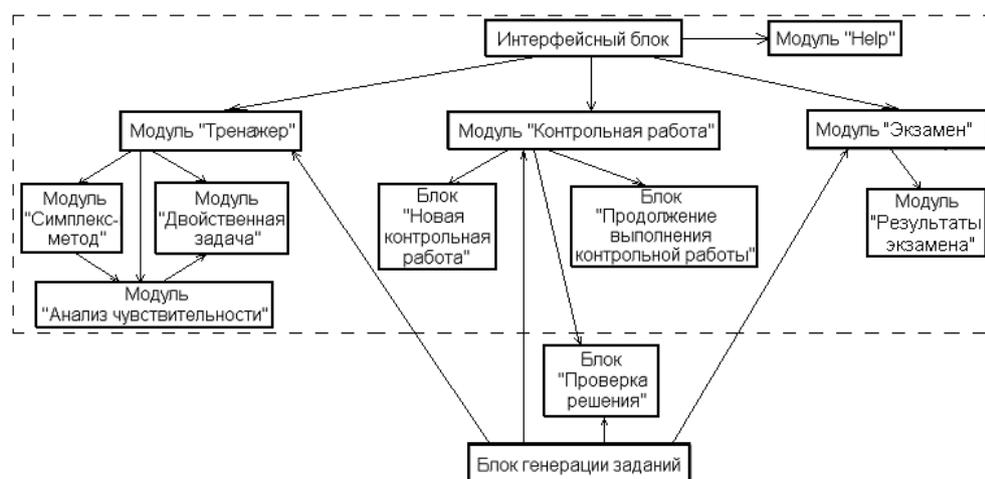


Рис. 1. Структура системы

Одной из основных задач системы является формирование индивидуального задания на контрольную работу каждому студенту без участия преподавателя. Модуль «Контрольная работа» позволяет студенту начать выполнение новой контрольной работы, при этом новое полученное задание сохраняется в отдельный файл. В файл дополнительно сохраняются данные, запрашиваемые от студента перед выдачей задания. К файлу прикрепляется файл результатов решения. Студент имеет возможность прервать программу и, спустя какой-либо промежуток времени, вернуться к вводу результатов, выбрав в программе файл, в который ранее было сохранено задание.

Преподаватель имеет возможность проверить полученное студентом решение с помощью модуля «Проверка». Этот модуль доступен только в приложении преподавателя. Модуль предоставляет полную информацию о задании, результаты, введенные студентом и полученные системой. Несовпадения, обнаруженные в результате проверки контрольной работы, выдаются системой преподавателю с целью возможности отсеять ошибки, связанные с нарушениями формата ввода или опечатками.

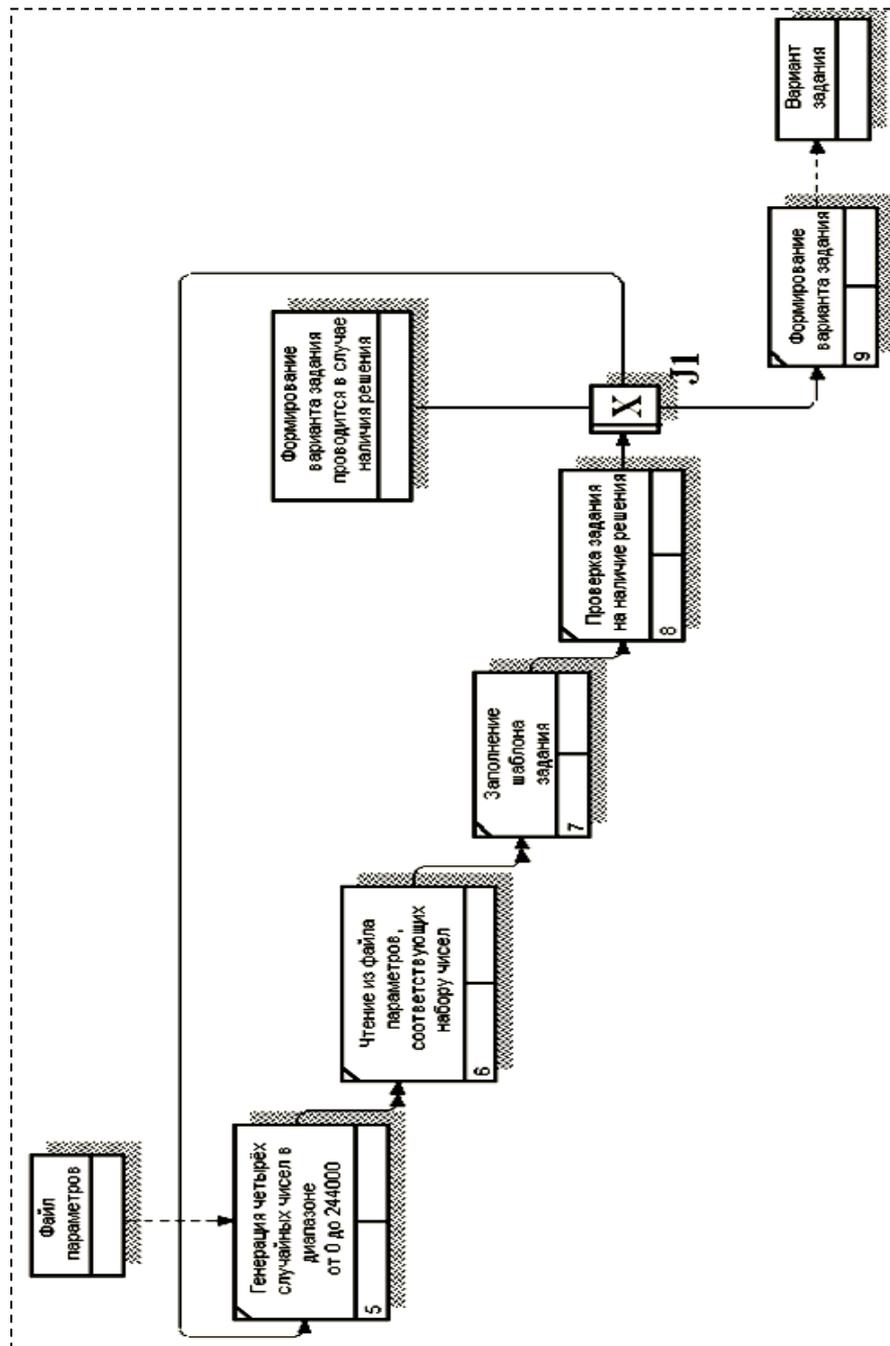


Рис. 2. Генерация задания

Модуль «Экзамен» предназначен для автоматизированной оценки знаний студентов. Для проведения экзамена используются задания, аналогичные заданиям контрольной работы, только более мелкие по объему. Преподаватель имеет возможность либо выбрать для контроля определенные разделы изучаемой темы, либо выбрать режим случайной выборки заданий из всей темы. Итоговое оцени-

вание проводится через определение уровня знаний студента по каждому разделу рассматриваемой темы путем формирования интегрированной балльной оценки. В качестве методологической основы процесса получения интегрированной оценки предлагается принять метод сведения многокритериальной задачи оценивания к однокритериальной путем аддитивной свертки частных критериев с весовыми коэффициентами. В соответствии с данной методикой оценка определяется по формуле (1):

$$x = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n v_{ij} \times x_{ij}, \quad (1)$$

где x – итоговая оценка; n – количество уровней сложности; m – количество разделов; v_{ij} – «вес» вопроса (i -й раздел, j -я сложность); x_{ij} – истинность ответа ($x_{ij} = 0; 1$, где 1 – ответ верен, 0 – ответ неверен).

В настоящий момент в системе предусмотрено не более 5 уровней сложности вопросов. Уровень вопроса определяется при вводе вопроса и не зависит от типа вопроса. Количество уровней сложности задается преподавателем. Выполнение экзамена начинается с самых легких вопросов раздела и заканчивается самыми трудными. Проверка правильности ответа на вопрос осуществляется в процессе перехода к следующему вопросу. Если студент на определенном уровне сложности в текущем разделе отвечает неправильно, то он лишается возможности отвечать на вопросы более высокого уровня данного раздела и переходит к следующему разделу. При переходе на более высокий уровень вопроса в текущем разделе студенту продлевается время проведения экзамена на величину, заданную в параметрах экзамена.

Генератор индивидуальных заданий. В основе работы системы лежит алгоритм генерации задания по шаблону [2, 3]. Разработана структура из более чем 240 тысяч элементов, позволяющая с помощью генератора по шаблону автоматически формировать огромное количество разных вариантов задания. Функциональная диаграмма процесса генерации задания приведена на рис. 2.

Основные экранные формы разработанной системы представлены на рис. 3–4.

Тренажер - Диалог чувствительности

Результат заключительной итерации

	x0	x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7	x8	x9	b
Строка(0)	1	85/9	13/9	89/6	0	0	52/9	11/18	0	13/9	23
Строка(1)	0	8/9	8/9	2/3	0	1	14/9	2/9	0	-1/9	2
Строка(2)	0	8/9	35/9	-19/3	0	0	59/9	2/9	1	-10/9	1
Строка(3)	0	4/3	1/3	3/2	1	0	-2/3	-1/6	0	1/3	1

Отметьте небазисные переменные
Исходный базис: x0 x1 x2 x3 x4 x5 x6 x7 x8 x9

ВЕРНО!!!!

Введите пределы для отмеченных небазисных переменных
Если число целое запишите без изменения, например 0 или 7
Если число дробное, то в виде обыкновенной дроби, значение необходимо сократить
верная запись -11/3, неверная запись -33/6

x1 Верно!! x3 Верно!!
 x2 Верно!! x6 Верно!!

Определите в каких пределах могут меняться коэффициенты при базисных переменных:

Верно: ≤ a4 ≤ Верно: ≤ a5 ≤

Найдите пределы, в которых могут меняться константы в правых частях, не нарушая оптимальности прежнего решения

Изменение правой константы в уравнении 1: ≤ b1 ≤ Изменение правой константы в уравнении 2: ≤ b2 ≤

Изменение правой константы в уравнении 3: ≤ b3 ≤

Верно

Решение найдено!!! Перейти к двойственно задаче?

Рис. 3. Экранная форма выполнения анализа чувствительности в модуле «Тренажер»

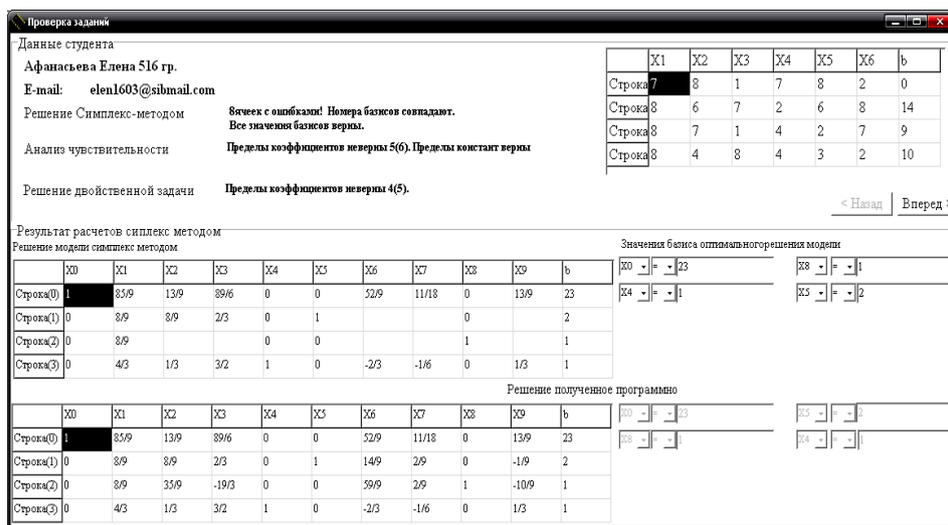


Рис. 4. Экранная форма проверки контрольных работ

Заключение. Приведено описание автоматизированной системы генерации и проверки индивидуальных заданий и ее использования при разработке электронной обучающей системы. В основе работы системы лежит алгоритм генерации задания по шаблону. Применение системы позволит повысить качество подготовки специалистов за счет индивидуализации подхода в обучении.

Литература

1. Радионова Н.Ф., Катунюва М.Р. Оценка эффективности реализации программ дополнительного образования: компетентностный подход // Методические рекомендации. СПб.: ГОУ «СПб ГДТЮ», 2005. 65 с.
2. Кручинин В.В. Генераторы в компьютерных учебных программах. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2003. 200 с.
3. Создание тестов и компьютерное тестирование // Сайт журнала «Компьютер-Пресс». URL: <http://www.compress.ru/article.aspx> (дата обращения: 16.07.2011).

УДК 004.928

РАЗРАБОТКА ЛАБОРАТОРНОГО АВТОМАТИЗИРОВАННОГО РАБОЧЕГО МЕСТА ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ КРОСС-КАНАЛА МЕЖДУ ЛАРМ И СМ МАРС

С.С. Харьков, В.М. Дмитриев

Рассмотрен механизм взаимодействия СМ МАРС и ЛАРМ посредством реально-виртуального кросс-канала. Описаны принципы разработки ЛАРМ 3А.
Ключевые слова: ЛАРМ, МАРС, кросс-канал, моделирование.

В настоящее время на кафедре теоретических основ электротехники проводится работа по созданию новой версии лабораторного автоматизированного рабочего места (ЛАРМ) и разработке кросс-канала, объединяющего ранее разработанную на кафедре среду моделирования МАРС (СМ МАРС) и ЛАРМ.

ЛАРМ представляет собой универсальный аппаратно-программный комплекс, предназначенный для исследования и генерации электрических сигналов. Комплекс работает в режиме дистанционного управления через интерфейсы USB компьютера и платы сбора данных.

Области его возможного использования – учебные лаборатории, автоматизация научных исследований и измерения в физике, электротехнике, САУ и медицине; настройка электронных схем, различные производственные сферы.

В настоящий момент визуализация измеряемых ЛАРМом сигналов производится посредством среды LabVIEW фирмы National Instruments. Однако недостаток системы LabVIEW заключается в том, что она может визуализировать процессы, но не может моделировать их. Существует несколько популярных систем моделирования, однако по причинам более простого сопряжения для построения реально-виртуального канала связи выбрана система моделирования MАРС [1]. Для решения задач по моделированию виртуальных приборов и визуализации реальных процессов ведётся разработка реально-виртуального канала.

Среда моделирования MАРС представляет собой программный продукт для моделирования и анализа сложных устройств и систем различной физической природы. Она позволяет частично или полностью заменить физический эксперимент вычислительным, исследовать и оптимизировать характеристики создаваемых устройств или подсистем в поисках наилучшего варианта.

В основе работы среды моделирования MАРС лежит представление исследуемого объекта в виде компонентной цепи. Сложные технические устройства (электронные, электромеханические и т.д.) представляются набором компонентов, связанных между собой согласно принципиальной, кинематической, структурной схеме или другой формальной структуре. Таким образом, исследуемый объект перед началом моделирования должен быть представлен в виде компонентной цепи, состоящей из типовых компонентов, входящих в библиотеку моделей.

В СМ MАРС реализованы большие возможности по моделированию сложных устройств и систем, разработан редактор виртуальных инструментов и приборов (РВИП), позволяющий использовать реализованные в нем приборы и автоматизированные средства обработки результатов моделирования для исследования компьютерных моделей исследуемых объектов.

Разрабатываемый кросс-канал позволит объединить СМ MАРС и аппаратно-программный комплекс ЛАРМ и использовать разработанные в СМ MАРС виртуальные измерительные приборы и средства обработки результатов для исследования реальных технических объектов, подключаемых к ЛАРМу.

Моделирование объектов в СМ MАРС производится следующим образом. После выбора объекта для моделирования с помощью редактора виртуальных инструментов и приборов или путём описания на языке С++ создаётся модель выбранного объекта. Модель анализируется встроенными средствами СМ MАРС и после прохождения блоков обработки начинает функционировать.

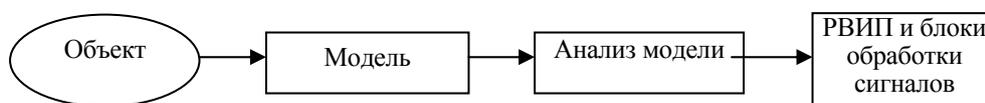


Рис. 1. Схема моделирования объектов в СМ MАРС

В рамках данной работы новая версия ЛАРМ получила рабочее название ЛАРМ 3А.

На сегодняшний момент при работе с ЛАРМ все функции обработки берёт на себя само устройство. Для этого разработана сложная структура ЛАРМ, основанная на мощном и дорогостоящем оборудовании. Это влечёт за собой установление соответствующей стоимости устройства, сложности изготовления и прочие негативные факторы. Но поскольку ЛАРМ работает в связке с ПК, все функции вычислений и обработки данных может взять на себя компьютер. На этом основывается концепция ЛАРМ 3А.

Отличие ЛАРМ 3А от ЛАРМ 3 состоит в следующем. В случае использования ЛАРМ 3 всю работу принимает на себя само устройство, а ПК используется для вывода данных. В случае ЛАРМ 3А устройство будет использоваться как плата сбора данных, а вся обработка данных будет производиться на ПК. Это позволит упростить ЛАРМ, в связи с чем повысится надёжность, а его стоимость снизится. Задача разработки кросс-канала упростится за счёт создания специализированных протоколов передачи и обработки данных.

На начальном этапе разработки в качестве основы для ЛАРМ 3А используется плата ArduinoMega 2560. Платы расширения, разрабатываемые для подключения к ArduinoMega, позволят продублировать функции ЛАРМ 3.

Синхронизация ЛАРМ 3А с ПК производится посредством бесплатно распространяемой оснастки RuntimeEngine от NationalInstruments либо при помощи специальных протоколов.

Кросс-канал реализуется следующим образом. Работа ЛАРМ в системе Windows обеспечивается специальным драйвером. СМ МАРС распознаёт ЛАРМ как компонент. Моделируемый объект собирается при помощи ЛАРМ и обрабатывается СМ МАРС. После этого работа с реальным объектом становится возможна в виртуальной среде системы моделирования.



Рис. 2. Схема реализации кросс-канала

Заключение. В данной работе решается актуальная задача соединения средств компьютерного моделирования технических объектов и измерения реальных сигналов. Для этого в рамках универсальной среды моделирования МАРС разрабатывается компонент «Контроллер ЛАРМ», а в рамках инженерной работы идёт разработка электронного ЛАРМ 3А. Такой компонент позволит применять виртуальные измерительные приборы и генераторы РВИП, разработанные для визуализации результатов моделирования, к исследованию реальных сигналов.

Литература

1. Дмитриев В.М. Среда моделирования МАРС / В.М. Дмитриев, А.В. Шутенков, Т.Н. Зайченко и др. Томск: В-Спектр, 2007. 297 с.
2. Дмитриев В.М. Автоматизированные лабораторные комплексы в учебном процессе / В.М. Дмитриев, А.Н. Кураколов, Ю.И. Мальцев, Т.Ю. Коротина. Томск: В-Спектр, 2007. 182 с.

**РЕАЛИЗАЦИЯ МОДЕЛЬНОЙ ИЛЛЮСТРАЦИИ ЗАКОНА ОМА
В РМС МАРС***Я.А. Волжанская, В.М. Дмитриев*

Рассматривается методика формирования модельных иллюстраций (МОДИЛ) для интерактивного учебника по курсу ТОЭ на примере иллюстрации закона Ома в расчетно-моделирующей среде МАРС. Сформулированы назначение, задачи и алгоритм работы по подготовке и составлению МОДИЛ для интерактивных учебников по другим техническим дисциплинам, а также приведен пример ее практического использования.

Ключевые слова: моделирование, модельная иллюстрация, МОДИЛ, интерактивный учебник, среда моделирования МАРС.

В настоящее время в процесс обучения техническим дисциплинам внедряется множество программных средств, предназначенных для автоматизации различных форм обучения. Широкое распространение получили разнообразные компьютерные задачки и виртуальные лаборатории, реализованные на основе средств автоматизации математических вычислений и систем компьютерного моделирования. Недостатком этих систем для реализации интерактивных учебников по дисциплине «Теоретические основы электротехники» (ТОЭ), является невозможность интерактивно получать, преобразовывать, обрабатывать и визуализировать разнообразные математические и графические модели, более глубоко раскрывающие материал дисциплины.

Интерактивный учебник представляет собой электронный гипертекстовый учебник с интерактивными приложениями (ИП) в виде модельных иллюстраций (МОДИЛ), подкрепленных методами и алгоритмами компьютерного моделирования электрических цепей, позволяющими с помощью компьютерных экспериментов анализировать и визуализировать структурные и динамические свойства электрических цепей. Интерфейс МОДИЛ с помощью компьютерных расчетов и моделирования, реализуемых расчетно-моделирующей средой (РМС), позволяет наглядно продемонстрировать физические процессы и методики решения задач в качестве иллюстраций к теоретическому материалу [5].

Актуальность работы обусловлена необходимостью внедрения в учебный процесс высших и средних специальных учебных заведений современных компьютеризированных средств обучения, повышающих уровень подготовки технических специалистов, необходимостью развития автоматизированных численных и аналитических методов анализа и синтеза электрических цепей.

Для придания интерактивности МОДИЛ связана с РМС МАРС (рис. 1), которая состоит из блока графоаналитических преобразований, универсального вычислительного ядра, системы визуализации и обработки результатов, многослойного входного редактора, сопряженного с библиотекой моделей компонентов и системой автоматизации вычислений [6].

МОДИЛ полностью реализуется в РМС МАРС, методической основой которой является метод компонентных цепей (МКЦ), позволяющий моделировать любые физические объекты. МКЦ позволяет представить в виде компонентной цепи физически неоднородный технический объект для его моделирования в статическом или динамическом (во временной или частотной области) режимах [1]. Его основными понятиями являются понятие компонента и компонентной цепи (КЦ). КЦ представляется в виде трех множеств:

$$C = (K, B, N),$$

где K – множество компонентов; B – множество связей всех компонентов; N – множество узлов.

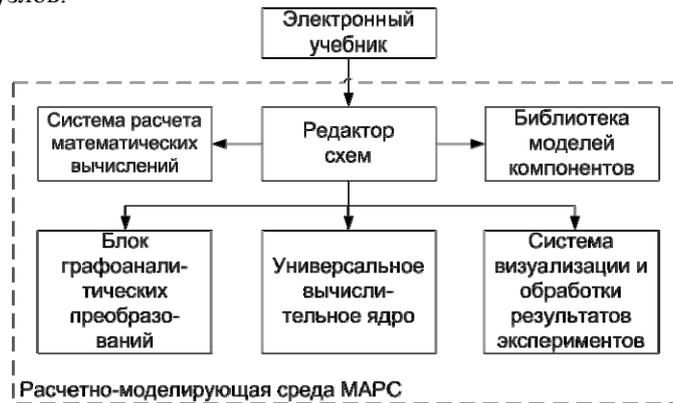


Рис. 1. Обобщенная структура РМС MARC

Рассмотрим подробнее на примере закона Ома в дифференциальной форме построение типового МОДИЛа.

Сопrotивление проводника зависит как от материала, по которому течёт ток, так и от геометрических размеров проводника. Таким образом, закон Ома в так называемой дифференциальной форме, в которой показана зависимость от геометрических размеров проводника, представлена формулой (1):

$$R = \frac{\rho \times L}{S}, \quad (1)$$

где ρ – удельная плотность материала; L – длина проводника; S – площадь поперечного сечения проводника.

В классической форме закон Ома определяет связь между напряжением, силой тока и сопротивлением проводника в электрической цепи и описывается формулой

$$I = \frac{U}{R}, \quad (2)$$

где I – сила тока; U – напряжение; R – сопротивление.

Для наиболее наглядной иллюстрации закона Ома в МОДИЛ необходимо показать влияние всех параметров сопротивления на изменение силы тока и напряжения в цепи. Для этого воспользуемся схемой в СМ MARC (рис. 2), на которой p , L и S -атрибуты, задающиеся при помощи движкового регулятора, IMP – интерактивная математическая панель, R – резистор с атрибутивной связью, E_1 – источник постоянного напряжения, а также амперметр и вольтметр для доказательства корректности эксперимента.

Перемещая движки на регуляторах в визуальном слое СМ MARC (рис. 3), меняем параметры атрибутов сопротивления, которые, входя в интерактивную панель, включают расчет математического выражения. Полученное значение в виде атрибута передается на резистор схемы, где измеряются сила тока и напряжение.

Для примера, пусть необходимо продемонстрировать электрические характеристики медного проводника длиной 5 см и поперечным сечением $0,5 \text{ см}^2$, тогда параметризуем данную модельную иллюстрацию следующим образом: $\rho = 0,0175 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$; $L = 0,05 \text{ м}$; $S = 0,005 \text{ м}^2$.

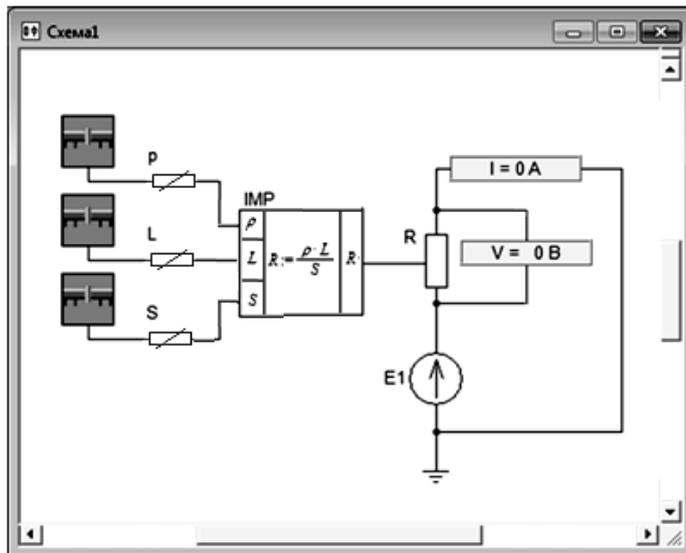


Рис. 2. Компонентная схема в РМС МАРС для реализации модельной иллюстрации закона Ома

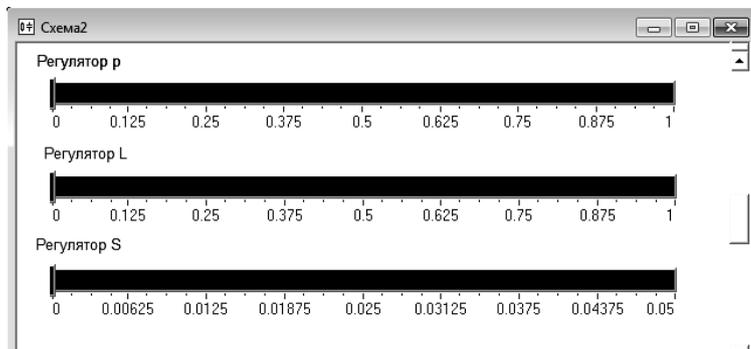


Рис. 3. Регуляторы для изменения параметров сопротивления в визуальном слое РМС МАРС

Для этого перемещаем движковые регуляторы на визуальном слое РМС МАРС в соответствующие положения (рис. 4).

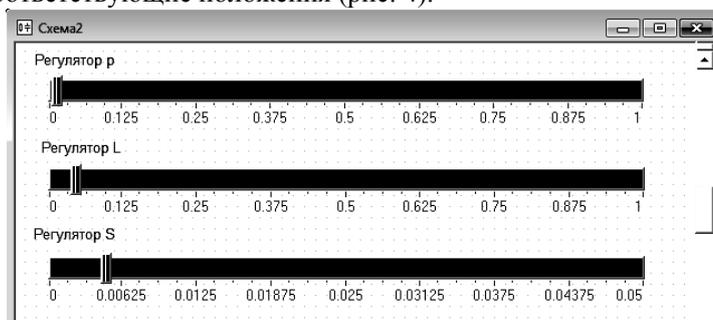


Рис. 4. Перемещение движковых регуляторов

На схемном слое РМС МАРС в это время на измерителях показаны значения тока и напряжения при заданных параметрах сопротивления (рис. 5).

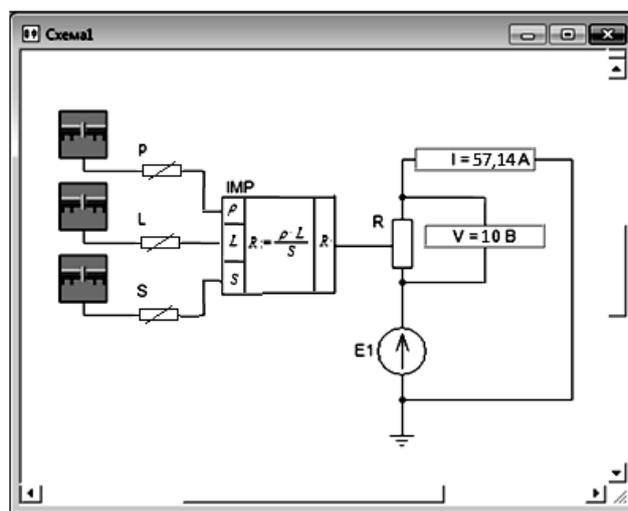


Рис. 5. Результаты моделирования

Студенты из показаний приборов наглядно убеждаются в справедливости формул (1) и (2) для разных значений параметров сопротивления.

Таким образом, МОДИЛ, например, иллюстрирующий закон Ома, позволяет добиться более глубокого понимания процессов, происходящих в электрических цепях, разнообразить проведение лекционных занятий и проявления заинтересованности студентов младших курсов в изучении технических дисциплин. Также реализованы модельные иллюстрации и для других основных законов и принципов курса ТОЭ, а также методов анализа простейших электрических цепей. В будущем планируется реализовать подобные иллюстрации для интерактивных учебников по различным техническим дисциплинам, таким как «Основы теории цепей», «Теория автоматического управления» и другим.

Литература

1. Дмитриев В.М. Среда моделирования MAPC / В.М. Дмитриев, А.В. Шутенков, Т.Н. Зайченко и др. Томск: В-Спектр, 2009. 299 с.
2. Дмитриев В.М. Автоматизация моделирования промышленных роботов // В.М. Дмитриев, Л.А. Арайс, А.В. Шутенков. М.: Машиностроение, 1995. 304 с.
3. Дмитриев В.М., Шутенков А.В., Ганджа Т.В. Архитектура универсального вычислительного ядра для реализации виртуальных лабораторий // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2004. № 2. С. 24–28.
4. Ерошкин М.А. Язык представления математических выражений для реализации редактора Макрокалькулятора / М.А. Ерошкин, Т.В. Ганджа // Компьютерные технологии в образовании / Под ред. В.М. Дмитриева. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2004. Вып. 2. С. 23–28.
5. Волжанская Я.А. Интерактивный учебник на базе расчетно-моделирующей среды / Я.А. Волжанская // Современное образование: технические университеты в модернизации экономики России: Матер. междунар. науч.-метод. конф., 27–28 января 2011 г., Россия, Томск. Томск: Том. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2011. С. 47–48.
6. Дмитриев В.М., Ганджа Т.В., Волжанская Я.А. Структура и задачи интерактивного учебника по курсу «Теоретические основы электротехники» // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2010. №2 (22), ч. 2. С. 281–284.

**СИСТЕМА ИНФОРМИРОВАНИЯ ПассаЖИРОВ ОБЩЕСТВЕННОГО
ТРАНСПОРТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ RFID
И GPS/ГЛОНАСС**

С.В. Чубов, С.В. Маморцев

Представлена проблема информирования пассажиров общественного транспорта. Кратко изложен вариант построения системы информирования пассажиров общественного транспорта на основе радиочастотных приемопередатчиков и системы спутникового позиционирования.

Ключевые слова: ГЛОНАСС, радиочастотная идентификация, система информирования пассажиров, *GPS, GSM, RFID*.

Большинству людей, не имеющих личного транспорта, хорошо известны особенности работы общественного транспорта. Нередко приходится в непогоду терять драгоценное время в длительном ожидании нужного маршрута, а иногда, будучи не уверенным в правильности решения, садиться на другой транспорт, менее удобный, с пересадками. Предлагаемая система направлена на повышение качества жизни населения и содержит следующие основные функции: фиксирование перемещения городского пассажирского транспорта и информирование его потенциальных пассажиров о прибытии на остановку.

На сегодняшний момент популярны дорогостоящие системы слежения на основе спутниковой навигации (ГЛОНАСС, *GPS, GALILEO*). В подавляющем большинстве транспортные предприятия (ТТУ, ПАТПы) используют такие системы для получения данных, приоритетно используемых для задач организации движения и контроля трудовой дисциплины. Пассажир практически не ощущает на себе полезность таких систем и, возможно, не знает о наличии их на маршруте.

В основе функции определения местонахождения транспорта, предлагаемой нами системы, заложена технология радиочастотной идентификации (*RFID*) и система спутникового позиционирования. Рассмотрим структуру системы (рис. 1).

Технология *RFID* востребована в различных сферах, где требуется автоматизированная идентификация ряда объектов в реальном времени.

На транспортных единицах устанавливаются *RFID*-метки. На остановочных пунктах и при необходимости между ними (например, в случаях относительно большого разнесения остановок) размещаются стационарные блоки, а также располагаются устройства отображения информации. Информация, считанная стационарными блоками, передается на сервер.

RFID-метка представляет собой миниатюрное запоминающее устройство, способное передавать данные по радиоканалу. В памяти меток содержится их уникальный, идентификационный код. В соответствии с уникальным кодом производится идентификация номера маршрута и другие данные, привязанные к коду метки, необходимые транспортному предприятию. Метка устанавливается на транспортное средство. Изготовители меток выпускают их в корпусах, устойчи-

вых к воздействиям окружающей среды: механическому, температурному, влаге. Когда транспорт попадает в зону регистрации, в радиусе до 100 м от стационарного блока и на скорости до 100 км/ч, информация принимается стационарным блоком. Технология позволяет идентифицировать до 200 меток одновременно.

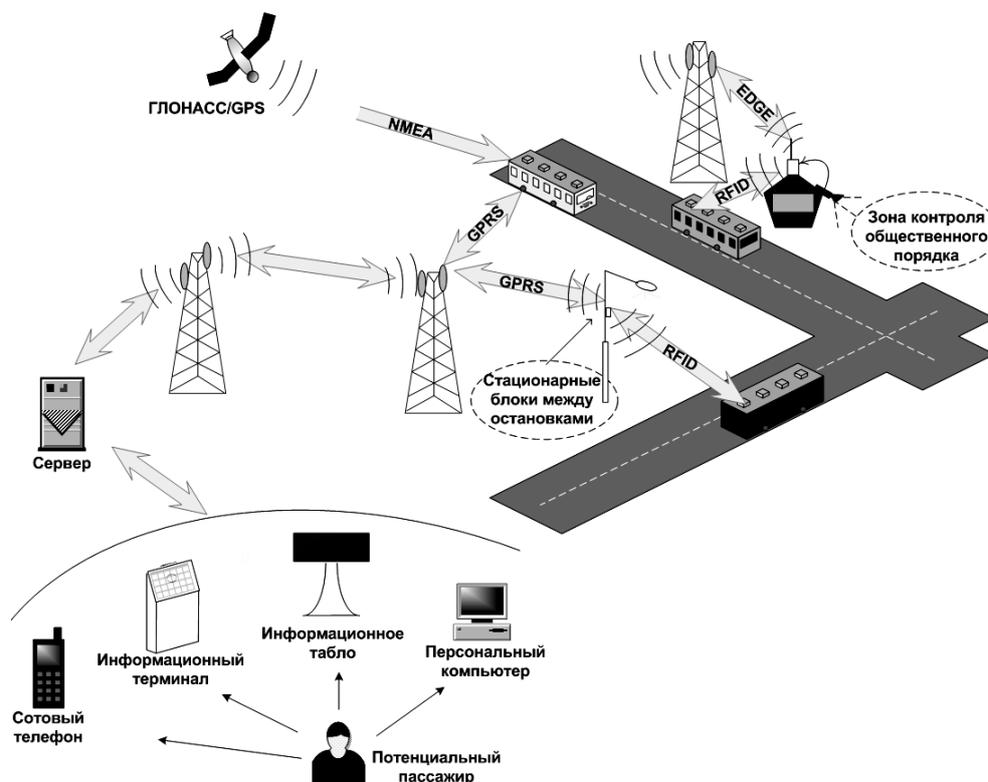


Рис. 1. Структурная схема системы информирования пассажиров общественного транспорта

Стационарный блок включает в себя следующие основные элементы: *GSM*-модуль, *RFID*-считыватель, микроконтроллер, антенна. Назначением блока является прием-передача данных по каналам связи *GSM* (~900 МГц) и *RFID* (~866 МГц), их обработка, а также взаимодействие с устройством отображения информации. Блок-схема стационарного устройства показана на рис. 2.

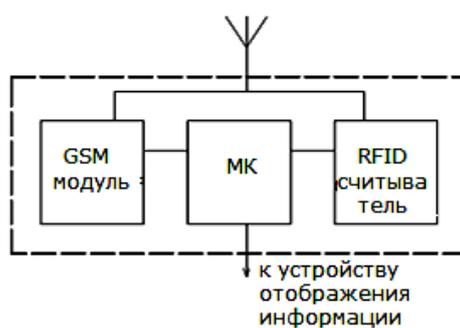


Рис. 2. Блок-схема стационарного блока

Устройство отображения информации может представлять собой экран, табло, а также устройство с функцией удаленного запроса: терминал, сотовый телефон или персональный компьютер с выходом в сеть Интернет. Табло выполняется из сегментных элементов и отображает необходимый минимум информации (рис. 3). На экране отображается расширенная информация о маршруте с картой города.

Номер маршрута	Время прибытия по расписанию	Пройденная остановка

Рис. 3. Шаблон отображения информации на табло

Следует отметить, что существуют остановочные пункты и в «чистом поле», и в мегаполисе. В соответствии с этим предполагается вандалозащищенное исполнение корпуса и обогревательный элемент в нем для функционирования при отрицательных температурах.

Технологию *RFID* более целесообразно использовать на городском электро-транспорте, так как он «привязан» к троллеям и рельсам.

Как упоминалось выше, наряду с *RFID* технологией система предусматривает использование ГЛОНАСС, *GPS*. Мобильный блок, установленный на транспортное средство, принимает и обрабатывает сигналы спутниковой системы ГЛОНАСС/*GPS*. Полученные данные местоположения и скорости объекта сохраняются во внутренней памяти мобильного блока. По запросу от базовой станции эти данные передаются на диспетчерский пункт по *GSM*-каналу, где обрабатываются специализированным программным обеспечением, позволяющим отображать эти данные в удобном для восприятия и анализа виде.

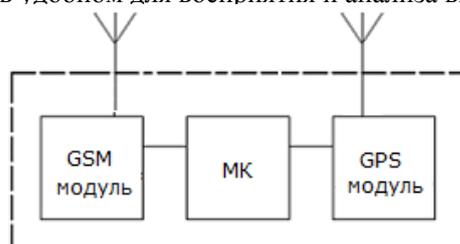


Рис. 4. Блок-схема мобильного блока с ГЛОНАСС/*GPS* модулем

Помимо основных функций предлагаемой системы, возможно расширение круга решаемых задач: реклама и справочная информация, которая может быть выведена кратковременно на устройство отображения информации. В то же самое время система может быть для ее пользователей и не полностью бесплатной. Например, потенциальный пассажир, проживающий или работающий в десяти минутах ходьбы до остановки, может по запросу с помощью СМС получить те же данные на свой телефон, находясь дома или в офисе.

Возможно построение автоматизированной системы въезда и выезда на территорию транспортного парка, а также контроль расхода топлива. Для транспортных предприятий важно учитывать рабочее время и оценивать добросовестность водителей. В большинстве случаев контроль осуществляется с помощью

промежуточных регистрационных пунктов (далее ПРП), размещенных на остановках. На ПРП водитель предоставляет протокол маршрута, в котором фиксируется время прибытия на остановку. Протокол сдается в конце рабочей смены. Очевидны недостатки такой системы: невозможность оперативно определять нахождение транспорта на маршруте, ведение бумажного учета, недобросовестность ответственных на ПРП, водитель вынужден оставлять транспортное средство и затрачивать время на процедуру регистрации на ПРП.

Литература

1. Степурин А.В. Протокол GPRS. М.: ООО «Аквариум-Принт»; К.: ОАО «Дом печати – Вятка», 2005. 128 с.
2. Сандип Лахири. RFID. Руководство по внедрению. М.: КУДИЦ-ПРЕСС, 2007. 312 с.

УДК 628.92/.97

СПОСОБ ОБРАБОТКИ И ВИЗУАЛИЗАЦИИ СИГНАЛОВ В УСТРОЙСТВАХ ПОДСВЕТКИ

А.В. Литвинов

Предложен способ реализации системы подсветки применительно для области аксессуаров для спортивных товаров (такие, как коньки, ролики, сноуборды, велосипеды и пр.), основанный на преобразовании микропроцессорной системой измеряемых величин, таких как скорость, угол наклона, ускорение, звук, температура, время и пр., в световые сигналы подсветки с различными алгоритмами работы.

Ключевые слова: алгоритм визуализации, микропроцессорная система, устройства подсветки.

В современном мире развитие технологий движется во всех направлениях, охватывая самые далекие области, внося комфорт и удобство, легкость и быстродействие, защиту и надежность, а также добавляет в наш мир яркости и красоты. В такой области, как аксессуары для спортивных товаров, технологии устройств подсветки только начинают своё развитие. Несмотря на это, даже самые простейшие из них пользуются большим спросом, в особенности те, которые имеют свою уникальность. Например, устройства со сверхяркими светодиодами, со световым каналом в виде прозрачного провода и др. А такие устройства подсветки, которые будут менять свой алгоритм свечения в зависимости от внешних воздействий, таких как скорость движения, угол наклона, ускорение, звук и т.д., будут выделяться среди аналогов своей «интеллектуальностью» и высоким техническим уровнем. Интеллектуальные устройства подсветки создадут радостную атмосферу, сопровождая своего хозяина самыми яркими переливами цветов в такт его движениям, и приятно удивят окружающих, демонстративно прорекламируют занятие активным видом отдыха.

Перед нами стоит сложная задача объединить в одном устройстве технические решения. Система должна обрабатывать сигналы, получаемые с датчика в режиме реального времени, в соответствии с полученным входным сигналом менять «характер» подсветки и параллельно выдавать высокочастотные сигналы

управления на светодиоды для плавного управления их яркостью и переливом цветов. Тем самым задача сводится к разработке устройств и написанию для них алгоритмов визуализации входных сигналов, получаемых с различных датчиков. Одним из критериев оценки качества реализации идеи являются их «адекватность» или «предсказуемость», т.е. когда световые сигналы будут четко определять движения хозяина и соответственно на них реагировать, как свет, зажигаемый в холодильнике при открытии дверцы, только намного сложнее.

Создание такой системы возможно на базе микропроцессорной системы, способной производить быструю обработку данных и параллельно выдавать высокочастотные сигналы управления на каждый независимый канал порта ввода/вывода. Нами был выбран новый тип микроконтроллеров STM, построенные на процессорном ядре ARM, имеющих высокие скоростные характеристики, широкий спектр назначения и низкую стоимость по сравнению с микроконтроллерами семейства AVR. Благодаря особой архитектуре данных микроконтроллеров, система обеспечивает низкий уровень потребляемой мощности, высокое быстродействие портов ввода/вывода и ускоренный процесс вычисления за счет возможности расширения аккумулятора до 32 бит. При этом их стоимость не превышает, а чаще значительно ниже других микроконтроллеров с подобными характеристиками.

Одним из первых вариантов визуализации сигнала был придуман алгоритм под названием «Волна». Представляет собой плавный переход яркого светящегося центра (волны) от одного края располагаемых светодиодов к другому. На временной диаграмме (рис. 1) представлен простейший вариант «Волны», реализуемый на четырех светодиодах VD1 – VD4, где их яркость зависит от времени и смещена относительно друг друга, так что если они будут расположены по одной линии на небольшом расстоянии друг от друга, получится эффект перетекающей «волны». Наглядно его можно заметить на большем количестве световых элементов, начиная от 6 и более, особенно если они расположены близко друг к другу.

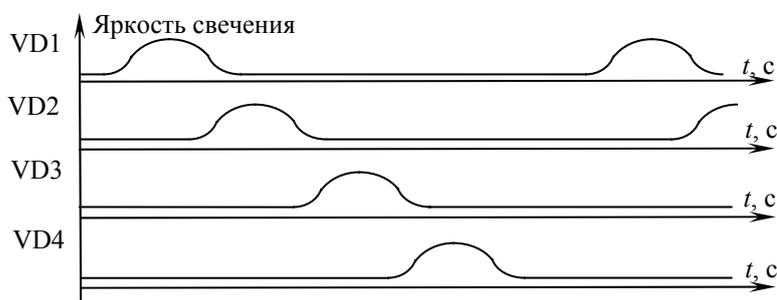


Рис. 1. Временная диаграмма простейшего варианта алгоритма «Волна»

Следующим этапом модернизации алгоритма подсветки была идея двух цветов, превалирование свечения которых зависело бы от уровня скорости определяемой с датчика скорости, либо с какого-либо другого вида датчика. Суть заключается в следующем. Две «волны» – синяя и красная (рис. 2) – «движутся» навстречу друг другу и независимо друг от друга. При уровне «скорости», равном нулю (минимальной), превалирует красный цвет подсветки, т.е. длительность свечения в максимуме ($t_{кр_max}$) много больше, чем у синего ($t_{с_max}$), а «скорость нарастания» яркости (S) много меньше.

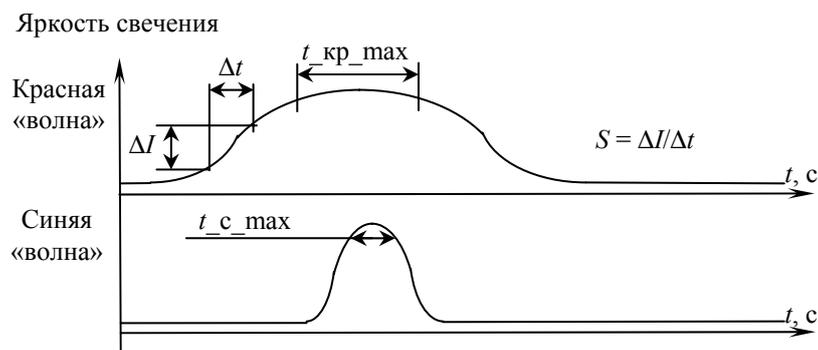


Рис. 2. Временная диаграмма алгоритма «Волна» при минимальном уровне скорости

С увеличением уровня «скорости» с датчика система подсветки изменяет свой способ визуализации на превалирование синего цвета, вплоть до крайнего уровня «скорости» (максимальной). При этом алгоритм управления синего и красного меняется на противоположный: длительность свечения синего в максимуме (t_{c_max}) много больше, чем у красного ($t_{кр_max}$), а «скорость нарастания» яркости (S) много меньше.

Данный алгоритм реализован на отладочной плате на базе микроконтроллера STM8S105C6T6, на 16 светодиодах, 8 красных и 8 синих. В роли датчика входного сигнала (скорости) выступает пьезоэлемент, который генерирует различную амплитуду напряжения в зависимости от подаваемых на него колебаний, т.е. регистрирует шум, вибрацию и звук, что применительно к конькам может являться аналогом уровня скорости (чем больше уровень вибрации, тем выше скорость на льду).

Таким образом, создан первый вариант «устройства интеллектуальной подсветки» на отладочной плате и ведется его совершенствование. Оптимизация алгоритмов работы устройства, а также разработка новых вариантов решений в этой области являются весьма широкой и сложной задачей, требующей интеллектуальных подходов и высоких навыков программирования в области обработки и визуализации сигналов с помощью микроконтроллеров.

Литература

1. Универсальная подсветка. Интернет-магазин [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://supergolleg.ru>, свободный (дата обращения: 25.07.2011).
2. Подсветка для роликов и коньков. Интернет-магазин [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://ultra-podsvetka.ru>, свободный (дата обращения: 25.07.2011).
3. Северное сияние – устройства интеллектуальной подсветки. ООО «Радианс» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://vkontakte.ru/ooradiance>, свободный (дата обращения: 25.07.2011).

УДК 628.9.041

ИСТОЧНИК ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Г.Р. Мухин, В.И. Туев

Предложено схемотехническое решение устройства для питания светодиодов пульсирующим током с повышенной стабильностью при изменении питающего напряжения.

Ключевые слова: светодиод, полевой транзистор, надежность.

Постановка цели и задач. Светотехнические устройства (СУ) на светодиодах (СД) получают все более широкое распространение вследствие улучшенных показателей экономичности, срока службы, экологичности и т.д. [1]. Надежность СУ обеспечивается питанием СД постоянным током с повышенной стабильностью при изменении питающего напряжения, температуры и других возмущающих воздействий, так как превышение номинального значения тока резко сокращает срок службы СД [2]. В состав СУ вводятся преобразователи переменного напряжения в выходной ток [3]. С целью повышения коэффициента полезного действия в них используются импульсные способы преобразования энергии. Недостатки импульсных преобразователей проявляются в необходимости применения дополнительных мер по обеспечению электромагнитной совместимости [4] и коррекции коэффициента мощности [5, 6].

Известен способ питания СД пульсирующим током – трехзначный светодиодный светофор, содержащий светодиодную группу, состоящую из последовательно соединенных цепочек, каждая из которых состоит из двух встречно параллельно соединенных светодиодов, и стабилизирующий рабочий ток светодиодов резистор, подключенный последовательно к светодиодной группе [7]. Светофор питается от сети переменного напряжения. Недостатком этого устройства являются низкий уровень стабильности излучения и низкая надежность (обусловлена, в частности, низкой стабильностью рабочего тока).

Цель работы: увеличение стабильности излучения и увеличение надежности работы источника оптического излучения.

Разработка стабилизатора пульсирующего тока. В качестве устройства для стабилизации тока в полупроводниковых излучающих приборах широко используются полевые транзисторы, у которых затвор и исток соединены между собой [8]. Недостатком такого стабилизатора тока является невозможность использования его в источниках излучения, питаемых от переменного напряжения.

Поставленная цель достигается тем, что в источнике оптического излучения, содержащем группу, состоящую из последовательных цепочек, каждая из которых состоит из встречно параллельно соединенных оптических диодов, стабилизатор тока, включенный последовательно с группой оптических диодов, и две входные клеммы питающего переменного напряжения, стабилизатор тока выполнен из двух частей, каждая из которых содержит полевой транзистор и за-

щитный диод, анод которого соединен с истоком и затвором полевого транзистора, а катод со стоком полевого транзистора, при этом сток первого и сток второго полевых транзисторов соединены с началом и концом группы оптических диодов соответственно, а истоки первого и второго полевых транзисторов подсоединены к входным клеммам.

Схема предлагаемого источника оптического излучения содержит оптические диоды D_1, D_2, \dots, D_N , и D_1', D_2', \dots, D_N' , два полевых транзистора VT_1 и VT_2 и два защитных диода $D_{з1}$ и $D_{з2}$ (рис. 1).

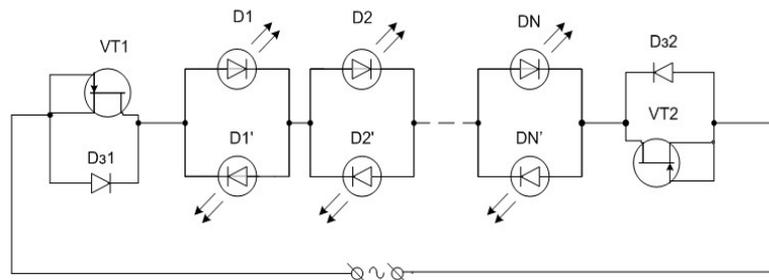


Рис. 1. Источник оптического излучения

Стабилизирующее действие полевого транзистора иллюстрируется графиком (рис. 2), на котором приведена его выходная вольт-амперная характеристика. При изменении напряжения на транзисторе VT_1 или VT_2 в пределах от $U_{нас}$ до $U_{пр}$, где $U_{нас}$ – напряжение насыщения, $U_{пр}$ – напряжение пробоя, ток через транзистор изменяется незначительно. Этот участок вольт-амперной характеристики и используется для стабилизации тока в оптических диодах D_1, D_2, \dots, D_N , и D_1', D_2', \dots, D_N' .

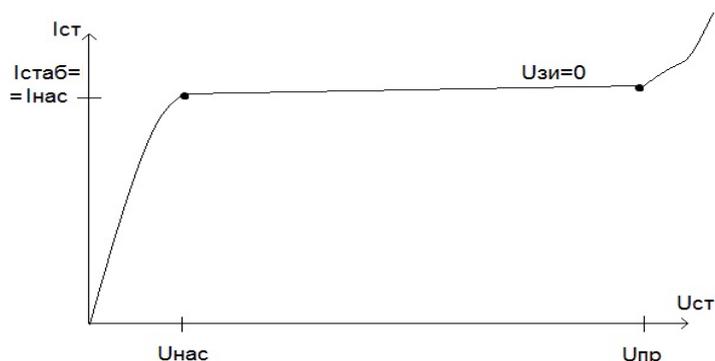


Рис. 2. Вольт-амперная характеристика полевого транзистора

Источник оптического излучения работает следующим образом. При положительной полуволне питающего напряжения, поданной на входную клемму, которая соединена с истоком и затвором полевого транзистора VT_1 и анодом защитного диода $D_{з1}$, относительно другой клеммы, которая, в свою очередь, соединена с истоком и затвором полевого транзистора VT_2 и анодом защитного диода $D_{з2}$, ток протекает через защитный диод $D_{з1}$, оптические диоды D_1, D_2, \dots, D_N и транзистор VT_2 .

При отрицательной полуволне питающего напряжения, поданной на входную клемму, которая соединена с истоком, затвором полевого транзистора VT_1 и

анодом защитного диода Dз1, относительно другой клеммы, которая, в свою очередь, соединена с истоком, затвором полевого транзистора VT2 и анодом защитного диода Dз2, ток протекает через защитный диод Dз2, оптические диоды D1', D2', ..., DN' и транзистор VT1.

При повышении входного напряжения ток в группе оптических диодов практически не возрастает, так как транзисторы работают в режиме насыщения.

Защитные диоды Dз1 и Dз2 предназначены для увеличения коэффициента полезного действия источника оптического излучения, так как обратное сопротивление полевого транзистора больше, чем сопротивление защитного диода, смещенного в прямом направлении, а также для увеличения надежности устройства.

Число оптических диодов в группе зависит от напряжения питания.

Заключение. Экспериментальные исследования устройства, выполненного по схеме, представленной на рис. 1, с использованием полевых транзисторов типа КП303Е и одной ячейки, содержащей два встречно параллельно соединенных светодиода типа АЛ307, показали, что при изменении переменного напряжения источника питания в интервале от 5 до 15 В амплитудное значение пульсирующего тока в цепи диодов изменялось от 12 до 16 мА. Таким образом, в работе предложено схемотехническое решение устройства [9] для питания СД пульсирующим током с повышенной стабильностью при изменении питающего напряжения.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в порядке реализации Постановления №218 Правительства РФ.

Литература

1. LM117/LM317A/LM317 3 – Terminal Adjustable Regulator. National Semiconductor – Datasheet [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/nationalsemiconductor/DS00903.PDF> (дата обращения: 01.12.2010).
2. Transition-mode PFC controller – L6562A – ST – Datasheet [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://datasheet.emcelettronica.com/st/L6562A> (дата обращения: 01.12.2010).
3. Миронов С. Интегральные драйверы для светодиодного освещения. Ч. I: AC/DC-драйверы // Новости электроники. 2010. №10. С. 3–7.
4. ГОСТ Р 51514–99. Совместимость технических средств электромагнитная. Помехоустойчивость светового оборудования общего назначения. Требования и методы испытаний. М.: Госстандарт России, 1999. 11 с.
5. Туев В.И. Повышающий преобразователь постоянного тока // Приборы и техника эксперимента. 2006. №4. С. 155–156.
6. Четти П. Проектирование ключевых источников электропитания. М.: Энергоатомиздат, 1990. 238 с.
7. Пат. РФ № 2239575, МПК: В61L 5/18, G08G 1/095, H05B 37/00. Трехзначный светодиодный светофор // Сергеев Б.С. (RU), Савельев Е.О. (RU). Заявл. 09.10.2002, опубл. 10.11.2004.
8. Электронные предохранители и ограничители постоянного и переменного тока [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://lib.qrz.ru/node/9731> (дата обращения: 20.02.2011).
9. Источник оптического излучения / И.В. Антонишен, А.А. Бомбизов, А.В. Иванов и др. Решение о выдаче патента на полезную модель по заявке №2011122260/28 (032940) от 20.06.2011.

МОДЕЛЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЛОЁВ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ С МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ОСНОВОЙ ДЛЯ СВЕТОДИОДНЫХ МАТРИЦ ВИДИМОГО ДИАПАЗОНА

М.В. Воронаев, Д.Д. Каримбаев, Ю.А. Хотненко

Предложена модель определения теплопроводности диэлектрического слоя в печатных платах на металлической основе для светодиодных матриц. Приведены результаты расчётов и измерения теплового сопротивления СИД кристаллов на печатной плате в зависимости от типа диэлектрика и площади металлизации.

Ключевые слова: эффект растекания тепла, тепловое сопротивление, тепловое сопротивление растекания тепла, теплопроводность.

В настоящее время наметилась тенденция перехода на энергосберегающие источники освещения. Уже с начала 2011 г. перестали выпускаться лампы накаливания 100 Вт и выше. На смену лампам накаливания приходят галогенные лампы, люминесцентные лампы, ртутные лампы высокого давления, светоизлучающие диоды и т.д. В 2011 г. ОАО «НИИПП» начал совместно с ТГУ, ТПУ и ТУСУР работу по проекту «Разработка высокоэффективных и надежных полупроводниковых источников света и светотехнических устройств и организация их серийного производства», финансируемыми согласно Постановлению Минобрнауки № 218.

В рамках этого проекта проводится работа по созданию базовой несущей конструкции (БНК) для изготовления светоизлучающих матриц видимого диапазона. Предполагается разработать технологию изготовления материала для печатных плат с металлической основой; английская аббревиатура МРСВ – печатная плата на металлической основе. Конструкция представляет собой металлическую основу (дюралюминий, медь), на которую наносится тонкий диэлектрический слой, поверх которого приклеивается медная фольга. Такой материал используется для создания мощных светоизлучающих матриц. Очевидно, что тепловое сопротивление излучающего элемента на такой конструкции будет определяться теплопроводностью диэлектрического слоя. В данной работе представлена методика измерения теплопроводности по тепловым сопротивлениям СИД кристаллов, посаженных на разные площадки (медные площадки), основанная на учете эффекта растекания тепла по медной площадке.

В работе рассматриваются образцы СИД с различной теплопроводностью, различными толщинами слоя диэлектрика и различными толщинами слоя металлизации. Используемый эффект растекания тепла по слою металлизации показывает, что чем больше площадь слоя металлизации, тем меньше тепловое сопротивление светодиодного образца; чем толще слой металлизации, тем больше растекания тепла на больших площадках слоя металлизации. Если рассматривать конструкцию светодиода (рис. 1), где 1 – СИД кристалл, 2 – припой, 3 – слой металлизации, 4 – диэлектрический слой, 5 – дюралюминиевая подложка, то измерительное тепловое сопротивление светодиода равно [1]:

$$Rt = Rt_{\text{крист}} + Rt_{\text{прип}} + Rt_{\text{металлиз}} + Rt_{\text{диэлектрик}} + Rt_{\text{подложки}}, \quad (1)$$

где $Rt_{\text{крист}}$ – тепловое сопротивление кристалла, $Rt_{\text{прип}}$ – тепловое сопротивление припоя; $Rt_{\text{металлиз}}$ – тепловое сопротивление слоя металлизации; $Rt_{\text{диэлектрик}}$ – тепловое сопротивление диэлектрического слоя; $Rt_{\text{подложки}}$ – тепловое сопротивление подложки.

Рассмотрим подробно каждое тепловое сопротивление по отдельности. $Rt_{\text{крист}}$ – зависит от геометрических размеров кристалла. Кристаллы во всех случаях одинаковые, поэтому тепловое сопротивление кристалла постоянно. $Rt_{\text{прип}}$ – зависит только от своих размеров и поэтому оно равно константе. $Rt_{\text{метализ}}$ – зависит от площади металлизации и равно [2]

$$Rt_{\text{мет}} = \frac{l}{S \cdot k_{\text{мет}}}, \quad (2)$$

где L – толщина металлизации; S – площадь металлизации; $k_{\text{мет}}$ – коэффициент теплопроводности металлизации.

Тепловым сопротивлением слоя металлизации, даже при площади металлизированного слоя, равной площади кристалла (это связано с большой теплопроводностью металла), можно пренебречь. $Rt_{\text{диэлектрик}}$ – зависит от площади металлизации. Так как теплопроводность диэлектрика небольшая, растеканием в нём можно пренебречь. Тепловое сопротивление диэлектрического слоя будет равно

$$Rt_{\text{диэлектрик}} = \frac{l}{S \cdot k_{\text{диэлектрик}}}, \quad (3)$$

где l – толщина диэлектрика; S – площадь металлизации; $k_{\text{диэлектрик}}$ – коэффициент теплопроводности диэлектрика. Площадь, через которую тепловой поток проходит через диэлектрик, будет равна площади металлизации. Это будет верным, пока тепловое сопротивление растекания по металлизации будет меньше теплового сопротивления диэлектрика. Подложка (подложка есть ничто иное, как металлическое основание печатной платы) имеет высокую теплопроводность и тепловой поток начинает растекаться по всей площади подложки. В этом случае тепловое сопротивление подложки мало, и им можно пренебречь (см. рис. 1).

Более подробное объяснение можно провести на основе рис. 2. Рассмотрим 3 случая. Первый случай, когда видна зависимость уменьшения теплового сопротивления от увеличения площади металлизации. В этом случае идёт растекание тепла по всей металлизации $Rt_{\text{диэлектрик}} > Rt_2$. Второй случай, когда $Rt_{\text{диэлектрик}} \approx Rt_2$ и тепловой поток начинает не растекаться, а уходить в низ, в этом случае на графике наблюдается перегиб. И третий случай, когда $Rt_{\text{диэлектрик}} < Rt_2$, не наблюдается дальнейшего растекания тепла по металлизации и тепловое сопротивление не зависит от дальнейшего увеличения площади металлизации. Если интерпретировать зависимость теплового сопротивления от площади слоя металлизации прямой то значение этой прямой, будет описываться выражением

$$Rt = \frac{l}{k} \cdot S^{-1} + Rt_0, \quad (3)$$

где Rt_0 – тепловое сопротивление кристалла и припоя; l – толщина диэлектрического слоя; S – площадь растекания теплового потока; k – коэффициент теплопроводности диэлектрического слоя.

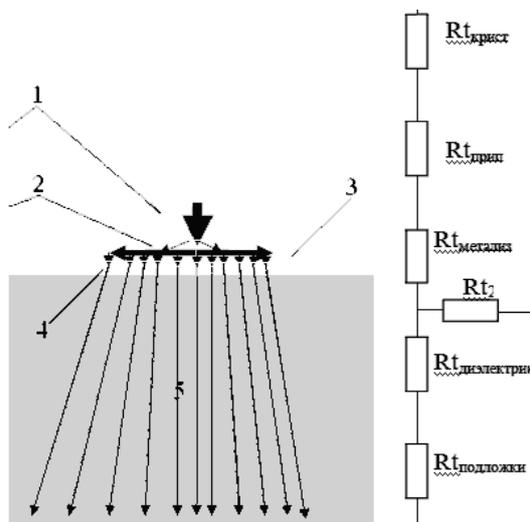


Рис. 1. Растекание тепла на образце СИД и принципиальная схема теплового сопротивления

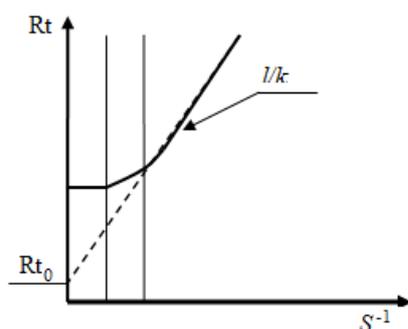


Рис. 2. Зависимость теплового сопротивления СИД от площади слоя металлизации

Были проведены модельные расчёты. Для расчётов использовалась программа ANSYS [3–5]. В данной программе расчёт проводился решением задачи уравнения теплопроводности с граничными условиями [6]. При расчётах использовались граничные условия: напряжение на кристалле 3 В, ток 100 мА, температура нижнего основания равна 20 °С. Представленные результаты расчётов изображены на графиках (рис. 3).

На рис. 3, а представлены результаты расчётов теплового сопротивления в зависимости от площади слоя металлизации с тремя толщинами диэлектрических слоёв: 17, 30, 50 мкм. Теплопроводность диэлектрического слоя 1 Вт/м °С. Толщина слоя металлизации 70 мкм.

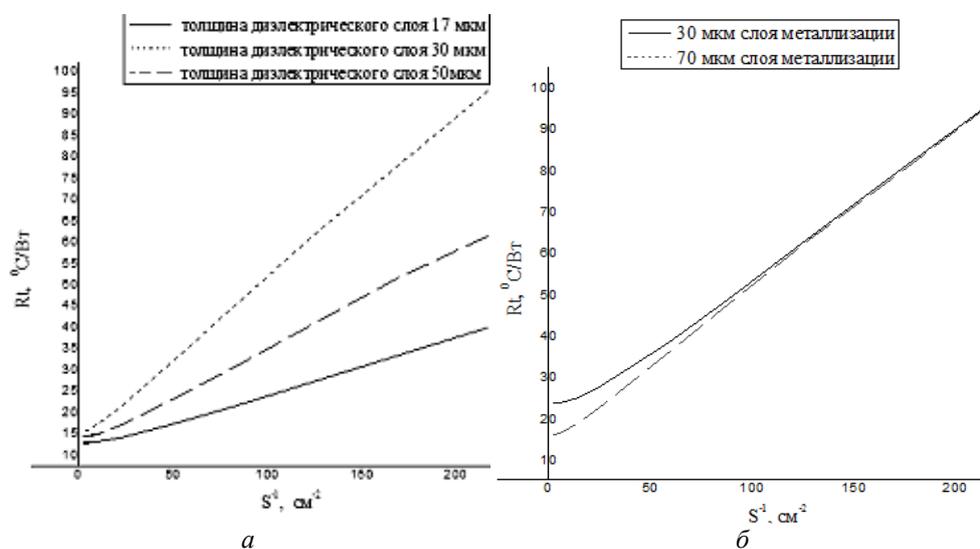


Рис. 3. Зависимость теплового сопротивления СИД от площади слоя металлизации: а – на образцах с различными толщинами диэлектрического слоя; б – на образцах с различными толщинами слоёв металлизации

На рис. 3, б представлена зависимость теплового сопротивления от обратной площади слоя металлизации с разными толщинами металлизированных слоёв. В обоих случаях толщина диэлектрического слоя равна 50 мкм. Теплопроводность диэлектрического слоя равна 1 Вт/м °С. При этом на графике видно, что тепловое сопротивление у образца с толщиной металлизации 30 мкм при обратной площади металлизированного слоя 50 см⁻² больше, чем у образца с толщиной слоя металлизации 70 мкм. Ситуация определяется дополнительным влиянием диэлектрического слоя и тепловым сопротивлением растекания тепла по металлизации.

На основе расчета мы предлагаем модель для определения теплопроводности диэлектрических слоёв, задаваемых при расчёте зависимости теплового сопротивления СИД от площади металлизированного слоя. После разработки дан-

ной модели были проведены эксперименты для определения теплопроводности диэлектрического слоя печатной платы. Эксперименты проводились на 2 образцах СИД видимого диапазона (образец с диэлектрическим слоем фирмы DUPONT и образец с диэлектрическим слоем полиимид). Результаты измерений представлены на графиках (рис. 4).

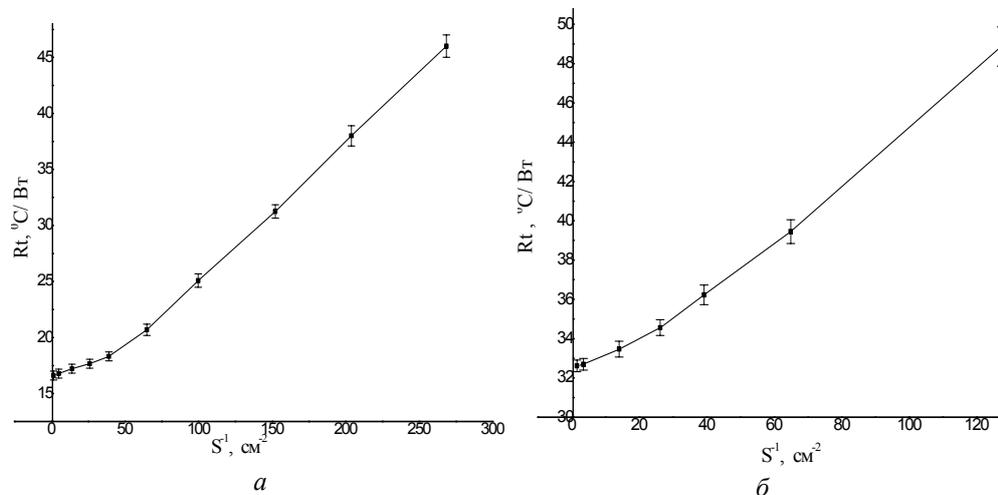


Рис. 4. Зависимость теплового сопротивления СИД от площади слоя металлизации: *a* – на образце с дюралюминиевой подложкой с диэлектрическим слоем полимера (фирма DUPONT); *б* – на образце с дюралюминиевой подложкой с диэлектрическим слоем полиимида

Вид экспериментальных кривых совпадает с расчетными. В результате эксперимента наблюдается перегиб уже при обратной площади металлизации 50 см^{-2} , при меньших обратных площадях слоя металлизации график уходит в насыщение. Из экспериментального графика мы получили значения теплопроводности: диэлектрического слоя фирмы DUPONT, равной $1 \text{ Вт/м} \text{ } ^\circ\text{C}$; полиимида – $0,3 \text{ Вт/м} \text{ } ^\circ\text{C}$. Таким образом, теплопроводность полиимида в три раза меньше, чем у полимера с порошком керамики (фирма DUPONT). В результате проведенной работы в настоящее время светодиодные матрицы изготавливаются на подложках с диэлектрическим слоем фирмы DUPONT.

Параллельно с этим разрабатывается технология изготовления диэлектрического слоя с порошком нитрида алюминия с целью получения теплопроводности большей или равной теплопроводности диэлектрического слоя фирмы DUPONT.

Литература

1. Дульнев Г.Н. Теплопроводность смесей и композиционных материалов: Справочная книга / Г.Н. Дульнев, Ю.П. Заричняк. Л.: Энергия, 1974. 264 с.
2. Юдаев Б. Н. Теплопередача: Учеб. для вузов / Б.Н. Юдаев. М.: Высшая школа, 1981. 319 с.
3. Каплун А.Б. ANSYS в руках инженера: Практ. руководство / А.Б. Каплун, Е.М. Морозова, М.А. Олфёрова. М.: Едиториал УРСС, 2003. 272 с.
4. Босов К.А. ANSYS: справочник пользователя. М.: ДМК-Пресс, 2005. 640 с.
5. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике аппроксимации: Пер. с англ. М.: Мир, 1975. 536 с.
6. Тиханов А.Н. Уравнения математической физики / А.Н. Тиханов, А.А. Самарский. М.: Наука, 1964. 288 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Секция 2

РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

*Председатель секции – Шарыгин Герман Сергеевич,
д.т.н., профессор, зав. каф. РТС*

Ефремов П.А., Макаров Н.В., Голиков А.М. Исследование методов и реализация комплексной системы видеоконференций, использующей защищенные IP VPN каналы	3
Кузьменко Ю.Д., Голиков А.М. Исследование алгоритма криптографической защиты AES и его аппаратно-программная реализация в среде MATLAB	7
Логинов С.С., Голиков А.М. Исследование алгоритма криптографической защиты ГОСТ 28147–89 и его аппаратно-программная реализация на ПЛИС	14
Нестеренко Н.Н., Голиков А.М. Исследование алгоритмов скремблирования и стеганографии и их аппаратно-программная реализация в среде MATLAB	20
Рябинин Е.А., Уваровский Д.В., Голиков А.М. Исследование методов обработки видеoinформации с использованием фрактальных и вейвлет-преобразований для эффективной ее передачи по защищенным IP каналам	27
Уваровский Д.В., Голиков А.М. Исследование многоуровневых методов модуляции сигналов на базе аппаратуры и программного обеспечения LABVIEW 2010	33
Кононов О.В., Максимов А.В., Рябцунов Н.С. Векторный анализатор OFDM-сигнала	39
Орлов П.Е. Квазистатическое моделирование модального зондирования неоднородностей в многопроводных структурах	44

Секция 3

НАНОЭЛЕКТРОНИКА СВЧ

Председатель секции – Бабак Леонид Иванович, к.т.н., доцент каф. КСУП

Арыков В.С., Баров А.А., Кондратенко А.В., Фоминых А.А., Хохол Д.С. Монолитные интегральные схемы пассивных удвоителей частоты S- и C-диапазонов на основе GaAs pHEMT-технологии	49
Арыков В.С., Баров А.А., Кондратенко А.В. Монолитная интегральная схема малошумящего усилителя диапазона 8–12 ГГц на основе GaAs pHEMT-технологии	53
Добуш И.М. Экстракция параметров эквивалентных схем пассивных компонентов СВЧ МИС в копланарном тракте	57
Добуш И.М., Ющенко А.Ю. Экспериментальные исследования температурных характеристик компонентов СВЧ МИС на основе GaAs HEMT-технологий	62

Сальников А.С., Каратаев Е.П. Использование средств статистического анализа при производстве СВЧ монолитных интегральных схем	68
Сальников А.С., Ющенко А.Ю. Измерение электрофизических параметров материалов с помощью тестовых структур при изготовлении гетероструктурных СВЧ МИС	75

Секция 4

НАНОТЕХНОЛОГИИ В ЭЛЕКТРОНИКЕ

Председатель секции – Троян Павел Ефимович, д.т.н., профессор, зав. каф. ФЭ

Орликов Л.Н., Арестов С.И., Шандаров С.М. Формирование пленок легкоплавких металлов на ниобате лития	80
--	----

Секция 5

АНТЕННЫ И МИКРОВОЛНОВЫЕ УСТРОЙСТВА

Сопредседатели секции – Гошин Геннадий Георгиевич, д.т.н., профессор каф. СВЧ и КР; Сычев Александр Николаевич, д.т.н., профессор каф. КСУП

Трубачев А.А., Юрченко В.И. Исследование диодов Ганна для компактных КВЧ-устройств	87
Трубачев А.А., Юрченко В.И. Плоские антенны КВЧ-диапазона	91

Секция 7

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА И ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

Председатель – Гарганеев Александр Георгиевич, д.т.н., профессор, зав. каф. ЭСАУ

Горяшин Н.Н., Соломатова А.А. МДП-ключ в квазирезонансном преобразователе напряжения	98
--	----

Секция 8

ФИЗИЧЕСКАЯ И ПЛАЗМЕННАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

Председатель секции – Окс Ефим Михайлович, д.т.н., профессор, зав. каф. физики

Мошкина А.В., Роденко О.Л. Моделирование и исследование оптических характеристик просветляющих покрытий для светодиодов	105
Роденко О.Л., Гушин В.А., Сим П.Е., Мошкина А.В. Исследование фотометрических характеристик, механизмов деградации и спектральных характеристик люминофоров полупроводниковых излучающих диодов	108

Секция 9

БИОМЕДИЦИНСКАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

*Председатель секции – Федотов Николай Михайлович,
к.т.н., зав. лаб. безопасных биомедицинских технологий ЦТБ ТУСУРа*

Дымченко А.Н.

Программа синтеза и визуализации трехмерных объектов
из томографических срезов методом трассировки лучей 114

Шкарупо С.П.

Разработка функционального генератора для тестирования
регистраторов ЭКГ 118

Секция 10

АВТОМАТИЗАЦИЯ И ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

*Председатель секции – Кориков Анатолий Михайлович,
д.т.н., профессор, зав. каф. АСУ,
зам. председателя – Горитов Александр Николаевич, д.т.н., профессор каф. АСУ*

Бойко А.П.

Человеко-машинное взаимодействие – прошлое и настоящее 121

Евсютин О.О.

Модели сжатия данных 125

Филимонов А.П.

Оптимизация настроек TCP 132

Крупский А.С.

Архитектура распределённой вычислительной системы
с поддержкой качества обслуживания 136

Кулбаев С.С.

Реализация параллельного алгоритма сжатия изображений
на основе фракталов 141

Купрейчик А.Ф., Андреева А.А., Минин О.Н.

Реализация комплексной программы направленной на исследование
моно- и поликристаллических материалов 145

Шайкин Д.В.

Комплекс тестирования сетевых устройств и приложений на ПЛИС 150

Афиркина Т.А., Суркова С.В.

Автоматизированная система оценки стоимости бизнеса 155

Григорьева Д.А., Зоркальцев А.А., Овчинников А.А., Онуфриев В.А.

Разработка средств диагностики работы промышленных сетей Ethernet 158

Секция 11

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ, АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ И СИСТЕМ

*Председатель секции – Черкашин Михаил Владимирович,
к.т.н., доцент каф. КСУП, декан ФВС*

Добуш И.М., Черкашин М.В., Бабак Л.И.

Программа экстракции эквивалентных схем пассивных СВЧ-компонентов
в среде символьных вычислений 161

Коколов А.А., Бабак Л.И., Колантонио П. Автоматический синтез согласующих цепей для высокоэффективных СВЧ-усилителей мощности класса F с использованием генетического алгоритма	168
Сальников А.С. Обзор программного обеспечения для хранения результатов измерений и статистического анализа при производстве СВЧ МИС	175
Степачева А.В., Добуш И.М. Программный модуль для экстракции параметров эквивалентных схем пассивных компонентов СВЧ МИС в системе INDESYS-MS	181

Секция 12

ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

*Председатель секции – Шелупанов Александр Александрович,
д.т.н., профессор, зав. каф. КИБЭВС, проректор по ИР*

Беляков К.О., Мещеряков Р.В., Сарьян В.К., Шелупанов А.А. Функция обеспечения безопасности Удостоверяющего центра головной станции информационных управляющих систем	186
Черных Д.В., Конев А.А., Мещеряков Р.В. Элементы программного комплекса для оценки биометрических параметров в защищенных системах	188
Ганюшкин И.Г. Программный комплекс для отработки навыков защиты сервера	190
Хоанг Ван Куэт Основные задачи организации безопасности для семантических веб	197
Лисс А.А., Пестунова Т.М. Разработка экспериментальной сетевой среды и её безопасная интеграция в корпоративную сеть	201
Нигматуллин Р.Ф. Особенности настройки речевого процессора кохлеарного имплантата для русскоязычных пациентов с учетом формантного состава русского языка	206
Понизов А.Г. Классификация методов исследования слухового анализатора человека	209
Савчук М.В., Сопов М.А., Мещеряков Р.В. Организационно-функциональная структура информационной безопасности аутентификационной системы	213
Жданов О.Н., Лукин Ф.А., Ханов В.Х., Чалкин Т.А. Аутентификации канала телеуправления малым спутником аппаратными криптографическими средствами	215

Секция 13

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В УПРАВЛЕНИИ И ПРИНЯТИИ РЕШЕНИЙ

*Председатель секции – Ехлаков Юрий Поликарпович, д.т.н., профессор,
зав. каф. АОИ, проректор по информатизации и управлению ТУСУРа*

Ахтямов Э.К. Веб-сервис о текущей успеваемости студентов, отражающий информацию в режиме реального времени	220
--	-----

Секция 14

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ОБУЧЕНИИ

*Председатель секции – Дмитриев Вячеслав Михайлович,
д.т.н., профессор, зав. каф. ТОЭ*

Алимов Д.В., Соколова В.В.

Реализация алгоритма генерации клеточных автоматов
с использованием языка программирования Nemerle 224

Хабibuлина Н.Ю., Афанасьева Е.И.

Использование генератора индивидуальных заданий при разработке
автоматизированной обучающей системы «Линейное программирование» 230

Харьков С.С., Дмитриев В.М.

Разработка лабораторного автоматизированного рабочего места
для реализации кросс-канала между ЛАРМ и СМ МАРС 234

Волжанская Я.А., Дмитриев В.М.

Реализация модельной иллюстрации закона Ома в РМС МАРС 237

Секция 15

ИННОВАЦИИ В СФЕРЕ ЭЛЕКТРОНИКИ И УПРАВЛЕНИЯ

*Председатель секции – Осипов Юрий Мирзоевич, д.э.н., д.т.н., профессор,
зав. отделением каф. ЮНЕСКО*

Чубов С.В., Маморцев С.В.

Система информирования пассажиров общественного транспорта
с использованием технологии RFID и GPS/ГЛОНАСС 241

Литвинов А.В.

Способ обработки и визуализации сигналов в устройствах подсветки 244

Секция 16

ЭЛЕКТРОНИКА, ОПТОЭЛЕКТРОНИКА И ФОТОНИКА

*Председатель секции – Задорин Анатолий Семёнович,
д.т.н., профессор, зав. каф. РЗИ, декан РТФ*

Мухин Г.Р., Туев В.И.

Источник оптического излучения 247

Воропаев М.В., Каримбаев Д.Д., Хотненко Ю.А.

Модель определения теплопроводности диэлектрических слоёв печатных
плат с металлической основой для светодиодных матриц
видимого диапазона 250

Исправление ошибок:

В сборнике: **Электронные средства и системы управления:**

Материалы докладов

Международной научно-практической конференции

(13–16 октября 2010 г.).

Томск: В-Спектр, 2011: В 2 ч. – Ч. 1. – 154 с.

ISBN 978-5-91191-221-X (в 2 ч.). ISBN 978-5-91191-222-8 (ч. 1)

В статье: **Ю.М. Ерофеев**. *"Аксель Иванович Берг и его роль в организации калужского филиала ВНИИ-108"* (с. 139) по вине автора допущена опечатка.

Правильным считать написание Ф.И.О. автора этой статьи – **Ю.Н. Ерофеев**.

Научное издание

**VII Международная
научно-практическая конференция**

**ЭЛЕКТРОННЫЕ СРЕДСТВА
И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ**

Материалы докладов

10–11 ноября 2011 г.

Ответственный редактор – **Н.Д. Малютин, д.т.н., профессор**

Корректор – В.Г. Лихачева
Верстка В.М. Бочкаревой

Издательство «В-Спектр»
Сдано на верстку 05.10.2011. Подписано к печати 07.11.2011.
Формат 60×84¹/₁₆. Печать трафаретная.
Печ. л. 16,4. Усл. печ. 15.
Тираж 75 экз. Заказ 52.

Тираж отпечатан в издательстве «В-Спектр»
ИНН/КПП 7017129340/701701001, ОГРН 1057002637768
634055, г. Томск, пр. Академический, 13/24, тел. 49-09-91.
E-mail: bvm@sibmail.com