

ISSN 1818-0442

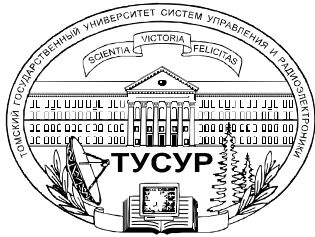
Доклады ТУСУРа. 2016 • Том 19, № 3

# ДОКЛАДЫ

Томского государственного университета  
систем управления и радиоэлектроники

2016 • Том 19, № 3





Министерство образования и науки Российской Федерации

**ДОКЛАДЫ  
ТОМСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА  
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ  
Том 19, № 3, 2016**

Периодический научный журнал

Выходит 4 раза в год

Основан в 1997 г.

ISSN 1818-0442

**Гл. редактор:**

А.А. Шелупанов, д.т.н., проф.

**Зам. гл. редактора:**

А.В. Кобзев, д.т.н., проф.

Р.В. Мещеряков, д.т.н., проф.

Ю.А. Шурьгин, д.т.н., проф.

**Редакционный совет:**

М.П. Батура, д.т.н., проф. (Минск)

Б.А. Беляев, д.т.н., проф.  
(Красноярск)

А.Г. Буймов, д.т.н., проф.

С.А. Гаврилов, д.т.н., проф. (Москва)

Ю.П. Ехлаков, д.т.н., проф.

В.М. Исаев, д.т.н. (Мытищи)

А.М. Кориков, д.т.н., проф.

Ю.Н. Кульчин, академик РАН  
(Владивосток)

В.Ш. Меликян, чл.-корр. НАН  
Республики Армения (Ереван)

Е.М. Окс, д.т.н., проф.

И.Н. Пустынский, д.т.н., проф.

В.К. Сарьян, академик НАН  
Республики Армения (Москва)

В.В. Шайдуров, чл.-корр. РАН  
(Красноярск)

С.М. Шандаров, д.ф.-м.н., проф.

Г.С. Шарьгин, д.т.н., проф.

**Ответственный секретарь:**

В.Н. Масленников, к.т.н., доцент

**Адрес редакции:**

634050, г. Томск,  
пр. Ленина, 40, ТУСУР,  
тел. (382-2) 51-22-43

Свидетельство  
о регистрации МНС РФ  
1027000867068  
от 13 октября 2004 г.

Подписной индекс 20648  
в каталоге Агентства  
«Роспечать»: газеты и журналы

**Издательство**

**Томского государственного  
университета систем управления  
и радиоэлектроники**  
634050, Томск, пр. Ленина, 40,  
тел. (382-2) 51-21-21

Оригинал-макет выпуска подготовлен  
и отпечатан тираж ИП В.М. Бочкаревой  
Техн. редактор В.М. Бочкарева  
Корректор В.Г. Лихачева

Подписано в печать 25.09.2016.  
Формат 60×84 1/8.  
Усл. печ. л. 11,9  
Тираж 500. Заказ 19.

**Содержание**

**ЭЛЕКТРОНИКА, ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА,  
РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ**

**Гошин Г.Г., Зорин А.В., Подлиннов С.А.,  
Попков А.Ю., Фатеев А.В.**

Исследование способов увеличения направленности симметричных  
направленных ответвителей диапазона 2–20 ГГц..... 5

**Сычев А.Н., Стручков С.М., Шеерман Ф.И.**

Направленный ответвитель 20 дБ на связанных линиях  
с круглыми проводниками в прямоугольном экране..... 80

**Былов А.А., Саломатов Ю.П.**

Диаграммообразующая схема однозеркальной антенны  
Ки-диапазона на основе планарной фазированной антенной  
решетки отражательного типа..... 11

**Крылов Ю.В.**

Проектирование волноводного трансформатора  
для широкополосного облучателя зеркальных антенн..... 16

**Подстригаев А.С., Лихачев В.П., Гапенко К.В.**

Сравнительный анализ показателей эффективности способов  
снижения неоднозначности определения частоты, возникающей  
на стыках каналов матричного приемника..... 21

**Капустин В.В., Каменский А.В.**

Оценка качества изображений высокого разрешения  
при внутрикадровом сжатии в стандартах JPEG и JPEG2000..... 27

**Горяинов А.Е.**

Автоматизированный синтез моделей пассивных  
СВЧ-компонентов в виде эквивалентных схем на основе  
оптимального выбора звеньев и прямой экстракции..... 32

**Мищенко Н.И., Пустынский И.Н., Капустин В.В.**

Методы и средства повышения эффективности активно-импульсных  
телевизионно-вычислительных систем мониторинга  
и обеспечения безопасности объектов..... 42

**Носов А.В., Суровцев Р.С., Заболоцкий А.М., Газизов Т.Т.**

Экспериментальное подтверждение возможности защиты  
радиоэлектронной аппаратуры от сверхкороткого импульса  
за счет его разложения в С-секции с лицевой связью..... 47

**Белоусов А.О., Заболоцкий А.М., Газизов Т.Р.**

Экспериментальное подтверждение модальной фильтрации  
в многопроводной микрополосковой линии..... 51

**Близнюк В.В., Березовская Н.В., Паршин В.А., Тарасов А.Е.**

Определение режима генерации лазерного диода  
на фундаментальной моде..... 55

**УПРАВЛЕНИЕ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА  
И ИНФОРМАТИКА**

**Катаев М.Ю., Скугарев А.А.**

Интеллектуальный ситуационный центр, основанный  
на комплексировании космических и наземных данных..... 61

<b>Покаместов Д.А., Демидов А.Я., Крюков Я.В.</b> Влияние формирующих матриц на помехозащищенность каналов связи с множественным доступом на основе разреженных кодов .....	65
<b>Исхаков А.Ю.</b> Методика верификации личности субъекта доступа при удаленной регистрации с помощью доверенных лиц .....	70
<b>Исхакова А.О.</b> Модель процесса формирования инвариантов классов текстов .....	76
<b>Харченко С.С.</b> Модель образования псевдоголоса в процессе фонации пищеводной речи .....	81
<b>Ушарова Д.Н.</b> Метод сопровождения объектов группой видеокамер с автоматической коррекцией значений матрицы проективного преобразования .....	85
<b>Алфёров С.М., Кориков А.М.</b> Модели пресового задачника давления АСУТП регулировки манометров с учетом утечки давления .....	90
<b>Мещеряков Я.Е., Кориков А.М.</b> Автоматизация контроля положения платформы карьерного бурового станка .....	94
<b>Сергеев В.Л., Ву К.Д.</b> К оптимизации адаптивных алгоритмов идентификации и интерпретации гидродинамических исследований с учетом влияния ствола скважины .....	98
<b>Мулин П.В., Березуев А.В., Кудрявцев П.С.</b> Способ автоматического управления тягой корабельного самолета при заходе на посадку .....	103
<b>Антонов М.М., Конев А.А., Никифоров Д.С., Черепанов С.А.</b> Организация защищенной гетерогенной сети в автоматизированных системах коммерческого учета энергоресурсов .....	107
<b>Новохрестов А.К., Никифоров Д.С., Конев А.А., Шелупанов А.А.</b> Модель угроз безопасности автоматизированной системы коммерческого учета энергоресурсов .....	111
<b>Саломатина Е.В.</b> Ресурсный подход к понятию «умный город» .....	115

## ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

<b>Апасов В.И., Шурыгин Ю.А.</b> Влияние коэффициента усиления сигнала ошибки звена обратной связи на характер работы комбинированного преобразователя .....	123
---	-----

## СООБЩЕНИЯ

<b>Воронин Б.А.</b> Анализ индекса цитируемости и методика его повышения .....	131
<b>Новые требования с 2016 г.</b> .....	136

**ЭЛЕКТРОНИКА, ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА,  
РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ**





УДК 621.372

Г.Г. Гошин, А.В. Зорин, С.А. Подлиннов, А.Ю. Попков, А.В. Фатеев

## Исследование способов увеличения направленности симметричных направленных ответвителей диапазона 2–20 ГГц

Проведено исследование возможности использования воздушной полости, образующейся в результате сборки симметричных направленных ответвителей на основе полосковых нерегулярных линий с комбинированной связью, для коррекции их частотных характеристик. Коррекция проводилась путём добавления между основными слоями диэлектрика тонкого слоя другого диэлектрического материала. Основными критериями при его выборе были его гибкость, эластичность и диэлектрическая проницаемость.

**Ключевые слова:** направленный ответвитель, направленность, переходное ослабление.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2016-19-3-5-7

Направленный ответвитель (НО) – это четырёх-портовое пассивное устройство, предназначенное для разделения волн, распространяющихся в связанных линиях передачи, а также для направленного отбора мощности из основного канала во вторичный. Поэтому его широко применяют в радиоизмерительной аппаратуре, такой как скалярные и векторные анализаторы цепей, рефлектометры, радиометры [1, 2] и в других радиотехнических системах для сложения, разветвления и смешивания сигналов, для измерения параметров передачи и отражения, для контроля и стабилизации уровня мощности, частоты сигнала и т.д.

В [3] была рассмотрена реализация симметричного направленного ответвителя на основе нерегулярных полосковых линий с комбинированной связью. В рамках исследования проводилось моделирование влияния воздушной полости (рис. 1), образующейся в результате сборки устройства, на его характеристики. Результаты моделирования показали, что при определённом размере воздушной полости можно добиться улучшения характеристик НО. В данной статье представлены результаты экспериментального исследования возможности коррекции частотных характеристик устройства путём изменения размеров воздушной полости добавлением в неё дополнительных диэлектрических материалов.

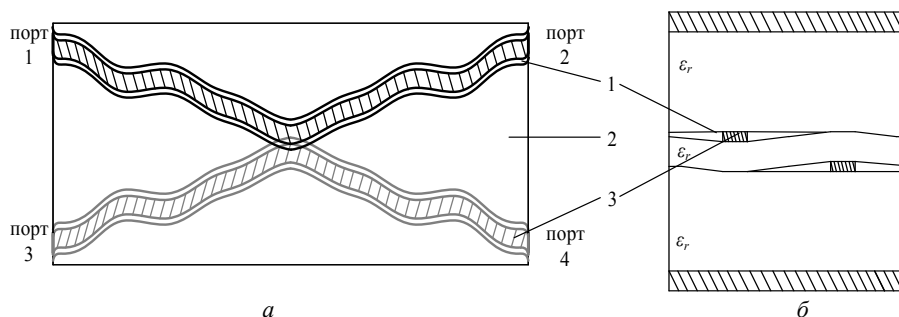


Рис. 1. Топология полосковых связанных линий с комбинированной связью, учитывающая воздушную полость между слоями диэлектрика: 1 – воздушная полость; 2 – диэлектрик; 3 – линия передачи; вид сверху – а, поперечное сечение – б

Экспериментальный макет имеет ряд отличий от модели. Так, например, в модели не учитывались такие особенности, как искажение формы среднего слоя диэлектрика, наличие коаксиально-полосковых переходов и другие неоднородности, образующиеся в результате производства и сборки НО. Таким образом, в силу конструктивных особенностей размер воздушной полости для коррекции частотных характеристик будет различным для каждого ответвителя. Для исследования был проведён ряд экспериментов с использованием направленного ответвителя диапазона 2–20 ГГц производства АО «НПФ «Микран». Первый этап экспериментов был направлен на поиск наиболее подходящего материала для компенсации воздушной полости. В качестве критериев выбора служили гибкость, эластичность и диэлектрическая проницаемость, которая должна быть близкой к ди-

электрической проницаемости диэлектрика, на основе которого построен НО. В нашем случае это Rogers RT/Duroid 5880 с относительной диэлектрической проницаемостью среднего слоя  $\epsilon_r = 2,2$ ; у верхнего и нижнего слоёв  $\epsilon_r = 2,33$ . В рамках эксперимента были рассмотрены такие материалы, как сухая бумага ( $\epsilon_r = 2-2,5$ ), силиконовая резина ( $\epsilon_r = 2,8-3,2$ ) и фторопластовая лента PTFE ( $\epsilon_r = 1,9-2,2$ ). Толщина всех материалов была одинаковой и составляла 0,12 мм.

Результаты эксперимента показали, что потери в основном канале и переходное ослабление слабо изменяются, а модуль коэффициента отражения от первого порта  $|S_{11}|$  (рис. 2) и направленность  $D$  (рис. 3) сильно зависят от типа используемого материала. Как и следовало ожидать, в силу больших различий относительной диэлектрической прони-

цаемости силиконовая резина имеет худший из результатов при оценке модуля коэффициента отражения. В данном случае на некоторых частотах его значение превышает уровень в 20 дБ, в то время как остальные эксперименты показывают примерно одинаковый результат. Оценивая частотную зависимость направленности, видно, что отсутствие компенсирующего диэлектрика приводит к значительному снижению её уровня на частотах выше 10 ГГц, а наилучший результат – при компенсации воздушной полости фторопластовой лентой.

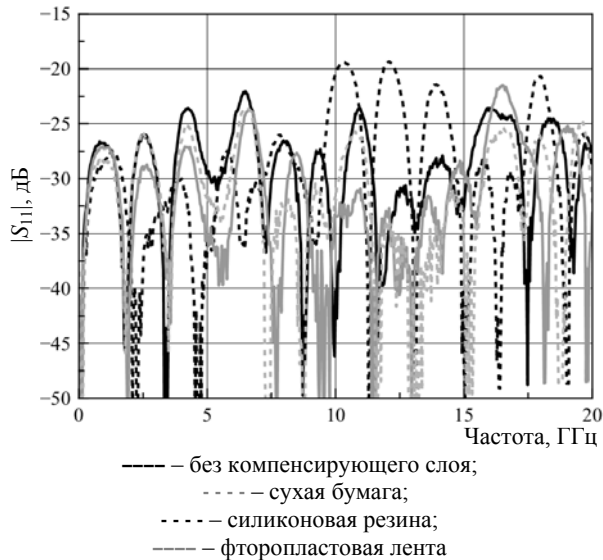


Рис. 2. Частотная зависимость модуля коэффициента отражения от первого порта для различных материалов

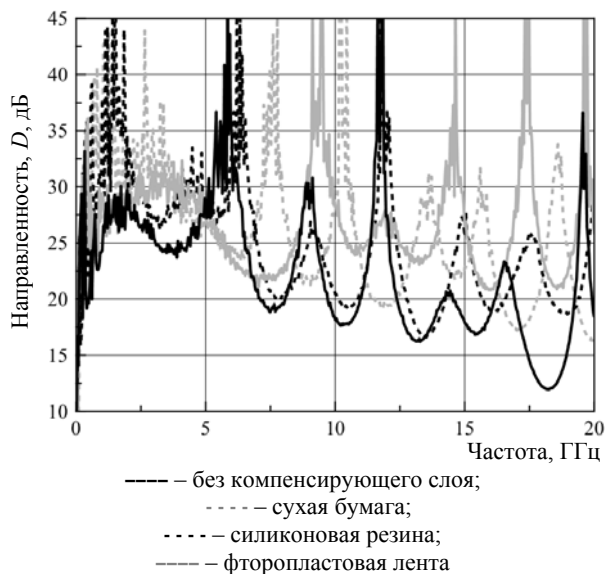


Рис. 3. Частотная зависимость направленности для различных материалов

Цель второго этапа экспериментов заключалась в определении оптимального размера воздушной полости, при котором наблюдается улучшение частотных характеристик. При этом, по результатам экспериментов предыдущего этапа, для исследования был выбран материал – фторопластовая лента.

Величина воздушной полости регулировалась путем варьирования расстояния  $x$  от токонесущего проводника до ленты (рис. 4). По причине сложности обеспечения фиксированного размера этой полости вдоль линии было решено упростить форму диэлектрических слоёв до прямоугольной.

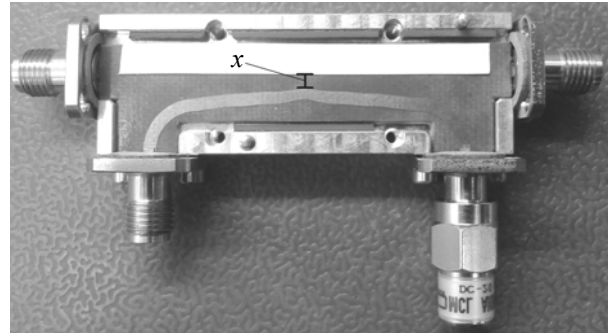


Рис. 4. Топология платы НО с фторопластовой лентой

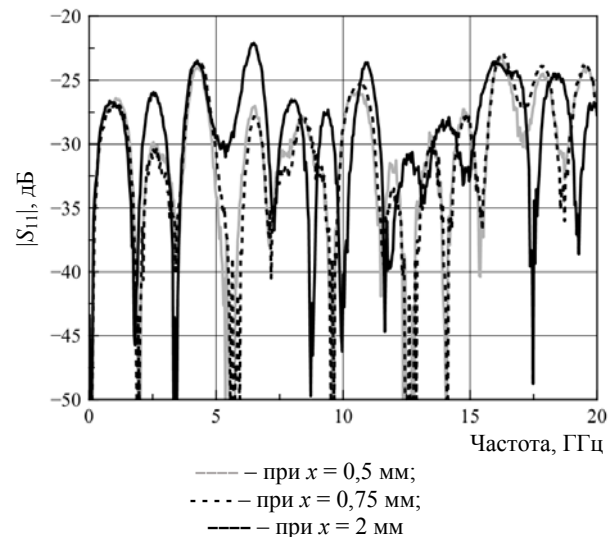


Рис. 5. Частотная зависимость модуля коэффициента отражения от первого порта при различных размерах воздушной полости

В результате экспериментальных измерений выявлено, что изменение размеров воздушной полости почти не оказывает влияния на переходное ослабление и потери в основном канале. При этом изменяются значения модуля коэффициента отражения от первого порта  $|S_{11}|$  (рис. 5) и направленности  $D$  (рис. 6) устройства. Так, при  $x = 0,5$  и  $0,75$  мм на некоторых частотах очевидно преимущество в несколько децибел в сравнении с результатами, полученными при  $x = 2$  мм.

В свою очередь, значительные различия наблюдаются при сравнении уровня направленности исследуемого устройства. Если на частотах до 10 ГГц преимущество образца с  $x = 0,75$  мм не выглядит явным, то на частотах выше 10 ГГц заметно повышение уровня направленности. Её величина во всём рабочем частотном диапазоне не опускается ниже 20 дБ, в то время как остальные варианты размеров

воздушной полости приводят к ухудшению этой характеристики.

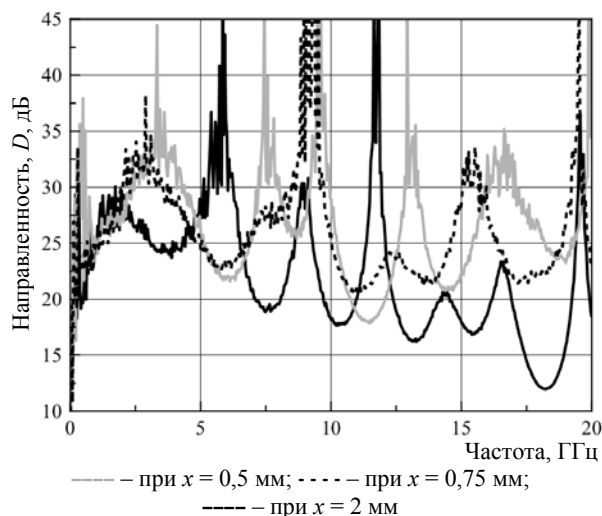


Рис. 6. Частотная зависимость направленности при различных размерах воздушной полости

Таким образом, по результатам проведённых исследований можно заключить следующее:

1. Обеспечение воздушной полости определённых размеров, образующейся в результате сборки симметричных направленных ответвителей на основе нерегулярных полосковых линий с комбинированной связью, позволяет повысить направленность и улучшить согласование устройства.
2. Материал, используемый в качестве компенсирующего элемента, должен обладать высокой гибкостью и эластичностью, а его диэлектрическая проницаемость должна быть максимально близка к диэлектрической проницаемости материала, на котором выполнена топология направленного ответвителя.

#### Литература

1. Filatov A.V. A microwave four-channel null L-band radiometer / A.V. Filatov, A.V. Ubaichin, D.E. Paraev // Instruments and Experimental Techniques. – 2012. – Vol. 55, № 1. – P. 59–64.
2. Filatov A.V. A two-receiver microwave radiometer with high transfer characteristic linearity / A.V. Filatov, A.V. Ubaichin, A.A. Bombizov // Measurement Techniques. – 2013. – Vol. 55, № 11. – P. 1281–1286.

3. Анализ модели направленного ответвителя на основе нерегулярных полосковых линий с комбинированной связью / А.Ю. Попков и др. // Доклады ТУСУРа. – 2015. – № 4 (38), ч. 1. – С. 5–11.

#### Гошин Геннадий Георгиевич

Д-р физ.-мат. наук, профессор каф. сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники (СВЧКР)  
Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)  
Тел.: +7 (382-2) 79-91-75  
Эл. почта: goshingg@svch.rk.tusur.ru

#### Зорин Андрей Валерьевич

Сотрудник департамента информационно-измерительных систем (ДИИС) АО «НПФ «Микран»  
Тел.: +7-953-910-43-19  
Эл. почта: zandreyv@sibmail.com

#### Подлиннов Сергей Александрович

Аспирант каф. СВЧКР  
Тел.: +7-952-808-17-35  
Эл. почта: spodlinnov@gmail.com

#### Попков Александр Юрьевич

Ассистент каф. СВЧКР  
Тел.: +7-923-401-92-75  
Эл. почта: payu.9275@gmail.com

#### Фатеев Алексей Викторович

Канд. техн. наук, доцент каф. СВЧКР  
Тел.: +7-906-199-98-88  
Эл. почта: fateev\_alexey@mail.ru

Goshin G.G., Zorin A.V., Podlinnov S.A.,  
Popkov A.Yu., Fateev A.V.

#### Research on ways to increase the directivity of symmetrical directional couplers 2–20 GHz

Research on possible using of the air gap, that appears as a result of an assembly of a symmetric directional coupler based on irregular offset strip lines, to adjust its frequency response is carried out. The adjustment is produced by an additional material that is set up between main dielectric layers of the device. The main criteria to select the material were its flexibility, elasticity and dielectric permittivity.

**Keywords:** directional coupler, directivity, coupling.



УДК 621.372

А.Н. Сычев, С.М. Стручков, Ф.И. Шеерман

## Направленный ответвитель 20 дБ на связанных линиях с круглыми проводниками в прямоугольном экране

Представлены результаты моделирования и измерений направленного ответвителя со слабой связью 20 дБ для измерительных систем, работающих в диапазоне частот 1–4 ГГц. Связанные линии выполнены в виде круглых проводников, помещенных в прямоугольный экран. Новая модель построена в квазистатическом приближении с использованием подхода синфазно-противофазного возбуждения и метода численных конформных отображений Кристоффеля–Шварца. При этом двусвязные области поперечного сечения линий сводятся к односвязным с помощью магнитных разрезов, а круглые границы проводников аппроксимируются многоугольными. Приводятся карты электромагнитного поля. Результаты моделирования хорошо согласуются с экспериментом.

**Ключевые слова:** направленный ответвитель, связанные линии, круглый проводник, слабая связь.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2016-19-3-8-10

Направленный ответвитель (НО) является одним из ключевых компонентов разнообразных СВЧ-устройств и систем. При этом в измерительных системах, как правило, требуются широкополосные ответвители со слабой связью, в которых полоса рабочих частот превышает октаву, и связь поддерживается на уровне 15–20 дБ. Такого типа ответвители исследуются и разрабатываются уже достаточно долгое время [1], однако при возникновении новых практических задач каждый раз выполняется поиск согласованных с современным уровнем техники конструкторско-технологических решений. Нужны экономически обоснованные технологичные конструкции устройств. При этом новые решения зачастую требуют построения оригинальных электродинамических и квазистатических моделей.

### Постановка задачи

В данной работе требуется спроектировать одноступенчатый (четвертьволновый) противонаправленный НО (рис. 1). Этот тип НО отличается простотой реализации и обеспечивает достаточную для большого числа практических применений ширину полосы рабочих частот [1, с. 57]. При этом однородное воздушное заполнение структуры помогает нивелировать довольно значимую проблему деградации направленности, вызванную неравенством скоростей нормальных волн (синфазной и противофазной), с которой приходится сталкиваться при проектировании НО в полосковом исполнении с использованием диэлектрических подложек [2]. Прямоугольный экран в сравнении с круглым [3] является достаточно простой конструкцией. Проводники круглого сечения весьма технологичны, хотя несколько сложнее в моделировании, чем прямоугольные.

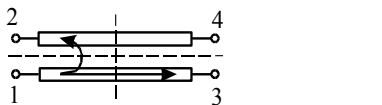


Рис. 1. Противонаправленный ответвитель на связанных линиях с двумя плоскостями симметрии

Итак, прежде всего требуется построить квазистатическую модель круглых слабосвязанных линий в прямоугольном экране, обладающих межлинейной

симметрией (рис. 2). Для этого будет применена оригинальная методика моделирования на основе численного метода конформных преобразований с использованием интеграла Кристоффеля–Шварца [4, 5]. Методика будет реализована на компьютере в среде MATLAB.

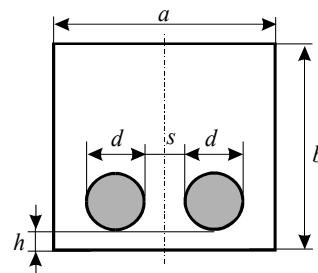


Рис. 2. Поперечное сечение связанных линий в прямоугольном экране с круглыми проводниками и воздушным заполнением

### Методика моделирования

Анализируемая конструкция связанных линий (см. рис. 2), являющаяся основой направленного ответвителя, характеризуется следующими параметрами:  $d$  – диаметр проводников;  $s$  – зазор между проводниками;  $h$  – расстояние между проводниками и нижним экраном;  $a$  – ширина корпуса;  $b$  – высота корпуса.

Учёт межлинейной симметрии связанных линий позволяет применить подход синфазно-противофазного возбуждения, в котором одна общая задача анализа связанных линий сводится к двум частным задачам анализа одиночных линий. При этом в случае синфазного (чётного) возбуждения в межлинейной вертикальной плоскости симметрии устанавливается магнитная (непроницаемая) стенка, а в случае противофазного (нечётного) возбуждения в плоскости симметрии устанавливается электрическая (проводящая) стенка. Таким образом, из исходной структуры (см. рис. 2) формируется две полуструктуры – синфазная (чётная) и противофазная (нечётная). Они представляют собой одиночные линии передачи в прямоугольном корпусе, их модели будут построены ниже.

Теперь заметим, что области поперечного сечения полуструктур являются двусвязными, т.е. имеют две границы – внешнюю по корпусу и внутреннюю по контуру круглого проводника. Но чтобы применить отображение Кристоффеля–Шварца, необходимо иметь односвязную область. Поэтому с целью корректного преобразования двусвязных областей в односвязные вводится в каждую из них магнитный разрез (предположительно совпадающий с одной из силовых линий поля), соединяющий круглый внутренний проводник и ту внешнюю сторону корпуса, где расположена плоскость симметрии [6]; для синфазной полуструктуры – это магнитная стенка, а для противофазной – электрическая.

Получив односвязные полуструктуры, для каждой из них формируется интеграл Кристоффеля–Шварца, позволяющий отобразить многоугольную область на верхнюю полуплоскость. При этом круглый проводник адекватно аппроксимируется 24-угольником. Далее верхняя полуплоскость конформно отображается на область плоского конденсатора, и задача определения погонной ёмкости полуструктуры становится легко решаемой. В итоге по погонным ёмкостям полуструктур вычисляются основные параметры связанных линий (см. рис. 2) [6], это – характеристический импеданс  $Z_0$  и коэффициент связи  $k$ .

Изложенная методика реализована на компьютере в среде MATLAB с использованием пакета SC Toolbox [4].

#### Численные результаты

Компьютерные вычисления по данной методике позволяют получать не только основные параметры связанных линий, но и карты поля, т.е. распределение силовых и эквипотенциальных линий электрического поля квази-Т-волны для полуструктур при синфазном (с магнитной стенкой) и противофазном (с электрической стенкой) возбуждениях (рис. 3).

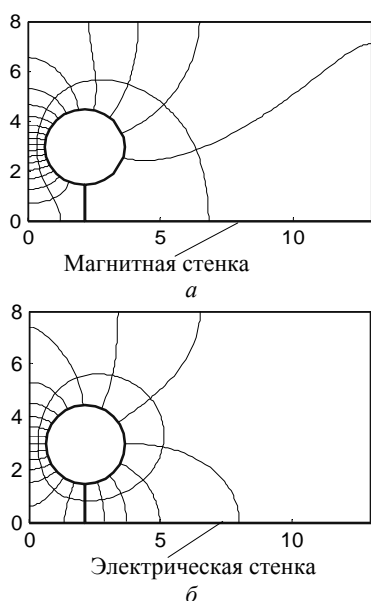


Рис. 3. Карты электрического поля для полуструктур синфазного (а) и противофазного (б) возбуждений

Априорно задав неизменяемые параметры конструкции – размеры корпуса  $a = 16$  мм;  $b = 13$  мм и диаметр проводников  $d = 3$  мм (см. рис. 2), выполнялось проектирование направленного ответителя. Проектирование заключалось в многократном анализе (параметрической оптимизации) по данной методике и дало следующие оставшиеся параметры конструкции связанных линий: зазор между проводниками  $s = 2,9$  мм; расстояние между проводниками и нижним экраном  $h = 0,65$  мм. Расчёт этой конструкции приводит к следующим электрическим рабочим параметрам: характеристический импеданс  $Z_0 = 50,3$  Ом; коэффициент связи  $k = 0,116$  ( $C = 18,7$  дБ).

#### Эксперимент

Полученное в предыдущем разделе проектное решение было взято за основу при изготовлении прототипа НО, показанного на рис. 4 и 5.



Рис. 4. Направленный ответитель в сборе

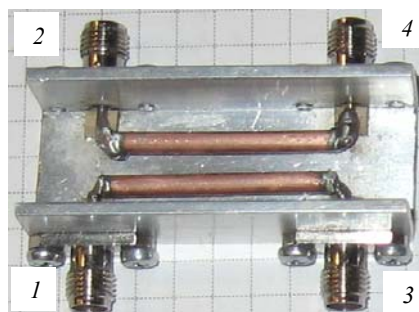


Рис. 5. Направленный ответитель в корпусе со снятой крышкой с обозначением номеров портов

Корпус был изготовлен из стандартного дюралюминиевого швеллера  $20 \times 15$  с толщиной стенок 2 мм, а проводники линий длиной 30 мм – из стандартного медного прутка диаметром 3 мм.

Измеренные  $S$ -параметры НО в зависимости от частоты показаны на рис. 6.

Из графиков видно, что в полосе частот (1...4) ГГц связь  $|S_{21}|$  составляет (19...23) дБ; согласование  $|S_{11}|$  лучше 18 дБ; рабочее затухание  $|S_{31}|$  не более 0,34 дБ; развязка  $|S_{41}|$  не хуже 27 дБ, а наилучшая – 44 дБ. Итак, результаты эксперимента показали, что даже односекционный НО способен в двухоктавной полосе частот обеспечить слабую связь 20 дБ с практически приемлемой погрешностью, не превышающей  $(-1...+3)$  дБ.

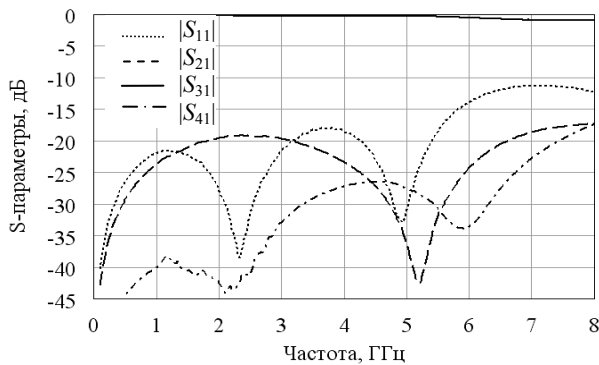


Рис. 6. Экспериментально измеренные частотные зависимости  $S$ -параметров направленного ответвителя

### Заклучение

Таким образом, представлены результаты моделирования и измерений направленного ответвителя со слабой связью 20 дБ для измерительных систем, работающих в диапазоне частот (1...4) ГГц. Связанные линии выполнены в виде круглых проводников, помещенных в прямоугольный экран. Новая модель, реализованная в среде MATLAB, построена в квазистатическом приближении с использованием подхода синфазно-противофазного возбуждения и метода численных конформных отображений Кристоффеля-Шварца. При этом двусвязные области поперечного сечения линий сводятся к односвязным с помощью магнитных разрезов, а круглые границы проводников аппроксимируются многоугольными. Приводятся карты электромагнитного поля. Результаты моделирования согласуются с экспериментом с приемлемой для практики точностью.

Работа выполнена при финансовой поддержке прикладных научных исследований Министерством образования и науки РФ. Уникальный идентификатор ПНИЭР RFMEFI57715X0179.

### Литература

1. Мещанов В.П. Автоматизированное проектирование направленных ответвителей СВЧ / В.П. Мещанов, А.Л. Фельдштейн. – М.: Связь, 1980. – 144 с.
2. Анализ модели направленного ответвителя на основе нерегулярных полосковых линий с комбинированной связью / А.Ю. Попков и др. // Доклады ТУСУРа. – 2015. – № 4 (38), ч. 1. – С. 5–11.
3. Sychev A.N. Numerical conformal transformations for modeling of an eccentric shielded pair / A.N. Sychev, M.A. Chekalin, S.M. Struchkov, V.N. Putilov // 24th Int. Crimean Conf. «Microwave & Telecommunication Techno-

logy» (CriMiCo'2014), 7–13 Sept. 2014, Sevastopol, Crimea, Russia. – P. 125–126.

4. Driscoll T.A. Schwarz–Christoffel mapping / T.A. Driscoll, L.N. Trefethen. – Cambridge: Cambridge Univ. Press., 2002. – 132 p.

5. Сычев А.Н. Комбинированный метод частичных емкостей и конформных отображений для анализа многомодовых полосковых структур. – Томск: Том. гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники, 2007. – 138 с.

6. Sychev A.N. Analysis of the broad-side coupled lines on the vertical substrate using the numerical conformal transformations / A.N. Sychev, M.E. Dolgushin // Proc. 20-th Int. Crimean Conf. «Microwave & Telecommunication Technology» (CriMiCo'2010), Sept. 13–17, 2010. – Sevastopol: Crimea, 2010. – P. 636–638.

### Сычев Александр Николаевич

Д-р техн. наук, профессор каф. компьютерных систем в управлении и проектировании (КСУП) ТУСУРа  
Тел.: +7 (382-2) 41-47-17  
Эл. почта: ans@main.tusur.ru

### Стручков Сергей Михайлович

Аспирант каф. КСУП  
Тел.: +7 (382-2) 41-47-17  
Эл. почта: struchkov.sm@gmail.com

### Шеерман Федор Иванович

Канд. техн. наук, доцент каф. КСУП  
Тел.: +7-913-805-94-54  
Эл. почта: fish@kcup.tusur.ru

Sychev A.N., Struchkov S.M., Sheyerman F.I.

### Coupled line directional coupler with round wires inside rectangular shield

The simulation and measurement results of the directional coupler with loose coupling of 20 dB for measuring systems operating in the frequency range of 1–4 GHz are presented. Coupled lines are formed as round wires, placed in the shield with a rectangular cross section. The model is built in a quasi-static approximation using the in-phase/out-of-phase excitation approach and Schwarz–Christoffel conformal mapping numerical technique. The doubly-connected cross-section regions are reduced to a simply-connected ones via magnetic slits, and round wires are approximated by polygonal boundaries. The electromagnetic field maps are given. The simulation results are in good agreement with experiment.

**Keywords:** directional coupler, coupled lines, round wire, loose coupling.

УДК 621.396.67

А.А. Былов, Ю.П. Саломатов

## Диаграммообразующая схема однозеркальной антенны Ку-диапазона на основе планарной фазированной антенной решетки отражательного типа

Разработана конструкция диаграммообразующей схемы в виде отражательной антенной решетки печатного исполнения. Кратко описаны этапы конструктивного синтеза отражательной антенной решетки, образующей плоский рефлектор. Рассмотрена возможность конкуренции спроектированного плоского зеркала с параболическим рефлектором, приведены рассчитанные характеристики однозеркальной антенны Ку-диапазона с плоским рефлектором, проведенные посредством электродинамического моделирования в САПР CST MWS.

**Ключевые слова:** диаграммообразующая схема, апертура, диаграмма направленности, антенная решетка, облучатель, рефлектор.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2016-19-3-11-15

Современная фазированная антенная решетка (ФАР) представляет собой довольно гибкую систему, обеспечивающую быстрое и безынерционное управление направленными свойствами антенны. Применение ФАР в антенной технике позволяет осуществлять электронное сканирование, получать высокие значения коэффициента усиления (КУ), изменять форму амплитудной диаграммы направленности (ДН) и тем самым адаптироваться к внешним условиям за кратчайшие промежутки времени, сопоставимые с временем задержки сигнала в тракте.

Неотъемлемой составной частью конструкции ФАР является система распределения и управления электромагнитной энергией, отвечающая за создание амплитудно-фазового распределения в апертуре антенны. Такая система называется диаграммообразующей схемой (ДОС) и состоит из множества элементов: фазовращателей, делителей, усилителей и т.д. Многоэлементные ДОС с принудительным питанием на линиях передачи вносят основной вклад в высокую стоимость современных ФАР, а исполнение всех высокочастотных элементов в едином блоке требует сложной технологии производства.

Компромиссом в сложившейся ситуации могут служить ФАР на основе ДОС с квазиоптическим питанием проходного и отражательного типа. Данные системы привлекают внимание разработчиков простотой конструкции, малым уровнем потерь энергии из-за отсутствия фидерного тракта питания, низкой стоимостью.

Особый интерес вызывают ФАР на базе ДОС отражательного типа (отражательные антенные решетки) в печатном исполнении, которые удобны тем, что имеют малый вес и могут быть конформными, что позволяет располагать их конструкцию, например, в обшивке либо на наружной поверхности космических, летательных аппаратов, не нарушая их аэродинамических свойств. Как правило, ДОС отражательного типа в печатном исполнении представляет собой плоский рефлектор в виде совокупности резонаторов (отражателей), дискретно расположенных на диэлектрической подложке. В отдельных случаях такие плоские рефлекторы с оп-

тическим возбуждением способны заменить параболические рефлекторы, которые сложны и дороги в изготовлении.

### Структура однозеркальной антенны с ДОС отражательного типа

В зависимости от расположения облучателя относительно рефлектора однозеркальные антенны подразделяются на осесимметричные и неосесимметричные.

Неосесимметричные однозеркальные антенны (НОА) по сравнению с осесимметричными позволяют за счет вынесенного облучателя минимизировать затенение апертуры рефлектора облучателем, тем самым понизить уровень излучения по боковым направлениям и значительно улучшить согласование в рабочем диапазоне частот.

Схематическое изображение НОА с плоским рефлектором на основе ДОС отражательного типа приведено на рис. 1.

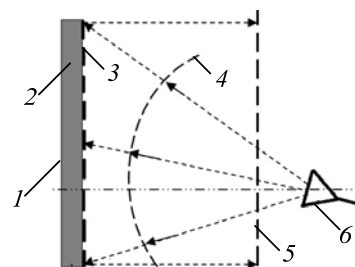


Рис. 1. Структурная схема НОА: 1 – металлизация; 2 – диэлектрическая подложка; 3 – ДОС отражательного типа (плоский рефлектор в виде отражательной антенной решетки); 4 – сферический фазовый фронт; 5 – плоский фазовый фронт; 6 – облучатель

Принцип действия такой структуры аналогичен работе параболической зеркальной антенны (ПЗА): плоский рефлектор должен при отражении сферической волны от облучателя обеспечивать выравнивание ее фазового фронта. Достигается это введением дополнительной фазовой задержки в элементах отражательной антенной решетки (ОАР).

Каждый отражающий элемент ОАР должен обеспечить компенсацию фазового набега электро-

магнитной волны, возникающего из-за разности хода лучей от облучателя до каждого из отражателей, за счет чего сферический фронт падающей электромагнитной волны преобразуется в плоский фронт, и тем самым достигается максимальный КУ.

#### Облучатель НОА Ку-диапазона

Основные требования, предъявляемые к облучателям НОА с плоским рефлектором, схожи с требованиями в случае использования параболического рефлектора [1]:

1. ДН облучателя должна быть однонаправленной, иметь осевую симметрию и минимальный уровень побочных лепестков. Для обеспечения высокого коэффициента использования поверхности (КИП) уровень облучения краев зеркала должен составлять примерно минус 10 дБ относительно максимального усиления.

2. Фазовый центр облучателя должен быть «точечным» и положение его не должно зависеть от направления.

3. Облучатель должен быть достаточно диапозонным и выдерживать заданную мощность электромагнитных волн без пробоя.

Волноводно-рупорные облучатели отвечают таким требованиям наиболее полно.

Облучение плоского рефлектора на основе ДОС отражательного типа производится коническим гофрированным рупором с уровнем облучения –12 дБ по краям относительно максимума. По сравнению с классическим оптимальным коническим рупором гофрированный рупор имеет меньшую длину и обеспечивает более осесимметричную ДН.

Модель облучателя Ку-диапазона и его габаритные размеры приведены на рис. 2, 3.



Рис. 2. Общий вид облучателя

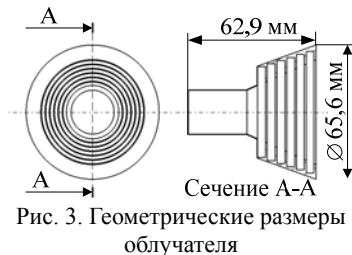


Рис. 3. Геометрические размеры облучателя

Максимальный коэффициент усиления (КУ) данного облучателя в диапазоне частот от 13 до 15 ГГц составляет не менее 15 дБ, поляризация – линейная. Направленные свойства облучателя на частоте 13 ГГц приведены на рис. 4.

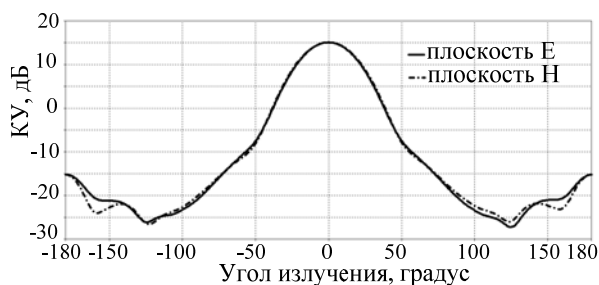


Рис. 4. ДН облучателя

Характеристика коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВН) облучателя приведена на рис. 5.

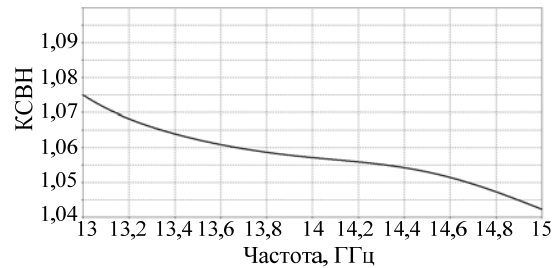


Рис. 5. КСВН облучателя

#### Конструктивный синтез плоского рефлектора НОА

Важным шагом в построении плоского рефлектора является выбор конфигурации отражательного элемента. Можно выделить следующие главные критерии, которые влияют на выбор данного элемента: коэффициент отражения, фаза отраженной электромагнитной волны, рабочая полоса частот, ширина ДН.

Конструктивный синтез отражателя проводится в три этапа:

1. Выбирается конфигурация отражателя, рассчитывается зависимость фазы отраженной электромагнитной волны от размеров отражателя и угла падения электромагнитной волны от облучателя. Распространенным методом расчета является использование модели бесконечной эквивалентной волноводной ячейки [2], имитирующей бесконечную периодическую структуру, состоящую из одинаковых элементарных ячеек. Для расчета фазовых характеристик элементов могут быть применены САПР, такие как CST Microwave Studio с использованием граничных условий Unit Cell либо прочие САПР электродинамического расчета при использовании магнитной и электрической стенок для создания ячейки Флоке. Зависимость фазы отраженной электромагнитной волны от геометрических размеров отражательного элемента должна быть определена максимально точно. Интервал между отражателями выбирается из условия отсутствия дифракционных лепестков в диаграмме направленности [3]:

$$d \leq \frac{\lambda}{1 + \sin \theta}, \quad (1)$$

где  $d$  – шаг между отражателями;  $\lambda$  – длина электромагнитной волны в свободном пространстве;  $\theta$  – угол поворота облучателя относительно нормали плоского рефлектора.

2. Рассчитывается фазовый набег падающей электромагнитной волны от облучателя в точках расположения отражателей на плоском рефлекторе. Фазовый набег падающей электромагнитной волны определяется из геометрических вычислений по следующей формуле:

$$\phi_i = \left( \frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \right) \cdot R_i, \quad (2)$$



где  $\phi_i$  – фазовый набег электромагнитной волны на  $i$ -м излучателе (градусы);  $\lambda$  – длина электромагнитной волны в свободном пространстве (м);  $R_i$  – расстояние от облучателя до  $i$ -го отражателя (м);  $i$  – номер отражателя на плоском рефлекторе.

3. На основании расчетов в первых двух этапах определяется размер каждого элемента отражательной антенной решетки плоского рефлектора, при котором фаза коэффициента отражения электромагнитной волны скомпенсирует фазовый набег падающей волны для каждого из отражателей (обеспечит выравнивание сферического фазового фронта облучателя).

Вид отражателя, используемого в построении плоского рефлектора НОА Ку-диапазона, изображен на рис. 6.

Отражатель представляет собой квадратную рамку с окружностью в центре и выполнен на квадратной площадке диэлектрика (материал Rogers 4003) толщиной  $t_1=0,8$  мм и стороной  $w=16$  мм. Диэлектрик экранирован с противоположной сторо-

ны, расстояние между экраном и диэлектриком составляет  $t_2=3$  мм. Внутренняя сторона ( $s$ ) квадратной рамки отражателя, а также диаметр окружности ( $d$ ) связаны между собой через размер внешней стороны  $l$  с помощью коэффициентов  $k_1=0,3$ ,  $k_2=0,8$  ( $s=l \cdot k_2$ ,  $d=l \cdot k_1$ ).

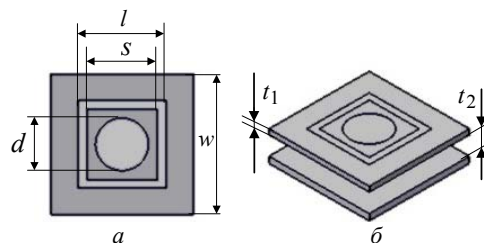


Рис. 6. Элементарный отражатель: а – топология; б – изометрический вид

Зависимости фазы  $\psi$  коэффициента отражения электромагнитной волны от параметра  $l$  и различных углов падения  $\theta$  электромагнитной волны на плоскость отражателя приведены на рис. 7, 8.

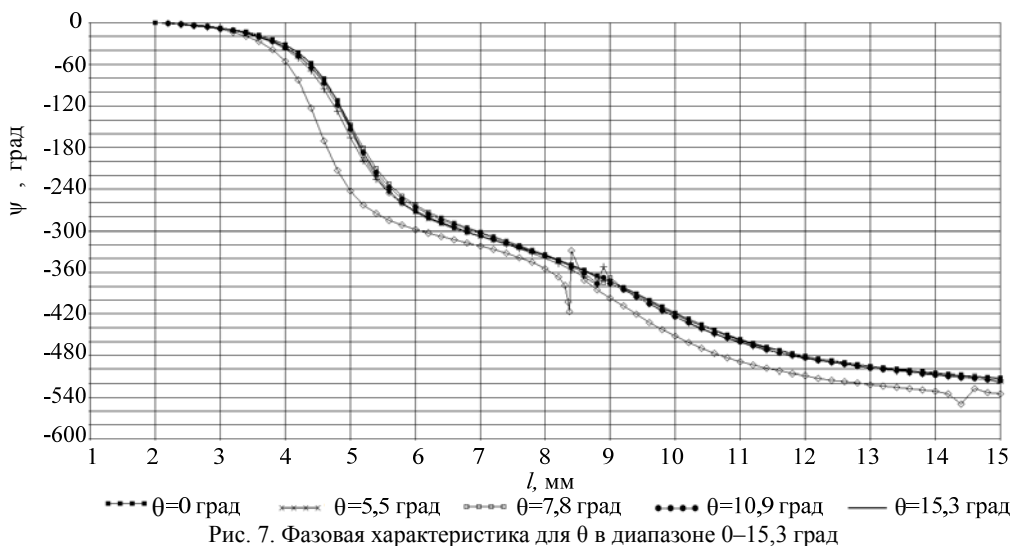


Рис. 7. Фазовая характеристика для  $\theta$  в диапазоне 0–15,3 град

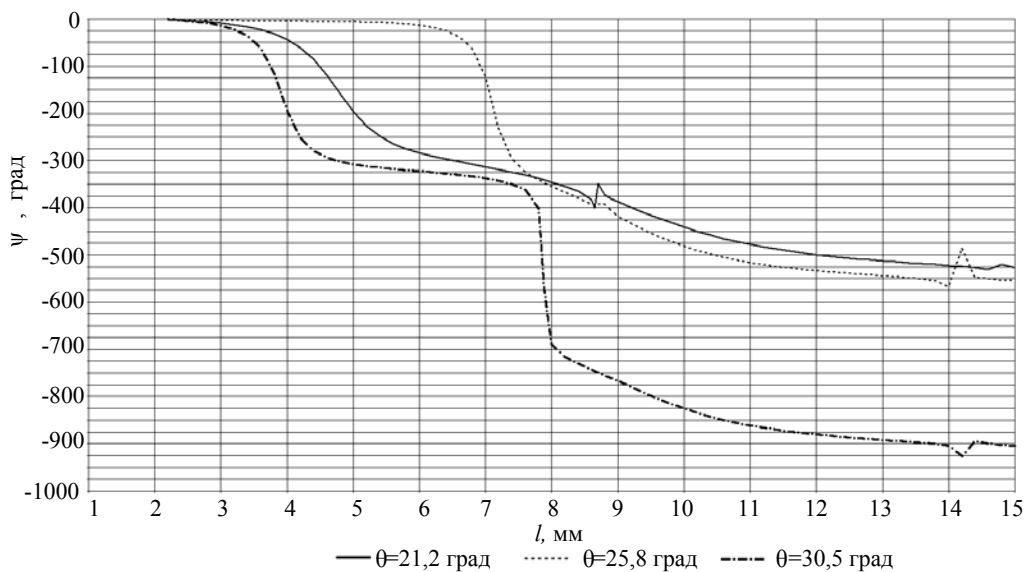


Рис. 8. Фазовая характеристика для  $\theta$  в диапазоне 21,2–30,5 град

Конструкция разработанной НОА с плоским рефлектором в печатном исполнении изображена на рис. 9.

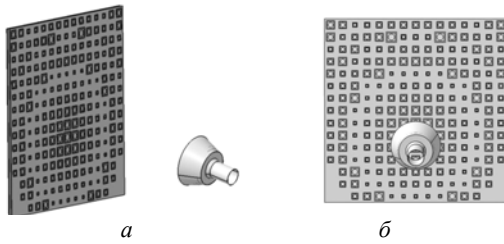


Рис. 9. НОА Ку-диапазона:

*a* – изометрический вид; *б* – вид в плоскости рефлектора

Рассчитанный плоский рефлектор на основе ДОС отражательного типа представляет собой квадратную апертуру площадью 24×24 см и включает в себя 217 отражательных элементов.

#### Результаты

На рис. 10–13 представлены направленные свойства и электрические характеристики разработанной однозеркальной антенны Ку-диапазона с плоским рефлектором в печатном исполнении, полученные посредством электродинамического моделирования в САПР CST MWS в полосе частот от 13 до 15 ГГц.

#### Заклучение

Анализируя полученные результаты электродинамического моделирования однозеркальной антенны Ку-диапазона в полосе частот от 13 до 15 ГГц, можно заметить следующее:

- уровень боковых лепестков составляет не более –15 дБ;
- угол максимального излучения согласно рис. 10 составляет примерно 160 градусов, что можно объяснить привязкой электродинамической модели антенны к системе координат, направленной противоположно максимальному излучению. Таким образом, главный лепесток отклонен на 20° относительно нормали к плоскому рефлектору;
- максимальный КУ согласно рис. 12 составляет не менее 23 дБ;
- КСВН не хуже –17 дБ;
- ширина главного лепестка по уровню –3 дБ почти неизменна.

Для сравнения рассчитаем КУ для параболической зеркальной антенны (ПЗА) с рефлектором, имеющим площадь апертуры, эквивалентную апертуре плоского рефлектора спроектированной антенны, по следующей формуле [4]:

$$G = 10 \cdot \log \left[ \frac{(4 \cdot \pi^2 \cdot R^2)}{\lambda^2} \cdot 0,6 \right], \quad (3)$$

где  $G$  – КУ ПЗА (дБ);  $R$  – радиус зеркала ПЗА (м);  $\lambda$  – длина электромагнитной волны в свободном пространстве (м).

В данном случае  $R = 0,112$  м, и КУ ПЗА на частоте 14 ГГц согласно расчету по вышеприведенной формуле составляет 28 дБ. Сравнивая полученный результат с максимальным КУ антенны с плоским рефлектором, приведенным на рис. 12, можно сделать вывод, что КУ ПЗА на 2,4 дБ выше.

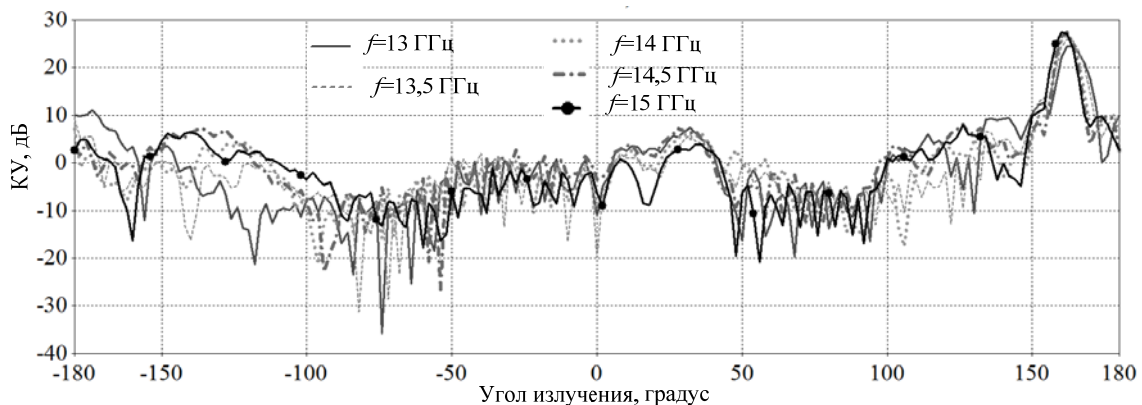


Рис. 10. ДН в Е-плоскости

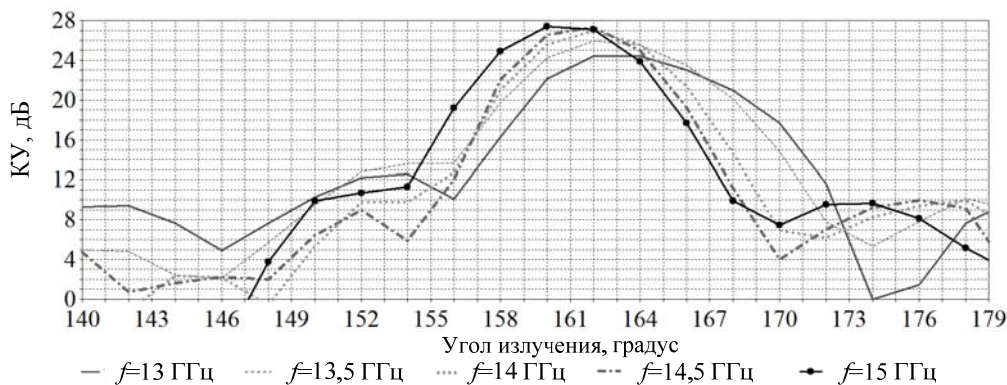


Рис. 11. ДН главного лепестка в Е-плоскости

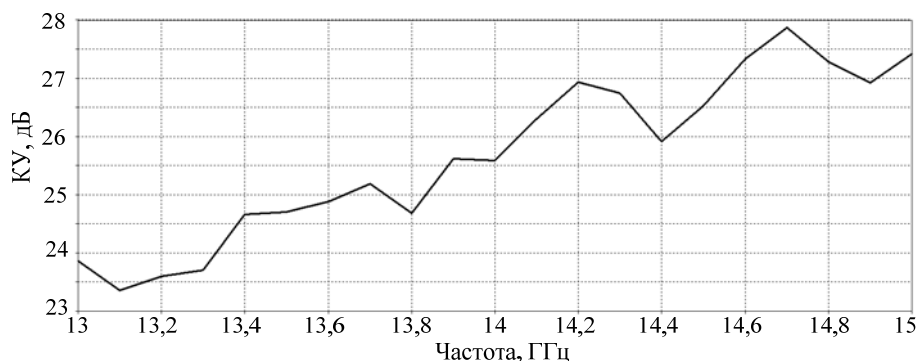


Рис. 12. Максимальный КУ

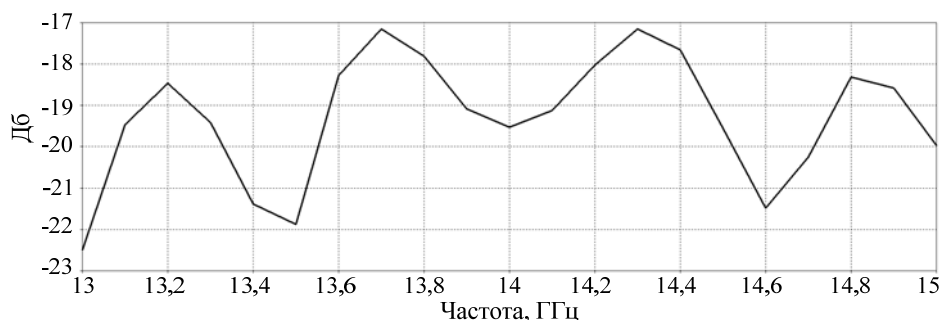


Рис. 13. Коэффициент отражения

Данное расхождение можно объяснить дискретным расположением элементарных отражателей на плоском рефлекторе, вследствие чего КИП меньше, чем КИП параболического рефлектора с эквивалентной апертурой.

Таким образом, разработанная антенна Ku-диапазона может конкурировать с ПЗА не только благодаря применению в производстве более простой технологии изготовления, но и по электрическим характеристикам.

#### Литература

1. Драбкин А.Л. Антенно-фидерные устройства / А.Л. Драбкин, В.Л. Зузенко, А.Г. Кислов. – Изд. 2-е. – М.: Сов. радио, 1974. – 536 с.
2. Feng-Chi E.Tsai. Designing a 161-element ku-Band microstrip reflectarray of variable size patches using an equivalent unit cell waveguide approach / E.Tsai Feng-Chi, M.E. Bialkowski // IEEE transactions on antennas and propagation. – 2003. – Vol. 51, No. 10. – P. 2953–2962.
3. Huang J. Reflectarray antennas / J.Huang, A. Encinar. – New Jersey: A John Wiley & Sons, 2008. – 216 p.
4. Фролов О.П. Антенны и фидерные тракты для радиорелейных линий связи. – М.: Радио и связь, 2001. – 416 с.

#### Былов Алексей Андреевич

Инженер АО «Информационные спутниковые системы» им. ак. М.Ф. Решетнева», г. Железногорск, аспирант каф. радиотехники Сибирского федерального университета (СФУ)  
Тел.: +7-950-970-96-80  
Эл. почта: AlexeyBylov1986@ya.ru

#### Саломатов Юрий Петрович

Канд. техн. наук, профессор, зав. каф. радиотехники СФУ  
Тел.: 8 (391-2) 91-22-78  
Эл. почта: YSalomatov@sfu-kras.ru

Bylov A.A., Salomatov Y.P.

#### Beamforming scheme of single-reflector Ku-band antenna based on the reflection type planar phased array antenna

The object of this article is beamforming scheme based on printed phased Ku-band reflectarray. The structure of this reflectarray and the topology of simple resonator are described. The ability of competition with parabolic reflector antennas despite the lower values of the coefficient of surface utilization was shown. It was found that the developed Ku-band reflectarray meets modern requirements for antenna systems. The resultant radio characteristics of designed reflectarray are given in the conclusion of the article.

**Keywords:** aperture, beamforming scheme, directivity pattern, array, antenna feed, reflector.

УДК 621.372.88

Ю.В. Крылов

## Проектирование волноводного трансформатора для широкополосного облучателя зеркальных антенн

Рассмотрены методы расчета волноводного трансформатора, показаны основные принципы проектирования данного устройства, входящего в состав ортомодового селектора частотно-поляризационного устройства облучателя зеркальных антенн или глобальных рупорных антенн. Проведен сравнительный анализ расчета мод, распространяющихся в трансформаторе, аналитическим методом и путем моделирования в CST Microwave Studio. При реализации ортомодового селектора по схеме с прямым высокочастотным выходом в трансформаторе возникают высшие типы волн, которые оказывают влияние на распространение волны основного типа. Из-за отсутствия решений данной проблемы при большом разбросе частотных диапазонов приема и передачи представлен разработанный способ подавления влияния высших мод, возникающих в волноводе большего диаметра.

**Ключевые слова:** облучатель, ортомодовый селектор, волноводный трансформатор, высшие моды.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2016-19-3-16-20

С развитием антенной техники спутниковой связи к облучателям зеркальных антенн или к глобальным рупорным антеннам предъявляются все более жесткие требования по ширине рабочих диапазонов частот, по работе с сигналами различной поляризации, а также совмещению каналов приема и передачи в одном облучателе. Все эти функции в облучателе выполняет входящий в его состав частотно-поляризационный селектор.

Существует несколько схем частотно-поляризационных селекторов [1], предназначенных для разделения сигналов приема и передачи с различными поляризациями, но все они имеют в своем составе ортомодовый селектор, представляющий собой волновод круглого сечения с поперечным крестовым разветвлением, служащим для разделения двух ортогональных плоскостей поляризации моды  $H_{11}$ . Из ортомодовых селекторов, в свою очередь, также можно выделить два типа. Они различаются лишь тем, какой сигнал рабочего диапазона частот (высокочастотный или низкочастотный) будет выделяться с торцевого (прямого) выхода ортомодового селектора. В зависимости от того, какой сигнал выделяется на прямом выходе селектора, значительно меняется форма волновода круглого сечения.

### Виды ортомодовых селекторов

В ортомодовом селекторе, в котором обеспечивается выделение высокочастотного сигнала с прямого выхода селектора, необходимо спроектировать плавный переход между волноводом большего диаметра сечения и волноводом меньшего диаметра, тем самым сделав возможным прием сигнала на основном типе колебаний и отражение передающего сигнала в область крестового разветвления [2, 3].

По второму принципу построения ортомодового селектора при передаче низкочастотного сигнала к торцевому выходу селектора необходимо подключить фильтр нижних частот для отражения высокочастотного сигнала в область крестового разветвления. Ортомодовый селектор, построенный по такому принципу, обладает недостатком, а именно – узкополосностью фильтра нижних частот, по сравнению с

селектором, у которого с прямого выхода выделяется высокочастотный сигнал. Таким образом, ввиду жестких требований, предъявляемых к современным спутникам связи, а именно по ширине рабочей полосы частот, данный способ построения ортомодового селектора представляется наименее перспективным.

При проектировании ортомодового селектора, с прямого выхода которого выделяется высокочастотный сигнал, необходимо иметь в виду, что при таком построении устройства в области волновода большего диаметра возникают высшие моды, которые, в свою очередь, оказывают негативное влияние при работе на основном типе волн  $H_{11}$ . В данной статье представлено исследование по подавлению влияния высших мод в ортомодовом селекторе с торцевым высокочастотным выходом.

### Моделирование и расчет волноводного трансформатора

Внешний вид рассматриваемого ортомодового селектора показан на рис. 1. Данное устройство включает в себя: 1 – волновод большего диаметра; 2 – волновод меньшего диаметра; 3 – трансформатор круглого волновода; 4 – прямоугольный волновод.

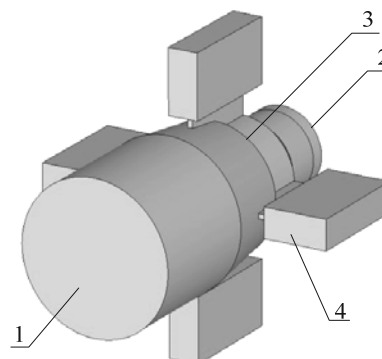


Рис. 1. Ортомодовый селектор

При использовании ортомодового селектора в облучателе зеркальной антенны к выходной части волновода 1 стыкуется рупор, другая сторона волновода соединяется с трансформатором 3, который

служит для согласования волноводов с различными диаметрами сечений. Волноводный трансформатор 3 также служит для того, чтобы потери энергии основной волны  $H_{11}$ , возбуждаемой в волноводе 2, на преобразование в волны высшего типа были минимальными. Крестовое разветвление, состоящее из четырех волноводов 4, предназначено для того, чтобы снять поляризационное вырождение волны  $H_{11}$  в низкочастотном диапазоне частот. Проектирование такого селектора необходимо в первую очередь начинать с волноводного трансформатора 3, лишь затем проводить расчет согласующего трансформатора волновода прямоугольного сечения 4. Продольный вид трансформатора без ортогональных плеч из волноводов прямоугольного сечения показан на рис. 2.

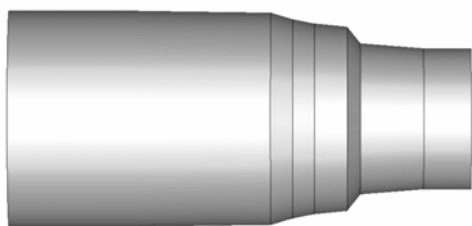


Рис. 2. Трансформатор волновода круглого сечения

Исследование волноводного трансформатора, показанного на рис. 2, проводилось в диапазонах частот: передача – 3,8–4,3 ГГц, прием – 5,9–6,4 ГГц. Моделирование осуществлялось в среде CST Microwave Studio (далее CST). Внутренний диаметр волновода большего диаметра, равный  $d_1 = 50$  мм, был выбран исходя из условия

$$(\lambda_{кр})_{E_{01}} \leq \lambda_0 \leq (\lambda_{кр})_{H_{11}}, \quad (1)$$

где  $\lambda_0 = 0,07$  м – длина волны, вычисленная на средней частоте диапазона 3,8–4,3 ГГц. Критические длины основной волны  $H_{11}$  и ближайшей высшей волны  $E_{01}$  могут быть определены как

$$\lambda_{кр} = \frac{\pi d}{q}, \quad (2)$$

где  $d$  – диаметр волновода,  $q = v_{mn}$  – корень производной функции Бесселя для волн  $H_{mn}$ , для волны  $E_{mn}$   $q = \varepsilon_{mn}$  – корень функции Бесселя [4].

Для волны  $H_{11}$   $(\lambda_{кр})_{H_{11}} = 1,71 \cdot d$ , для волны  $E_{01}$   $(\lambda_{кр})_{E_{01}} = 1,31 \cdot d$ . Аналогично вычисляется диаметр меньшего волновода, который оказался равным  $d_2 = 33$  мм. Длина переходного участка  $L$  между волноводом большего диаметра и волноводом меньшего диаметра выбирается исходя из условия

$$\lambda_0 < L < 2\lambda_0, \quad (3)$$

где  $\lambda_0 = 0,05$  м – длина волны, вычисленная на средней частоте диапазона 5,9–6,4 ГГц.

Следующим шагом при проектировании волноводного трансформатора стал расчет типов и количества волн, распространяющихся на выходе трансформатора (со стороны большего диаметра волновода). В волноводе большего диаметра на частотах приема, кроме основной волны, неизбежно возбуж-

даются и высшие типы волн, при расчете которых можно воспользоваться одним из параметров распространения той или иной моды. Первый из них – постоянная распространения волн.

Постоянную распространения  $\beta$  для волн  $H_{mn}$  и  $E_{mn}$  необходимо рассчитывать на самой высокой частоте рабочего диапазона  $f_0 = 6,4$  ГГц. Для волн  $H_{mn}$  она рассчитывается как

$$\beta = \sqrt{k^2 - \left(\frac{v_{mn}}{a}\right)^2}, \quad (4)$$

где  $a$  – радиус волновода большего диаметра;  $v_{mn}$  – корень производной функции Бесселя;  $k$  – волновое число,

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi f}{c}. \quad (5)$$

Для волн  $E_{mn}$  эта постоянная определяется по формуле

$$\beta = \sqrt{k^2 - \left(\frac{\varepsilon_{mn}}{a}\right)^2}, \quad (6)$$

где  $\varepsilon_{mn}$  – корень функции Бесселя.

Из приведенных выражений для волн  $H_{mn}$  и  $E_{mn}$  несложно сделать вывод об условии распространения той или иной волны в волноводе. Для волн  $H_{mn}$  условием распространения будет

$$\frac{2\pi f}{c} > \frac{v_{mn}}{a}, \quad (7)$$

для волн  $E_{mn}$  – соответственно

$$\frac{2\pi f}{c} > \frac{\varepsilon_{mn}}{a}. \quad (8)$$

Исходя из этих условий, можно определить, что в волноводе диаметром  $d_1$  в высокочастотном рабочем диапазоне распространяются кроме основного типа волны  $H_{11}$  еще высшие типы волн  $E_{01}$  и  $H_{21}$ . Рассчитаем постоянные распространения для этих типов волн. Постоянная распространения для волны  $H_{11}$  равна

$$\beta = \sqrt{\left(\frac{2\pi \cdot 6,4 \cdot 10^9}{3 \cdot 10^8}\right)^2 - \left(\frac{1,841}{0,025}\right)^2} = 112 \frac{1}{\text{м}}. \quad (9)$$

Постоянная распространения для волны  $E_{01}$

$$\beta = \sqrt{\left(\frac{2\pi \cdot 6,4 \cdot 10^9}{3 \cdot 10^8}\right)^2 - \left(\frac{2,405}{0,025}\right)^2} = 93,34 \frac{1}{\text{м}}. \quad (10)$$

Постоянная распространения для волны  $H_{21}$

$$\beta = \sqrt{\left(\frac{2\pi \cdot 6,4 \cdot 10^9}{3 \cdot 10^8}\right)^2 - \left(\frac{3,054}{0,025}\right)^2} = 55,17 \frac{1}{\text{м}}. \quad (11)$$

При моделировании в CST трансформатора, показанного на рис. 2, в настройках выходного порта (порт, установленный на большем сечении диаметра волновода  $d_1$ ) задавалось количество рассчитываемых мод, равное 10. Результаты расчета этих мод на частоте  $f_0 = 6,4$  ГГц приведены на рис. 3.



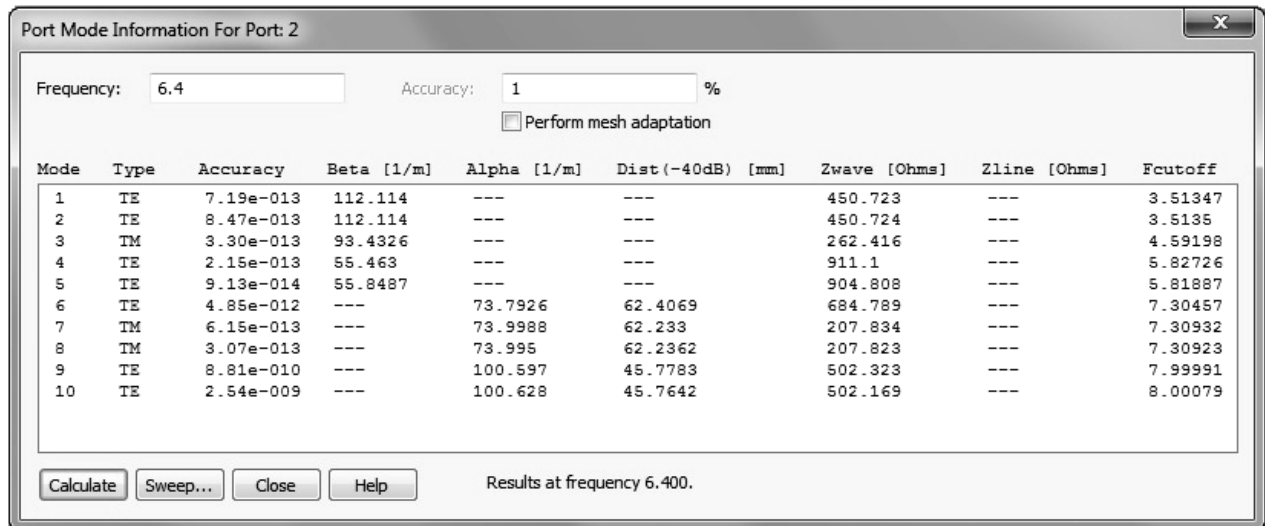


Рис. 3. Диалоговое окно расчета мод в среде CST Microwave Studio

Для удобства сравнения результаты моделирования и аналитических расчетов сведены в таблице. Из таблицы видно, что 1-я и 2-я мода, рассчитанные в CST, соответствует волне  $H_{11}$ , 3-я мода – волне  $E_{01}$ , 4-я и 5-я мода – волне  $E_{01}$ . Расхождение результатов расчетов постоянных распространения  $\beta$  аналитическим методом и моделированием – минимально. Из таблицы можно заметить, что в CST значения постоянных распространения  $\beta$  как 1-й и 2-й мод, так и 4-й и 5-й, совпадают, и это связано с вырождением волн  $H_{11}$  и  $H_{21}$  соответственно. Волны  $H_{11}$  и  $H_{21}$  имеют две плоскости поляризации, поэтому они могут быть ориентированы на выходе устройства двумя способами. Это также можно заметить, сравнив диаграммы поля 1-й и 2-й мод, 4-й и 5-й мод в поперечном сечении волновода, показанного на рис. 4.

#### Сравнение результатов расчета и моделирования

Мода	Моделирование		Расчет	
	Beta, 1/m	$F_{cutoff}$ , ГГц	$\beta$ , 1/m	$f_{кр}$ , ГГц
1	112,114	3,51347	112,0	3,516
2	112,114	3,5135	112,0	3,516
3	93,4326	4,59198	93,34	4,595
4	55,463	5,82726	55,17	5,832
5	55,8487	5,81887	55,17	5,832
6	-----	7,30457	-----	7,318

Другим критерием при расчете типов волн, распространяющихся в волноводе, могут быть критические частоты волн. Распространяться будут только те моды, критические частоты которых будут меньше рабочей частоты, в данном случае ниже самой верхней частоты  $f_0 = 6,4$  ГГц рабочего диапазона. Для волн  $E_{mn}$  критическая частота определяется как

$$f_{кр} = \frac{\epsilon_{mn} c}{2\pi a}, \quad (12)$$

для волн  $H_{mn}$

$$f_{кр} = \frac{\nu_{mn} c}{2\pi a}. \quad (13)$$

Рассчитаем критические частоты для волны  $H_{11}$ , для высших типов волн  $E_{01}$  и  $H_{21}$ , а также для волны  $H_{01}$ :

$$f_{кр H_{11}} = \frac{1,841 \cdot 3 \cdot 10^8}{2\pi \cdot 0,025} = 3,516 \text{ ГГц}. \quad (14)$$

$$f_{кр E_{01}} = \frac{2,405 \cdot 3 \cdot 10^8}{2\pi \cdot 0,025} = 4,595 \text{ ГГц}. \quad (15)$$

$$f_{кр H_{21}} = \frac{3,054 \cdot 3 \cdot 10^8}{2\pi \cdot 0,025} = 5,832 \text{ ГГц}. \quad (16)$$

$$f_{кр H_{01}} = \frac{3,832 \cdot 3 \cdot 10^8}{2\pi \cdot 0,025} = 7,318 \text{ ГГц}. \quad (17)$$

Как можно заметить по результатам расчета критических частот, в волноводе будут распространяться только волны  $H_{11}$ ,  $E_{01}$ ,  $H_{21}$ , ближайшая волна высшего типа  $H_{01}$  распространяться не будет, т.к.  $f_{кр H_{01}} > f_0$ . Это также можно проследить по рис. 4, из которого видно, что шестая мода не распространяется по волноводу, а затухает сразу на входе порта. Результаты расчета критических частот также совпадают с результатами моделирования (см. рис. 3 и таблицу). Таким образом, при расчете количества распространяющихся мод в проектируемом трансформаторе можно ограничиться одним из вышерассматриваемых условий, связанных с критическими частотами волн или с их постоянными распространения.

#### Подавление влияния высших мод

При проектировании трансформатора, для лучшего согласования двух волноводов с диаметрами  $d_1$  и  $d_2$  было решено разбить переходную секцию на пять ступеней разной длины и разными диаметрами сечений. Критерием должного согласования трансформатора будет служить величина обратных потерь уровнем менее минус 20 дБ в полосе частот 5,9–6,4 ГГц. Так как данное устройство входит в состав частотно-поляризационного селектора облучателя зеркальных антенн или глобальных рупорных антенн, то в большинстве случаев необходимо, что-

бы работа селектора осуществлялась на основной волне  $H_{11}$  во всем рабочем диапазоне частот. В расчетах, приведенных выше, было показано, что кроме основного типа волны  $H_{11}$  на выходе волновода большего сечения распространяются еще высшие типы волн  $E_{01}$  и  $H_{21}$ . Для стабильной работы как в самом устройстве, так и в облучателе в целом необходимо, чтобы волна  $H_{11}$  распространялась с наименьшими потерями. Чтобы выполнить данное требование, необходимо, чтобы волноводный трансформатор обеспечивал не только согласование волноводов разного сечения на основной моде, но и подавлял влияние высших мод. Для того чтобы оценить влияние этих мод, необходимо при моделировании следить за развязкой между 1-й модой на входе трансформатора (со стороны меньшего сечения) и 3–5-й модами на выходе трансформатора. Для подавления вышеуказанных мод необходимо варьировать диаметрами сечений ступеней переходной секции, а также их длинами.

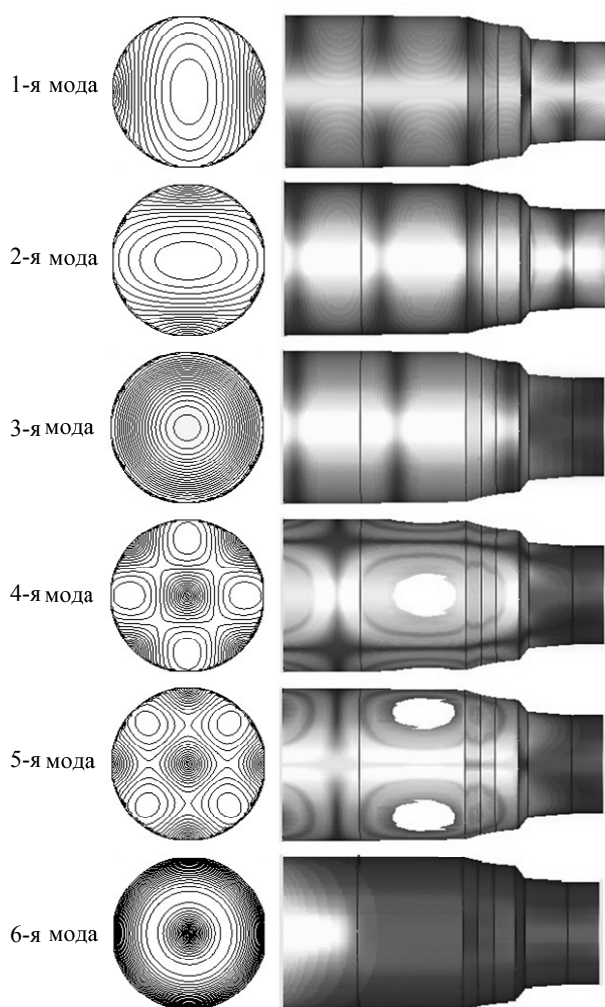


Рис. 4. Диаграммы полей в волноводном трансформаторе

Критериями настройки волноводного трансформатора будут служить величина обратных потерь менее минус 20 дБ в полосе частот 5,9–6,4 ГГц на входе устройства и величина развязки между основной модой и высшими менее минус 30 дБ. Спроек-

тированный волноводный трансформатор, удовлетворяющий этим требованиям, показан на рис. 2. Как уже говорилось, устройство состоит из пяти ступеней, поверхности которых представляют собой усеченные конусы с разными диаметрами сечений. За счет такой геометрии устройства обеспечивается подавление влияния высших мод. За этим можно проследить, посмотрев на рис. 4 диаграммы поля для различных мод в поперечном и продольном разрезе волновода.

Из рис. 4 видно, что в волноводе распространяются только две первые моды, которые соответствуют вырожденной волне  $H_{11}$  с ортогональными плоскостями поляризации, остальные моды подавляются в узкой части трансформатора за счет того, что волновод с меньшим диаметром является запердыльным для волн  $E_{01}$ ,  $H_{21}$ . Оценить же влияние высших мод, оказываемое на распространение основной волны  $H_{11}$ , можно с помощью рис. 5 и 6, на которых показаны результаты моделирования трансформатора.

#### Результаты моделирования

На рис. 5 показаны графики прямых и обратных потерь в полосе частот 5,9–6,4 ГГц. Обратные потери в рабочем диапазоне частот составили менее минус 22 дБ, прямые потери – более минус 0,03 дБ, что соответствует требованиям, предъявляемым к данному устройству.

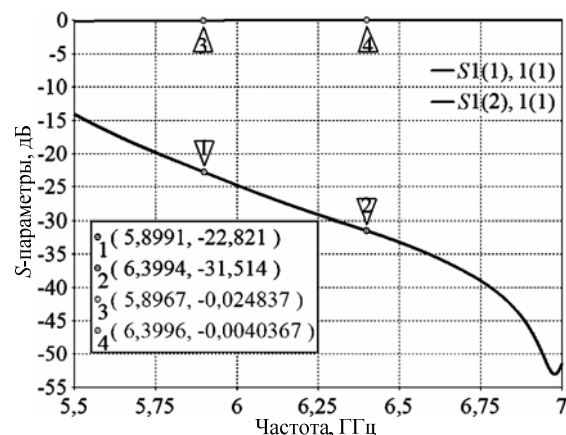


Рис. 5. Частотные зависимости потерь на отражение  $S_{11}$  и на прохождение  $S_{21}$  в волноводном трансформаторе

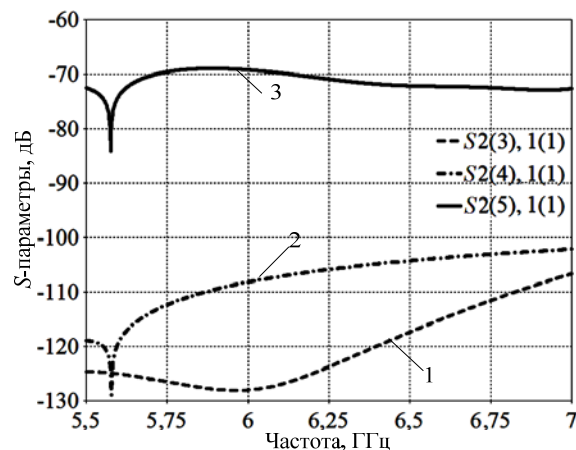


Рис. 6. Развязки между первой и высшими модами

На рис. 6 показаны графики развязок, где 1 – развязка между 1-й модой на входе трансформатора (со стороны меньшего сечения) и 3-й модой на выходе трансформатора; 2 – развязка между 1-й и 4-й модами; 3 – развязка между 1-й и 5-й модами. Из рис. 6 видно, что подавление всех мод составляет менее –68 дБ, что более чем достаточно для того, чтобы нивелировать влияние высших мод на распространение основной волны  $H_{11}$  в диапазоне частот приема.

#### Заключение

В статье были рассмотрены методы расчета волноводного трансформатора, показана последовательность действий при проектировании данного устройства, входящего в состав частотно-поляризационного селектора облучателя зеркальных антенн или глобальных рупорных антенн. Проведен сравнительный анализ расчета мод, распространяющихся в трансформаторе, аналитическим методом и путем моделирования в CST Microwave Studio. Представлен разработанный способ подавления влияния высших мод, возникающих при переходе на волновод большего диаметра. Подавление осуществляется волноводным трансформатором, состоящим из нескольких ступеней в виде усеченных конусов. Работоспособность такого способа проектирования волноводного трансформатора подтверждается результатами моделирования, а именно развязками между 1-й модой на входе трансформатора (со стороны меньшего сечения) и высшими модами на выходе трансформатора, которые составляют менее минус 68 дБ. Этого достаточно для того, чтобы минимизировать влияние высших мод на распространение основного типа волны.

#### Литература

1. Крылов Ю.В. Частотно-поляризационная селекция сигналов в рупорных облучающих системах зеркальных антенн // Исследования наукограда. – 2015. – № 2. – С. 5–9.

2. Компактный облучатель Ka/Q-диапазона круговой поляризации / Ю.В. Крылов, И.Ю. Данилов, Ю.Г. Выгонский, А.Г. Романов // Научные технологии. – 2015. – Вып. 3, № 16. – С. 52–55.

3. Крылов Ю.В. Проектирование облучателя в Ka/Q-диапазоне на основе «восстанавливающей» схемы / Ю.В. Крылов, В.Б. Тайгин // Вестник СибГАУ. – 2015. – Вып. 2, №16. – С. 417–422.

4. Фельдштейн А.Л. Справочник по элементам волноводной техники / А.Л. Фельдштейн, Л.Р. Явич, В.П. Смирнов. – М.: Связь, 1967. – С. 140–149.

#### Крылов Юрий Валерьевич

Инженер-конструктор,  
АО «Информационные спутниковые системы»  
им. акад. М.Ф. Решетнева», г. Железногорск  
Тел.: +7 (391-9) 72-24-39  
Эл. почта: unker007@mail.ru

Krylov Y.V.

#### Design of waveguide transformer for broadband feed of reflector antennas

The methods of calculating the waveguide transformer, showing the basic principles of the design of the device, which is part of the frequency-polarization selector of the feed reflector antennas or global horn antennas are presented. A comparative analysis of the calculation of modes distributed in the transformer by the analytical method and simulation in CST Microwave Studio is carried out. The developed method of suppressing the influence of higher order modes, resulting in a larger diameter of waveguide is described.

**Keywords:** feed of reflector antennas, orthomode transducer, waveguide transformer, higher modes.

УДК 621.396.62

А.С. Подстригаев, В.П. Лихачев, К.В. Гапенко

## Сравнительный анализ показателей эффективности способов снижения неоднозначности определения частоты, возникающей на стыках каналов матричного приемника

Представлены результаты сравнительного анализа эффективности средств снижения неоднозначности определения частоты, возникающей при попадании сигнала на стык соседних частотных каналов матричного приемника. Исследованы два способа снижения неоднозначности: разделение каналов промежуточной частоты на группы с раздельной обработкой их выходного сигнала и использование устройства, выполняющего дополнительные измерения частоты на стыках частотных каналов. Предложены методики оценки эффективности на основе величины вероятности ложной тревоги, ширины полосы неоднозначности и выигрыша в отношении сигнал/шум.

**Ключевые слова:** неоднозначность, матричный приемник, стык каналов, крутизна АЧХ, неоднозначность определения частоты, четные каналы, полоса неоднозначности, радиотехническая разведка.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2016-19-3-21-26

Матричный приемник (рис. 1) широко применяется в средствах радиотехнической разведки (РТР) [1–6]. В нем входной сигнал системой фильтров первой ступени  $\Phi_{11}, \Phi_{12}, \dots, \Phi_{1m}$  разделяется по частоте на несколько каналов и после гетеродинирования преобразуется в единый для всех каналов первой ступени диапазон промежуточных частот (ПЧ)  $\Delta f_{пч1}$ , что обеспечивается выбором частот канальных гетеродинов  $\Gamma_{11}, \Gamma_{12}, \dots, \Gamma_{1m}$ . Канальные фильтры приемника также служат для исключения приема по зеркальному каналу. Далее сигнал ПЧ поступает на следующую ступень, где снова разде-

ляется по частоте и переносится во второй диапазон ПЧ (единый для всех каналов второй ступени)  $\Delta f_{пч2}$  и так далее до последней ступени. Каждый частотный канал во всех ступенях снабжается индикатором ( $I_{11} \dots I_{nm}$ ), указывающим номер сработавшего канала. Индикаторами, как правило, служат бинарные обнаружители, содержащие последовательно соединенные полосовой фильтр, амплитудный детектор и пороговое устройство [2, 7]. По набору сработавших индикаторов можно определить частоту принятого сигнала с точностью до половины полосы пропускания канала последней ступени.

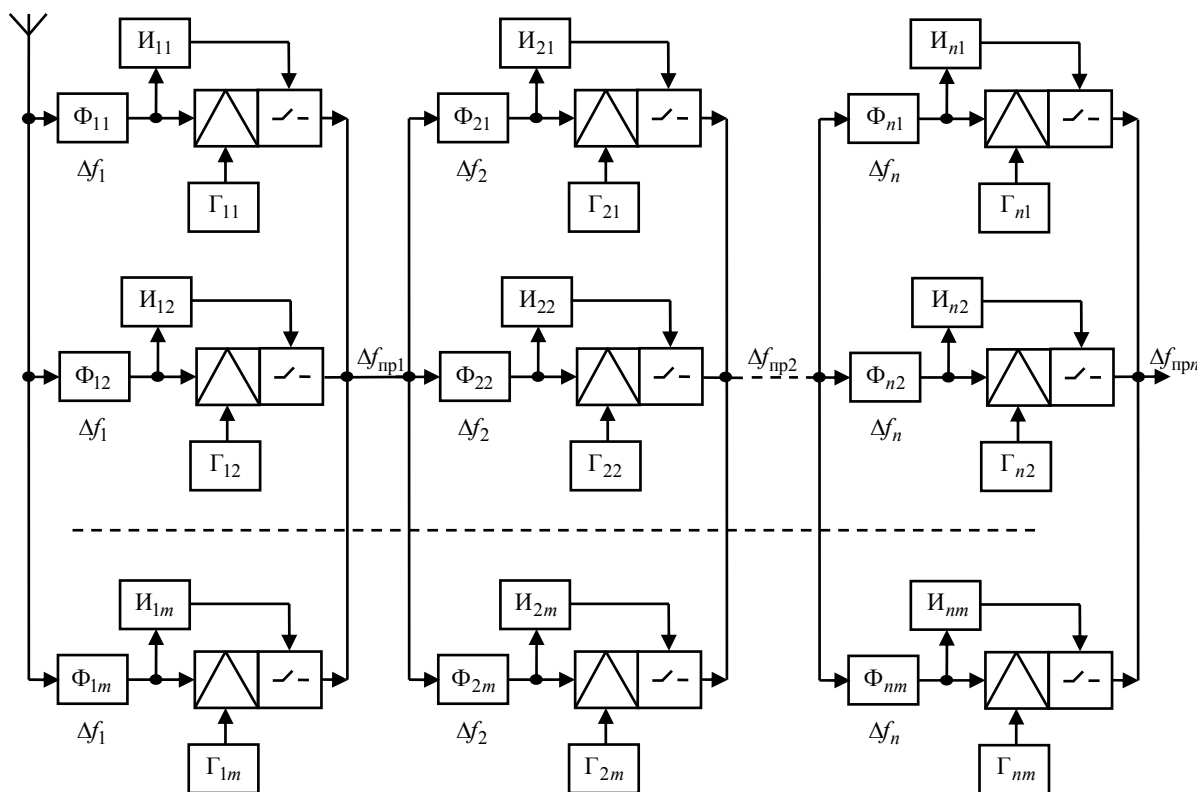


Рис. 1. Структурная схема матричного приемника

Одним из основных преимуществ схемы являются относительная простота и, как следствие, невысокие массогабаритные характеристики и стоимость. Однако существенным недостатком схемы является неоднозначность определения частоты (НОЧ). НОЧ может быть обусловлена различными причинами [8]. Одной из них является попадание сигнала на стык соседних частотных каналов. В соответствии с классификацией, предложенной в работе [8], далее такую неоднозначность будем называть неоднозначностью второго рода (НОЧ-2).

НОЧ-2 возникает при попадании мощного сигнала в смежную область соседних частотных каналов. Так как полосовые фильтры не обладают идеально прямоугольной АЧХ, сигнал, находясь в полосе одного канала, попадает в соседний. Если уровень сигнала достаточно высок, то срабатывают детекторы в обоих каналах. При этом полосы каналов переносятся в единый для ступени диапазон ПЧ. В результате, поскольку не ясно, какому из сработавших каналов соответствует обнаруженный сигнал, однозначное определение частоты на выходе приемника затруднено.

Возможна реализация различных способов устранения НОЧ-2 матричного приемника радиотехнической разведки, однако оценка их эффективности по различным показателям, например, по величине вероятности ложной тревоги, ширине полосы неоднозначности и выигрышу в отношении сигнал/шум ранее не производилась. В данной статье этот пробел устраняется.

#### Способы снижения неоднозначности определения частоты, возникающей при попадании сигнала на стыки соседних частотных каналов

Рассмотрим два способа снижения НОЧ-2. Первый способ заключается в разделении каналов ПЧ на группы с отдельной обработкой их выходного сигнала [9–12]. Сигналы с выходов каналов различных групп суммируются и обрабатываются отдельно. Второй способ предполагает дополнительные измерения частоты на стыках частотных каналов. Такие измерения могут быть выполнены, например, с помощью устройства, описанного в работах [8, 13] и представленного на рис. 2.

На рис. 2 представлено устройство измерения частоты (УИЧ), которое в работах [8, 13] предложено использовать для уменьшения НОЧ, обусловленной приемом совмещенных по времени и разнесенных по частоте сигналов (НОЧ третьего рода). УИЧ подключается ко входу каждой ступени приемника, за исключением последней, и позволяет уточнить определенные приемником частоты. В основу устройства положено использование цепей с ярко выраженной частотной зависимостью коэффициента передачи.

На рис. 2 сигнал со входа УИЧ, пройдя через усилитель-ограничитель (УО), разветвляется на  $K$  каналов. Каждый канал содержит последовательно включенные полосовой фильтр, формирующий по-

лосу пропускания канала  $\Delta f_i$ , фильтр, имеющий в полосе  $\Delta f_i$  наклон АЧХ, и детектор. УО устраняет зависимость сигнала от амплитуды для того, чтобы на входы каналов приходили сигналы одного уровня. Далее в каждом канале, в зависимости от частоты, сигнал приобретает соответствующую амплитуду, детектируется и поступает в устройство цифровой обработки (УЦО). УЦО включает в себя АЦП и выполняет измерение амплитуды сигнала в каждом канале, соотношение этой амплитуды с таблицей частот для каждого канала и выдает измеренное с заданной точностью значение частоты сигнала. Количество каналов УИЧ  $K$  на один больше количества каналов ступени, к которой подключено устройство, а полоса рабочих частот УИЧ перекрывает полосу рабочих частот ступени. Следовательно, серединам каналов УИЧ соответствуют границы каналов приемника и наоборот.

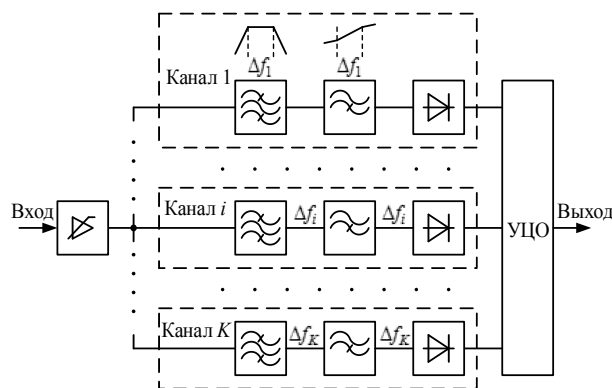


Рис. 2. Устройство измерения частоты

В настоящей работе рассматриваются результаты исследования эффективности использования только вышеуказанных способов снижения НОЧ-2.

Для исследования выбран двухступенчатый матричный приемник РТР, вторая ступень которого построена по принципу многоканального приемника без переноса частоты. В исходном состоянии каналы первой ступени принудительно закрыты и подключены к сумматору. Выход сумматора соединен со входом второй ступени. При обнаружении сигнала в одном из каналов он открывается и таким образом подключается ко второй ступени.

При моделировании заданы следующие параметры, приближенные к характеристикам реального приемника: время наблюдения  $T_n = 655$  мкс, спектральная плотность мощности шума  $N_0 = 10^{-20}$  Вт/Гц, АЧХ каналов аппроксимированы прямыми линиями, крутизна скатов АЧХ первой ступени  $S_1 = 307$  дБ/Гц, крутизна скатов АЧХ второй ступени  $S_2 = 360$  дБ/Гц, коэффициент передачи в полосе пропускания  $K_0 = -3$  дБ. Полоса рабочих частот 10 ГГц, полоса каждого канала первой ступени составляет 500 МГц, полоса канала второй ступени равна 50 МГц. Величина порога обнаружения  $h$  выбиралась так, чтобы вероятность ложной тревоги



приемника в отсутствие полезного сигнала была на уровне  $10^{-8} \dots 10^{-7}$ .

**Оценка эффективности способов снижения неоднозначности определения частоты второго рода на основе ширины полосы неоднозначности и величины вероятности ложной тревоги приемника**

В качестве показателя НОЧ-2 в работе [14] предложено использовать вероятность ложной тревоги приемника  $P_{лт пр}$ , уточненную с учетом обнаружения сигнала за пределами частотных каналов приемника. С учетом выражений для вероятностных характеристик обнаружения в условиях полного отсутствия априорной информации о параметрах сигнала, полученных в [1, 3, 5], предложена методика оценки НОЧ-2 [15]. На основе указанной методики разработано программное обеспечение [16], формирующее вероятностные характеристики матричного приемника.

В соответствии с допущениями, принятыми в [1, 3, 5], полагалось, что сигнал существует в течение всего времени наблюдения  $T_n$ . Поэтому полученные далее вероятностные характеристики приема следует считать оптимистичными. На практике параметры сигнала, в том числе длительность импульса, для средств РТР, как правило, априорно неизвестны. Поэтому реализация оптимального приема практически невозможна, и реальные характеристики будут несколько хуже.

При разделении каналов на группы НОЧ-2 сохраняется в узкой полосе  $\Delta f_{НОЧ-2}$ , определяемой разрешающей способностью АЦП, установленного на выходе канала после детектора,  $\Delta_{АЦП}$  и крутизной скатов АЧХ канала первой ступени приемника  $S_1$ . В этой полосе при срабатывании обнаружителей соседних каналов разрешающей способности АЦП недостаточно для определения канала с наибольшей мощностью на выходе.

Для оценки эффективности разделения каналов на группы по методике оценки НОЧ-2 [15] необходимо задать пределы интегрирования сигнала:  $[f_{i-1} - \Delta f_{НОЧ-2}, f_{i-1}]$  и  $[f_i, f_i + \Delta f_{НОЧ-2}]$ , где  $\Delta f_{НОЧ-2} = \Delta_{АЦП} / S_1$  ( $\Delta_{АЦП}$  – разрешающая способность АЦП по входной мощности).

Разрешающая способность АЦП по входной мощности находится в соответствии с выражением

$$\Delta_{АЦП} = 10 \lg(P_{вх \text{ дет max}} / P_{вх \text{ дет min}}) / 2^N, \quad (1)$$

где  $P_{вх \text{ дет max}}$  – максимальная мощность на входе детектора,  $P_{вх \text{ дет min}}$  – минимальная мощность на входе детектора,  $N$  – разрядность АЦП.

Учитывая высокие технические характеристики при относительно низкой стоимости, в качестве логарифмического детектора выбрана микросхема ADL5513. Тогда числитель в выражении (1) (динамический диапазон сигнала на входе микросхемы ADL5513) примет значение 70 дБ [17]. А при выборе 12-разрядного АЦП разрешающая способность бу-

дет равна  $\Delta_{АЦП} = 0,017$  дБ. При крутизне ската АЧХ  $S_1 = 307$  дБ/ГГц неоднозначность сохранится в полосе всего  $\Delta f_{НОЧ-2} = 55,4$  кГц. По полосе  $\Delta f_{НОЧ-2}$ , которую далее будем называть полосой неоднозначности, также можно оценить эффективность способа.

Результаты моделирования зависимости вероятности ложной тревоги приемника от мощности сигнала на стыке каналов при различной отстройке частоты сигнала от стыка в среде MATLAB при разделении каналов на две группы с отдельной обработкой сигналов в пределах каждой группы представлены на рис. 3, а.

Способ снижения НОЧ-2, основанный на использовании частотно-зависимого устройства (ЧЗУ), также предполагает наличие полосы неоднозначности, определяемой разрешающей способностью АЦП и крутизной АЧХ ЧЗУ.

Поскольку УИЧ по сути является дополнительным приемником, подключенным к основному, его чувствительность должна быть, по возможности, не хуже чувствительности основного приемника. Однако наличие ЧЗУ неизбежно снижает чувствительность, поэтому крутизна АЧХ ЧЗУ не должна быть высокой. В то же время для повышения разрешающей способности крутизна должна быть как можно выше.

Для оценки максимально допустимой крутизны АЧХ частотно-зависимого устройства, при которой чувствительность УИЧ не хуже чувствительности основного приемника, выполнен расчет чувствительности по выражению [18]

$$P_0 = K_{ш} k T \Delta f_{ш} q, \quad (2)$$

где  $K_{ш}$  – коэффициент шума линейной части приемника,  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К – постоянная Больцмана;  $T$  – абсолютная температура источника шума;  $\Delta f_{ш} \approx 1,1 \Delta f_i$  – мгновенная полоса шума приемника ( $\Delta f_i$  – полоса  $i$ -го канала УИЧ);  $q$  – заданное отношение сигнал/шум на выходе линейной части.

Для упрощения вычислений по выражению (2) разработана программа в среде MATLAB, позволяющая варьировать характеристики звеньев и учитывать вклад каждого из них в итоговый коэффициент шума и чувствительность. Принимая  $T = 343$  К,  $\Delta f_{ш} = 550$  МГц ( $\Delta f_i = 500$  МГц),  $q = 7$  дБ, согласно расчетам чувствительность УИЧ без учета затухания в ЧЗУ составляет  $P_0 \text{ УИЧ} = -104$  дБ. Вместе с тем чувствительность самого приемника при расчете по аналогичным выражениям равна  $P_0 = -97,7$  дБ.

При затухании в ЧЗУ  $L_{чзу} = -6,5$  дБ чувствительности приемника и УИЧ совпадают. Таким образом, для обеспечения равной чувствительности приемника и УИЧ запас затухания ЧЗУ в рабочей полосе частот должен быть 6,5 дБ. Тогда крутизна АЧХ ЧЗУ в полосе пропускания шириной 500 МГц составит  $S_{чзу} = 13$  дБ/ГГц.

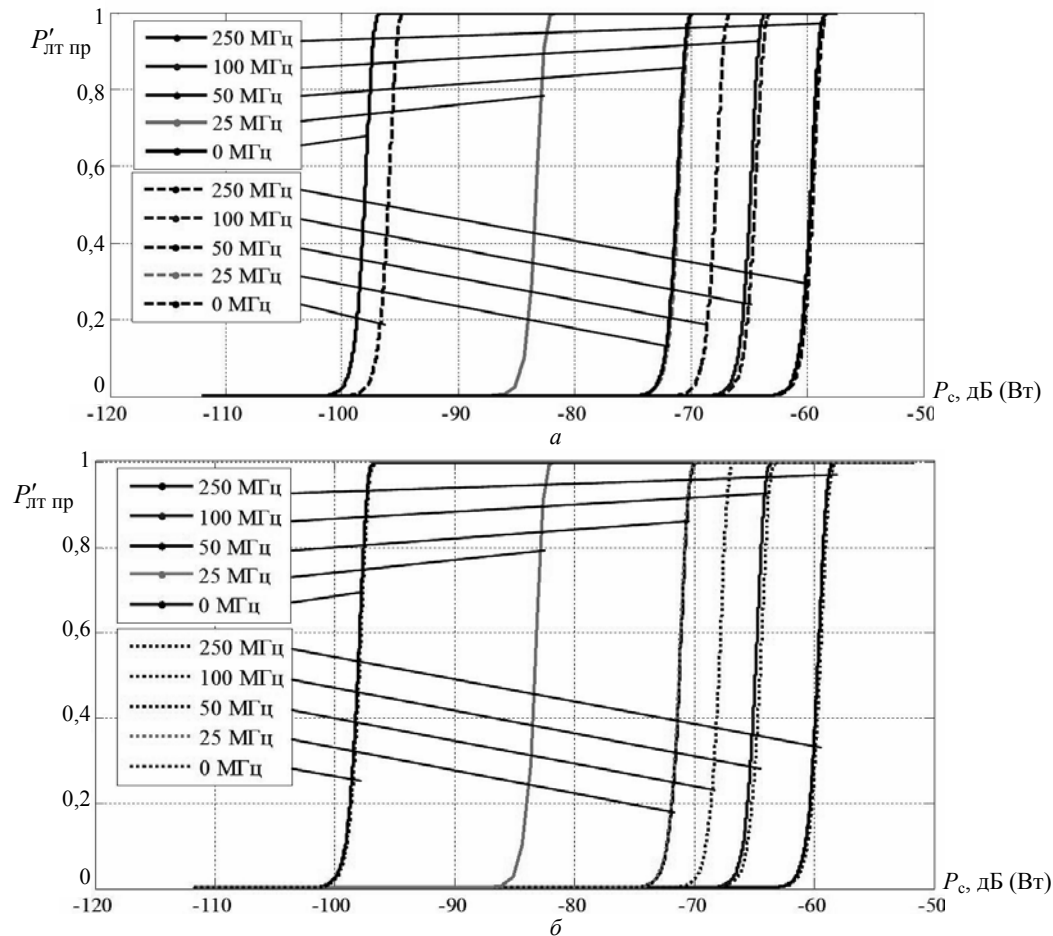


Рис. 3. Зависимость вероятности ложной тревоги матричного приемника от мощности сигнала при удалении несущей сигнала от границы канала: *a* – без средств снижения НОЧ-2 (сплошная линия) и при разделении каналов на две группы (штриховая линия); *б* – без средств снижения НОЧ-2 (сплошная линия) и при использовании УИЧ (пунктирная линия)

Аналогично первому способу НОЧ-2 сохраняется в узкой полосе  $\Delta f_{\text{НОЧ-2}}$ , определяемой разрешающей способностью АЦП по входной мощности установленного в устройстве цифровой обработки УИЧ,  $\Delta_{\text{АЦП}}$  и крутизной АЧХ частотно-зависимых устройств в полосе *i*-го канала УИЧ  $S_{\text{ЧЗУ}}$ .

Для оценки эффективности использования УИЧ по методике оценки НОЧ-2 [15] необходимо задать пределы интегрирования сигнала:  $[f_{i-1} - \Delta f_{\text{НОЧ-2}}, f_{i-1}]$  и  $[f_i, f_i + \Delta f_{\text{НОЧ-2}}]$ , где  $\Delta f_{\text{НОЧ-2}} = \Delta_{\text{АЦП}} / S_{\text{ЧЗУ}}$ .

Выбирая те же логарифмический детектор и АЦП, при крутизне ската АЧХ ЧЗУ  $S_{\text{ЧЗУ}} = 13$  дБ/ГГц неоднозначность сохранится в полосе  $\Delta f_{\text{НОЧ-2}} = 1,3$  МГц. Полученная при использовании УИЧ полоса неоднозначности приблизительно в 23 раза шире, чем при разделении каналов на группы. Результаты моделирования зависимости вероятности ложной тревоги приемника от мощности сигнала на стыке каналов при различной отстройке частоты сигнала от стыка в среде MATLAB при использовании для снижения НОЧ-2 устройства измерения частоты представлены на рис. 3, б.

Очевидно, что поскольку в обоих случаях оценка величины НОЧ-2 выполняется аналогичными

способами и при этом  $S_{\text{ЧЗУ}} < S_1$ , использование УИЧ дает меньший вклад в снижение НОЧ-2. Графики на рис. 3, а, б позволяют оценить эти эффекты количественно.

Представленные выше группы зависимостей вероятности ложной тревоги матричного приемника от мощности сигнала (рис. 3) при удалении несущей сигнала от границы канала показывают, что оба способа снижения НОЧ-2 уменьшают вероятность ложной тревоги приемника. При этом  $P'_{\text{лт пр}}$  наиболее эффективно снижается при некоторой отстройке мешающего сигнала от границы канала (в эксперименте 25 МГц). Дальнейшее его удаление от границы канала показывает снижение эффективности. При отстройке на 100 МГц эффект от использования обоих средств снижения НОЧ-2 минимален. При отстройке до середины канала (250 МГц) эффект от использования средств снижения НОЧ-2 практически отсутствует. Это объясняется высоким затуханием сигнала при большой отстройке, а также удаленностью спектра сигнала от границы канала. Поэтому можно заключить, что для исследуемого приемника средства снижения НОЧ-2 эффективны при попадании сигнала в полосу до 70...100 МГц от границы канала. При попадании сигнала дальше от

границы канала его влияние на рост  $P'_{\text{лт пр}}$  незначительно и сравнимо с влиянием шумов.

#### Оценка эффективности способов снижения неоднозначности определения частоты второго рода на основе выигрыша в отношении сигнал/шум

Другим показателем эффективности средств снижения НОЧ-2 является выигрыш в отношении сигнал/шум. Для его определения получены зависимости  $P'_{\text{лт пр}}$  от отношения сигнал/шум  $q$ , аналогичные представленным на рис. 3. Далее на основе этих зависимостей построен график зависимостей выигрыша в отношении сигнал/шум от использования рассмотренных средств снижения неоднозначности (рис. 4).

Следует заметить, что при минимальной отстройке частоты мешающего сигнала от границы канала разделение каналов на группы является более эффективным. Для фиксированной  $P'_{\text{лт пр}}$  отношение мощности мешающего сигнала к мощности шума  $q$  при стремящейся к нулю отстройке ( $\Delta f \rightarrow 0$ ) для метода разделения каналов на группы может быть на 2 дБ выше по сравнению с методом, использующим УИЧ. При увеличении отстройки частоты мешающего сигнала от границы канала эффект от использования обоих средств снижения НОЧ-2 практически идентичен.

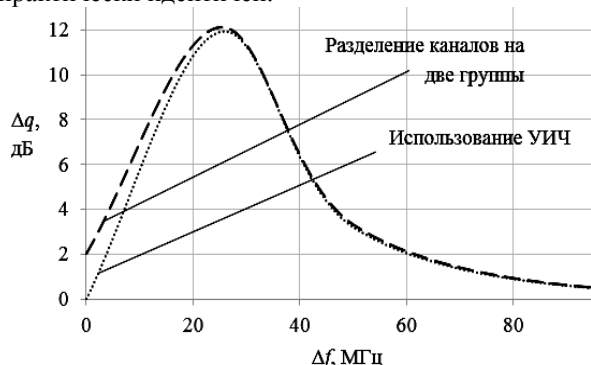


Рис. 4. Зависимость выигрыша в отношении сигнал/шум от удаления несущей сигнала от границы канала при использовании средств снижения НОЧ-2

Как отмечалось ранее, вероятностные характеристики приемника получены с учетом допущения о существовании сигнала в течение всего времени наблюдения  $T_n$ . Поскольку на практике длительность импульса может быть меньше времени наблюдения  $T_n$ , оценка эффективности способов снижения НОЧ-2 на основе вероятности ложной тревоги и выигрыша в отношении сигнал/шум является приближенной. В то же время реальная радиозлектронная обстановка характеризуется значительным количеством источников радиоизлучений, в том числе не являющихся объектами РТР. Поэтому мощность в полосе приема будет несколько выше, чем предполагалось при моделировании. Таким образом, результаты получены для частного практического случая и требуют дальнейшего уточнения.

При этом они позволяют качественно оценить эффективность средств снижения НОЧ-2 при несовпадении времени существования сигнала на входе приемника и времени наблюдения  $T_n$ .

#### Заключение

Выполнен сравнительный анализ показателей эффективности двух способов снижения НОЧ-2. В качестве таких показателей выбраны величина вероятности ложной тревоги, ширина полосы неоднозначности и выигрыш в отношении сигнал/шум.

Оценка по полосе неоднозначности, при попадании в которую сигналы в соседних каналах не различаются, показывает большую эффективность разделения на группы, поскольку полоса неоднозначности для этого способа в 23 раза уже полосы неоднозначности, возникающей при использовании УИЧ.

Однако на основе анализа других показателей можно сделать вывод о приблизительно одинаковом эффекте от использования обоих средств снижения НОЧ-2.

Для оценки эффективности средств снижения НОЧ-2 по значению вероятности ложной тревоги, вычисляемой с учетом обнаружения сигнала в канале при попадании за его границы, с помощью разработанной методики оценки НОЧ-2 [15] рассчитаны зависимости вероятности ложной тревоги матричного приемника от мощности сигнала при различном удалении несущей сигнала от границы канала.

Полученные группы зависимостей (рис. 3) отражают уровни сигнала, которые при заданной отстройке от границы канала с заданной вероятностью приводят к возникновению ложной тревоги в матричном приемнике. Характеристики приемника приближены к реальным. На тех же графиках показан положительный эффект от использования средств снижения НОЧ-2, зависящий от отстройки частоты сигнала от границы канала.

Также эффективность средств снижения НОЧ-2 оценивалась по выигрышу в отношении сигнал/шум (см. рис. 4). В результате численного эксперимента показано, что при приеме импульсного сигнала максимальный положительный эффект от использования средств снижения НОЧ-2 достигается в полосе до 70...100 МГц от границы канала и заключается в том, что для заданной  $P'_{\text{лт пр}}$  мощность мешающего сигнала (или отношение «мешающий сигнал/шум») в соседнем канале может быть больше на величину  $\Delta q$ .

Следует заметить, что эффективность рассмотренных способов снижения НОЧ-2 во многом зависит от применяемой электронной компонентной базы – важны разрядность АЦП, динамический диапазон детектора и крутизна скатов АЧХ канальных фильтров.

В целом рассмотренные средства имеют приблизительно одинаковую эффективность. Поэтому при выборе конкретных средств снижения НОЧ-2 следует отдавать предпочтение другим характеристикам. Так, разделение каналов на группы позволяет подключать на выход приемника несколько уст-

роиств обработки, повышая таким образом пропускную способность. Устройство измерения частоты, как уже было сказано выше, позволяет уменьшать НОЧ третьего рода, возникающую в матричном приемнике при приеме совмещенных по времени и разнесенных по частоте сигналов. При необходимости решения обеих задач технические решения целесообразно комбинировать. В этом случае общая эффективность их работы будет определяться средством с наименьшей полосой неоднозначности.

#### Литература

1. Куприянов А.И. Теоретические основы радиоэлектронной борьбы: учеб. пособие / А.И. Куприянов, А.В. Сахаров. – М.: Вузовская книга, 2007. – 356 с.
2. Вакин С.А. Основы радиопротиводействия и радиотехнической разведки / С.А. Вакин, Л.Н. Шустов. – М.: Сов. радио, 1968. – 448 с.
3. Куприянов А.И. Радиоэлектронные системы в информационном конфликте / А.И. Куприянов, А.В. Сахаров. – М.: Вузовская книга, 2003. – 528 с.
4. Шлезингер Р.Дж. Радиоэлектронная война. – М.: Воениздат, 1963. – 320 с.
5. Перунов Ю.М. Радиоэлектронная борьба: радиотехническая разведка / Ю.М. Перунов, А.И. Куприянов. – М.: Вузовская книга, 2016. – 190 с.
6. Щербак В.И. Приемные устройства систем радиоэлектронной борьбы / В.И. Щербак, И.И. Водянин // Зарубежная радиоэлектроника. – 1987. – № 5.
7. Tsui J.B.Y. Microwave Receivers with Electronic Warfare Applications. – John Wiley & Sons, 1986. – 460 p.
8. Подстригаев А.С. Неоднозначность определения частоты в матричном приемнике / А.С. Подстригаев, В.П. Лихачев // Журнал радиоэлектроники: электронный журнал. – 2015. – № 2. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/feb15/13/text.pdf>, свободный (дата обращения: 22.03.2016).
9. Wiegand R.J. Radar Electronic Countermeasures System Design. – Norwood: Artech House, 1991. – 288 p.
10. Пат. 2 284 545 РФ, МПК G 01 S 7/40, G 01 S 11/00. Корабельная система радиотехнического контроля / В.С. Байлов, А.Ф. Гришков, И.Г. Дорух, А.Э. Чекрыгин; патентообладатель ФГУП «ТНИИС». – № 2004119344/09; заявл. 24.06.04; опубл. 10.01.06. – 11 с.
11. Пат. 2 237 907 РФ, МПК7 G 01 S 7/38, H 04 K 3/00. Корабельный комплекс радиоэлектронного противодействия / А.А. Борисов, А.А. Борисов, П.А. Брыкалов, В.П. Примак, А.В. Чубаров, В.И. Шевченко; патентообладатель ДГУП «Научно-технический центр «Бригантина». – № 2002132544/09; заявл. 03.12.02; опубл. 10.10.04. – 13 с.
12. Пат. US 6 448 921 B1 США, МПК7 G 01 S 7/40. Channelized monobit electronic warfare radio receiver / James B.Y. Tsui, James N.Hedge, Vasu D.Chakravarthy, Keith M.Graves; патентообладатель Government of The United States of America as represented by The Secretary of The Air Force. – № US 09/917589; заявл. 30.06.01; опубл. 10.09.02. – 14 с.
13. Пат. 2 587 645 РФ, МПК G01R 23/00. Способ определения частоты в матричном приемнике и устройство для его осуществления / А.С. Подстригаев, В.П. Лихачев; патентообладатель ОАО «БЭМЗ». – № 2015118979/28; заявл. 20.05.15; опубл. 20.06.16. – 10 с.
14. Подстригаев А.С. Количественная оценка неоднозначности определения частоты при перекрытии каналов матричного приемника / А.С. Подстригаев, В.П. Лихачев, А.И. Уваров // Вестник Военно-воздушной академии. – 2015. – Т. 23, № 2. – С. 169–175.
15. Подстригаев А.С. Анализ вероятностных характеристик матричного приемника с учетом неоднозначности определения частоты на стыках каналов / А.С. Подстригаев, В.П. Лихачев, М.В. Ляпин // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2015. – Т. 38, № 4. – С. 17–25 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://journal.tusur.ru/storage/43416/3.pdf?1464685956>, свободный (дата обращения: 05.10.2016).
16. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016611930. Программа расчета вероятностных характеристик матричного приемника / А.С. Подстригаев, М.В. Ляпин. – Заявка №2015660937. Дата поступления 13 ноября 2015 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 15 февраля 2016 г.
17. Техническое описание микросхемы ADL5513 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.analog.com/static/imported-files/data\\_sheets/ADL5513.pdf](http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/ADL5513.pdf), свободный (дата обращения: 23.03.2016).
18. Проектирование радиоприемных устройств: учеб. пособие для вузов / С.М. Клич, А.С. Кривенко, Г.Н. Носикова, А.П. Сиверс. – М.: Советское радио, 1976. – 487 с.

#### Подстригаев Алексей Сергеевич

Ассистент каф. электронных, радиоэлектронных и электротехнических систем (ЭРиЭС) Брянского гос. технического ун-та (БГТУ)  
Тел. 8 (483-2) 54-64-67  
Эл. почта: ap0d@ya.ru

#### Лихачев Владимир Павлович

Д-р техн. наук, профессор Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», Воронеж  
Тел.: 8 (473-2) 44-78-55  
Эл. почта: lvp\_home@mail.ru

#### Гапенко Кирилл Витальевич

Студент 4-го курса каф. ЭРиЭС БГТУ  
Тел.: 8-952-967-29-25  
Эл. почта: kirilldacent@yandex.ru

#### Podstrigaev A.S., Likhachev V.P., Gapeyenko K.V. Comparative analysis of efficiency indices of ways to reduce the frequency determination ambiguity emerging at joints of channels in radio intelligence matrix receiver

The results of comparative analysis of the efficiency of facilities reducing the frequency determination ambiguity emerging when the signal hits at the joint of adjacent frequency channels of the matrix receiver are presented. Two ways of reducing the frequency determination ambiguity are investigated: separation of intermediate frequency channels at groups with separated processing of their output signal and usage of the device taking extra measurements of frequency at joints of adjacent frequency channels. Estimation methods based on values of false-alarm probability, ambiguity band and the gain in signal-to-noise ratio are proposed.

**Keywords:** matrix-parallel receiver, matrix receiver, radio monitoring, radio intelligence, receiver design method, wide-band receiver, frequency plan.

УДК 621.397: 004.932.2

В.В. Капустин, А.В. Каменский

## Оценка качества изображений высокого разрешения при внутрикадровом сжатии в стандартах JPEG и JPEG2000

Рассмотрено влияние внутрикадрового сжатия на разрешающую способность изображений. Получены результаты оценки вносимых в изображение искажений после применения алгоритмов компрессии, основанных на дискретно-косинусном и дискретном вейвлет-преобразовании по таким параметрам, как пиковое отношение сигнал/шум, среднеквадратическая ошибка и разрешающая способность.

**Ключевые слова:** внутрикадровое сжатие, пиковое отношение сигнал/шум, среднеквадратическая ошибка, контрастно-частотная характеристика, разрешающая способность.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2016-19-3-27-31

Известно, что в настоящее время для внутрикадрового сжатия видеоданных особой популярностью пользуются стандарты, в которых применяется дискретно-косинусное преобразование (ДКП). Современные видеокомпрессоры позволяют использовать для ДКП блоки разных размеров, включая адаптивный выбор размера блока в зависимости от области изображения. Для областей, содержащих мелкие детали, применяются блоки меньшего размера, области с монотонным содержанием разбиваются на блоки большего размера [1, 2]. Для устранения основного недостатка ДКП, связанного с возникновением на изображении блочной структуры, как правило, применяется постобработка. Дискретное вейвлет-преобразование (ДВП) нашло применение в таких стандартах сжатия изображений как JPEG2000 и ICER. Использование ДВП для компрессии изображений не приводит к возникновению блочной структуры и поэтому не требует применения деблокинг-фильтров.

### Постановка задачи

Задачей исследования является измерение разрешающей способности несжатых изображений, полученных при помощи непрофессионального цифрового фотоаппарата, определение, как алгоритмы внутрикадрового сжатия данных, основанные на ДКП и ДВП, влияют на качество изображений высокого разрешения при одинаковых коэффициентах компрессии. Необходимо установить зависимость падения разрешающей способности изображения от коэффициента компрессии изображения, применяемой схемы компрессии, размера блока ДКП, порядка используемого вейвлета при ДВП.

### Теория

В качестве инструментального средства для оценки качества изображений при внутрикадровом сжатии применялась программа, разработанная в среде MATLAB.

Язык MATLAB является высокоуровневым интерпретируемым языком программирования, включающим основанные на матрицах структуры данных, широкий спектр функций, интегрированную среду разработки и объектно-ориентированные возможности [3].

Интерфейс программы позволяет сжимать изображения независимо как с применением ДКП, так и с использованием ДВП, что позволяет наглядно сравнить степень и характер вносимых в изображение искажений [4].

На рис. 1 показана упрощенная структурная схема работы алгоритма программы для сжатия изображений с использованием ДКП.

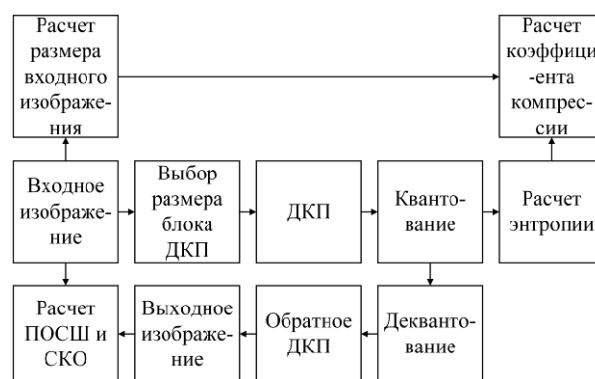


Рис. 1. Структурная схема алгоритма сжатия изображений с использованием ДКП

Алгоритмом предусмотрен выбор размера блока ДКП:  $4 \times 4$ ,  $8 \times 8$  и  $16 \times 16$  элементов.

Матрица квантования генерируется в зависимости от выбранного размера блока и значения качества кодирования  $m$  по следующей формуле:

$$1 + (i + j) \cdot m, \quad (1)$$

$i$  – номер строки блока,  $j$  – номер столбца блока.

Значение элемента, расположенного в  $i$ -й строке  $1$ -го столбца матрицы, равно  $16$  и не зависит от значения  $m$ .

Структурная схема работы алгоритма программы для сжатия изображений с использованием ДВП, отличается тем, что блок ДКП заменен блоком ДВП, а блок выбора размера блока ДКП заменен блоком выбора типа вейвлет-фильтра и уровня вейвлет-разложения.

Для компрессии изображений с использованием ДВП алгоритмом программы предусмотрен выбор вейвлетов Добеши  $2$ ,  $4$  и  $6$ -го порядка, а также вейвлет Хаара. Уровень вейвлет-разложения регулируется в пределах от  $1$  до  $5$ .

Расчет среднеквадратической ошибки (СКО) выполняется по формуле

$$\text{СКО} = \frac{1}{m \cdot n} \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} |I(i, j) - K(i, j)|^2, \quad (2)$$

где  $I$  – входное изображение;  $K$  – выходное изображение;  $m \times n$  – размер изображения;  $i$  – номер строки изображения;  $j$  – номер столбца изображения.

Значение пикового отношения сигнал/шум (ПОСШ) рассчитывается через значение СКО (2) по формуле (3):

$$\text{ПОСШ} = 10 \log_{10} \left( \frac{\text{MAX}_I^2}{\text{СКО}} \right) = 20 \log_{10} \left( \frac{\text{MAX}_I}{\sqrt{\text{СКО}}} \right), \quad (3)$$

$\text{MAX}_I$  – максимальное значение пикселя, равное 255 для 8 битного изображения.

В качестве измерительного изображения использовалась таблица ISO 12233:2014, сгенерированная в программе Imatest. Данная измерительная таблица позволяет определить разрешающую способность изображения по вертикали и горизонтали до 2500 ТВЛ за счет горизонтальных и вертикальных клиньев линий. Для сохранения высокой детализации таблица была распечатана на фотобумаге по частям, после чего склеена из 10 листов формата А4 на подложку (рис. 2).

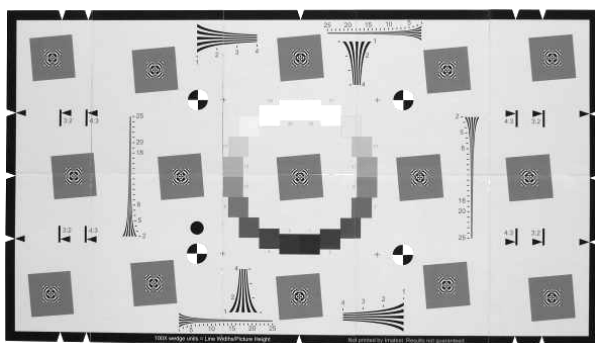


Рис. 2. Таблица ISO 12233:2014

Фотографирование таблицы осуществлялось при помощи цифрового фотоаппарата Canon SX50HS при естественном освещении. Формат матрицы фотоаппарата 1/2.3, разрешение 12 мегапикселей (4000×3000 пикселей).

Полученные фотоснимки сохранялись без применения внутрикамерной обработки и алгоритмов сжатия, в формате RAW. После чего при помощи программы FastStone Image Viewer фотоснимки были конвертированы в формат BMP. Также из изображения были удалены цветоразностные компоненты для дальнейшей обработки ДКП и ДВП компрессором.

Разрешающая способность изображения определялась визуально и при помощи программы Imatest.

Для того чтобы определить разрешающую способность изображения, необходимо знать функцию – зависимость контраста между черной и белой линиями от числа линий в кадре, так называемую контрастно-частотную характеристику (КЧХ), которую

позволяет измерить и сформировать программа Imatest [5].

Таким образом, максимально возможное количество телевизионных линий (ТВЛ) будет получено в случае, если одна линия приходится на один пиксель, что соответствует значению 0,5 цикла на пиксель. Отсюда можно получить выражение для перевода числа циклов на пиксель в ТВЛ [6]:

$$\text{ТВЛ} = (\text{СРР}/0,5) \times \text{разрешение изображения.}$$

Здесь СРР – число «циклов на пиксель» на уровне 0,5.

#### Результаты экспериментов

В ходе проведения эксперимента фотоизображение измерительной таблицы было сжато с использованием ДКП для блоков размером 8×8 и 16×16 элементов, а также с использованием ДВП для вейвлетов Хаара, Добеши 2, 4 и 6-го порядка при 5-м уровне вейвлет-разложения.

Для каждой из схем компрессии из изображения была удалена избыточность для достижения коэффициента компрессии равного 10, 20, 30, 40 и 50 раз.

Результаты измерения значений СКО и ПОСШ для схемы компрессии с использованием ДКП представлены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Результат компрессии изображения с применением блока ДКП размером 8×8 элементов

Размер блока ДКП	8×8				
	Коэффициент компрессии	10	22	30,3	40
СКО	2,77	4,18	5,68	24,56	68,58
ПОСШ	43,7	41,9	40,58	34,22	29,76

Таблица 2

Результат компрессии изображения с применением блока ДКП размером 16×16 элементов

Размер блока ДКП	16×16				
	Коэффициент компрессии	17,7	31,3	41,1	48
СКО	3,2	4,07	4,56	4,97	5,38
ПОСШ	43,02	42,02	41,53	41,15	40,81

Сводный график, отражающий результаты потери качества изображения по значению ПОСШ при использовании блоков ДКП размерами 8×8 и 16×16 элементов, представлен на рис. 3.

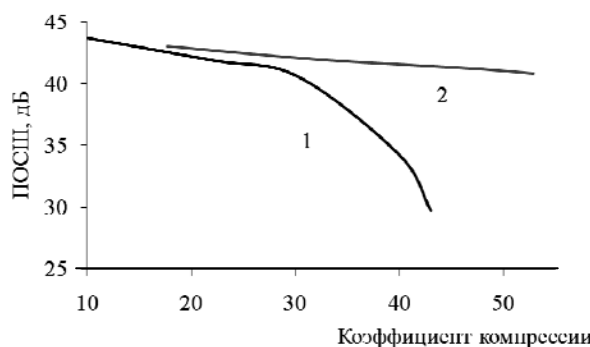


Рис. 3. Зависимости ПОСШ от коэффициента компрессии:

- 1 – ДКП-блок размером 8×8 элементов;  
2 – ДКП-блок размером 16×16 элементов



На рис. 4, 5 представлены результаты измерения разрешающей способности изображения в программе Imatest при использовании блоков ДКП размером 8×8 элементов и 16×16 элементов соответственно.

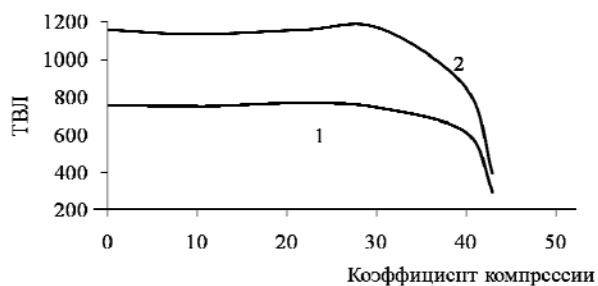


Рис. 4. Зависимости разрешающей способности от коэффициента сжатия для ДКП блока размером 8×8:

1 – вертикальное разрешение;  
2 – горизонтальное разрешение

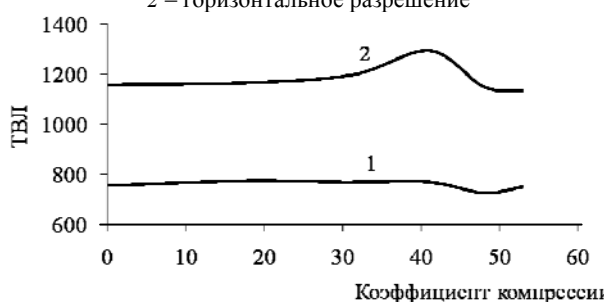


Рис. 5. Зависимость разрешающей способности от коэффициента сжатия для ДКП блока размером 16×16:

1 – вертикальное разрешение;  
2 – горизонтальное разрешение

Результаты измерения значений СКО и ПОСШ для схемы сжатия с использованием ДВП представлены в табл. 3–6.

Сводный график, отражающий результаты потери качества изображения по значению ПОСШ при использовании вейвлетов Хаара, Добеши 2, 4 и 6-го порядка, представлен на рис. 6.

На рис. 7–10 представлены результаты измерений разрешающей способности изображения в программе Imatest при использовании фильтров Добеши 2, 4 и 6-го порядка и вейвлета Хаара соответственно.

Таблица 3

**Результат сжатия изображения с применением вейвлета Добеши 2**

Тип вейвлет-фильтра	Добеши 2				
Коэффициент сжатия	11,2	21	30,6	41,2	50,6
СКО	2,57	3,67	4,33	5,08	5,89
ПОСШ	44,01	42,48	41,75	41,06	40,42

Таблица 4

**Результат сжатия изображения с применением вейвлета Добеши 4**

Тип вейвлет-фильтра	Добеши 4				
Коэффициент сжатия	11,4	22,4	30,8	41,1	50,4
СКО	3,2	3,6	4,07	4,62	5,28
ПОСШ	44,09	42,56	42,02	41,48	40,89

Таблица 5

**Результат сжатия изображения с применением вейвлета Добеши 6**

Тип вейвлет-фильтра	Добеши 6				
Коэффициент сжатия	11,3	21,7	29,6	40,4	50
СКО	2,51	3,58	4,05	4,68	5,56
ПОСШ	44,12	42,58	42,05	41,42	40,67

Таблица 6

**Результат сжатия изображения с применением вейвлета Хаара**

Тип вейвлет-фильтра	Хаар				
Коэффициент сжатия	10	20	30	40	50
СКО	2,69	3,98	5,16	6,92	9,39
ПОСШ	43,83	42,12	41	39,72	38,4

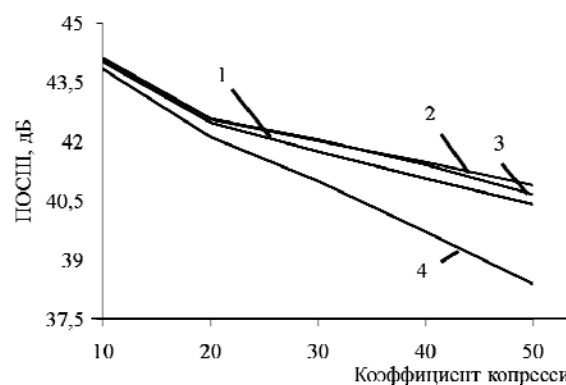


Рис. 6. Зависимости ПОСШ от коэффициента сжатия:

1 – вейвлет Добеши 2; 2 – вейвлет Добеши 4;  
3 – вейвлет Добеши 6; 4 – вейвлет Хаара

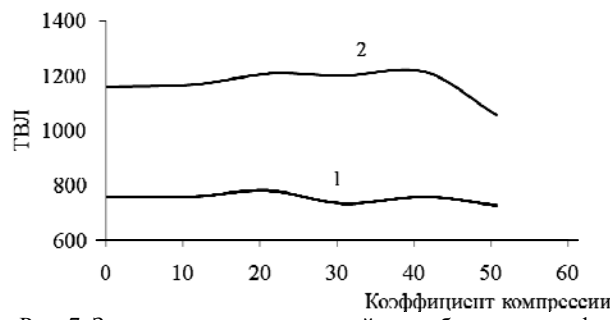


Рис. 7. Зависимости разрешающей способности от коэффициента сжатия для вейвлета Добеши 2:

1 – вертикальное разрешение;  
2 – горизонтальное разрешение

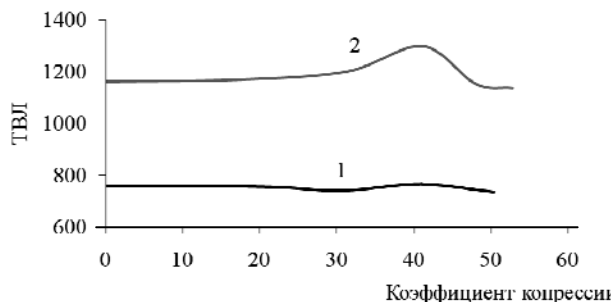


Рис. 8. Зависимости разрешающей способности от коэффициента сжатия для вейвлета Добеши 4:

1 – вертикальное разрешение;  
2 – горизонтальное разрешение

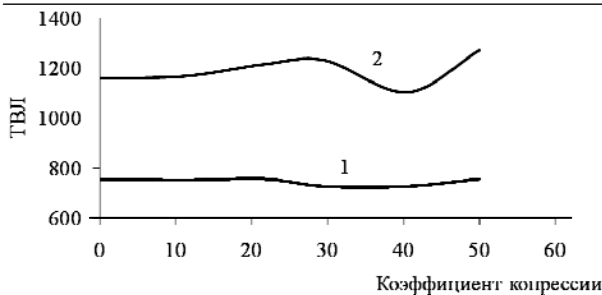


Рис. 9. Зависимости разрешающей способности от коэффициента сжатия для вейвлета Добеши 6:  
1 – вертикальное разрешение;  
2 – горизонтальное разрешение

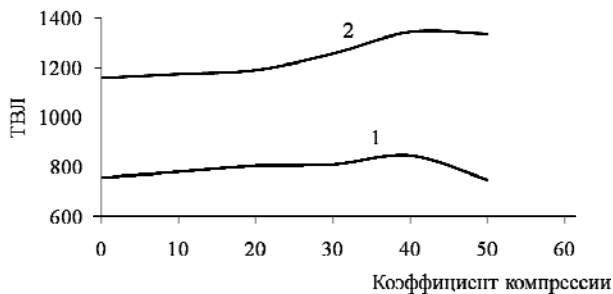


Рис. 10. Зависимости разрешающей способности от коэффициента сжатия для вейвлета Хаара:  
1 – вертикальное разрешение;  
2 – горизонтальное разрешение

На рис. 11, 12 представлены сводные изображения вертикальных и горизонтальных клиньев линий измерительной таблицы ISO 12233:2014.

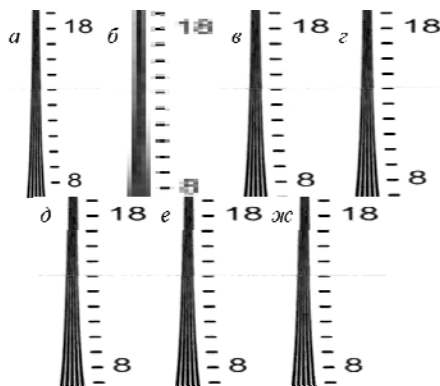


Рис. 11. Вертикальная мира, сводный рисунок при коэффициенте сжатия 50 раз: а – исходное; б – ДКП 8×8; в – ДКП 16×16; г – ДВП Добеши 2; д – ДВП Добеши 4; е – ДВП Добеши 6; ж – ДВП Хаара

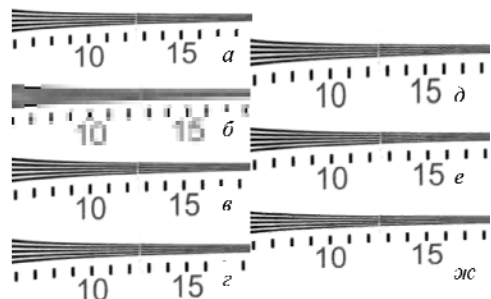


Рис. 12. Горизонтальная мира, сводный рисунок при коэффициенте сжатия 50 раз: а – исходное; б – ДКП 8×8; в – ДКП 16×16; г – ДВП Добеши 2; д – ДВП Добеши 4; е – ДВП Добеши 6; ж – ДВП Хаара

Из рис. 11 и 12 видно, что при использовании ДКП с размером блока 8×8 и сжатии изображения в 50 раз качество изображения значительно проигрывает остальным представленным методам компрессии.

#### Обсуждение результатов

Разрешающая способность фотоизображения измерительной таблицы до применения алгоритмов компрессии, измеренная в программе Imatest, составила 1160 вертикальных линий и 758 горизонтальных линий.

Стоит отметить, что такие низкие значения, разрешающей способности, полученные в программе Imatest, связаны с недостаточным контрастом исходного изображения.

При визуальной оценке разрешающей способности изображения по клиньям линий значения ТВЛ превышают полученные в программе Imatest. Число визуально различаемых вертикальных линий составило 1400 ТВЛ, число горизонтальных линий около – 1300 ТВЛ, но данная оценка является субъективной.

Кроме того, в ходе измерения разрешающей способности изображения, сжатого при помощи схемы, основанной на ДВП, были получены нестабильные результаты, показывающие рост разрешения при увеличении коэффициента сжатия. Такие же результаты после применения ДВП для искусственного изображения были получены в работе [7]. Данный факт свидетельствует о том, что использование вейвлетов вносит в изображение специфические искажения, влияющие на КЧХ.

ДКП с размером блока 16×16 элементов, также показал рост разрешающей способности изображения при коэффициенте сжатия 40, что связано, вероятно, с попаданием границы двух блоков в область измерения изображения в программе Imatest.

#### Выводы и заключение

1. Применение ДКП с размером блока 8×8 элементов для компрессии изображений высокого разрешения малоэффективно. Эффективность компрессии в данном режиме резко падает при значениях коэффициентов компрессии более 30.

2. Применение ДКП с размером блока 16×16 элементов оптимально для сжатия изображений высокого разрешения. Однако стоит отметить тот факт, что при дальнейшем увеличении разрешения изображений в какой-то момент времени применение ДКП с размером блока 16×16 также станет малоэффективным, что потребует применения блоков большего размера. Кроме того, в ходе визуальной оценки вертикальной и горизонтальной миры сжатого изображения, при высоких коэффициентах компрессии становится заметна блочная структура анализируемых участков, проявляющаяся некоторым сдвигом линий относительно друг друга, что может негативно повлиять на эффективность алгоритмов автоматического распознавания объектов.

3. Использование ДВП и в частности фильтров Добеши позволяет эффективно сжимать изображения различных разрешений без возникновения блочной структуры на сжатом изображении. В ходе

визуальной оценки вертикальной и горизонтальной миры было установлено, что при высоких коэффициентах компрессии фильтры Добеши дают менее заметные искажения, приводящие к некоторому размытию линий.

4. Полученные в данном исследовании результаты могут быть использованы при проектировании систем компьютерного зрения для обнаружения и распознавания объектов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках базовой части государственного задания № 2014/225 на 2016 год по НИР «Исследование и разработка методов и средств повышения качества изображений активно-импульсных телевизионно-вычислительных систем видения в сложных метеоусловиях и малопрозрачных средах» (код проекта 3643) и при поддержке РФФИ в рамках гранта по научному проекту №16-47-700939 «Исследование и разработка методов и средств повышения эффективности активно-импульсных телевизионно-вычислительных систем мониторинга и обеспечения комплексной безопасности объектов».

#### Литература

1. Дворкович В.П. Цифровые видеоинформационные системы: теория и практика / В.П. Дворкович, А.В. Дворкович. – М.: Техносфера, 2012. – 1008 с.
2. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс. – М.: Техносфера, 2005. – 1072 с.
3. Капустин В.В. Коррекция координатных искажений в телевизионно-вычислительных системах // Доклады Том. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники. – 2015. – № 4 (38). – С. 174–177.
4. Капустин В.В. Инструментальные средства оценки качества изображений при внутрикадровом сжатии видеоданных // Матер. XI Междунар. науч.-практ. конф. «Электронные средства и системы управления». – Томск: В-Спектр, 2015. – Ч. 2. – С. 305–309.

5. Imatest Documentation by Norman Koren [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.imatest.com/docs/> (дата обращения: 1.03.2016).

6. Malanin M.Yu. Optimization of parameters of two-dimensional filters of increase of clearness of television images on contrastly to frequency characteristics / M.Yu. Malanin, A.V. Kamenski, M.I. Kuryachiy // Control and Communications (SIBCON), IEEE 2015 International Siberian Conference on. – 2015. – P. 1–4.

7. Kapustin V.V. Estimation of intra-frame compressed image quality for JPEG and JPEG2000 standards / V.V. Kapustin, A.V. Kamenskiy // 2016 17th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM). – 2016. – P. 308–312.

---

#### Капустин Вячеслав Валериевич

Аспирант каф. телевидения и управления (ТУ) ТУСУРа  
Тел.: +7-960-969-88-77  
Эл. почта: peregnun@mail.ru

#### Каменский Андрей Викторович

Аспирант каф. ТУ ТУСУРа  
Тел.: +7-952-892-78-35  
Эл. почта: andru170@mail.ru

Kapustin V.V., Kamenskiy A.V.

#### Estimation of Intra-frame Compression Quality of a high-resolution Image for JPEG and JPEG2000 Standards

This article discusses the impact of intra-compression on the resolution of the image. The results obtained in the evaluation of the image distortion introduced after applying compression algorithms based on the discrete cosine transform and discrete wavelet by parameters such as peak signal / noise ratio, standard deviation and resolution.

**Keywords:** intra-frame compression, peak signal-to-noise ratio, mean-square error, contrast-frequency characteristic, picture resolution.

УДК 621.3.011.73

А.Е. Горяинов

## Автоматизированный синтез моделей пассивных СВЧ-компонентов в виде эквивалентных схем на основе оптимального выбора звеньев и прямой экстракции

Представлена новая методика автоматизированного синтеза моделей пассивных дискретных и интегральных СВЧ-компонентов (резисторов, конденсаторов, катушек индуктивности и др.) в виде эквивалентных схем (ЭС) на сосредоточенных элементах. Преимуществом методики является автоматизированное определение структуры модели, с этой целью осуществляются декомпозиция модели на двухполюсные звенья и оптимальный выбор структуры каждого звена. Значения элементов звеньев находятся на основе прямой экстракции с применением модифицированной статистической медианы. В качестве примеров представлено построение моделей тонкопленочного резистора для GaAs-технологии изготовления СВЧ-интегральных схем и катушки индуктивности для SiGe-технологии.

**Ключевые слова:** пассивные компоненты, СВЧ, интегральные схемы, GaAs, SiGe, модели, эквивалентные схемы, прямая экстракция, статистическая медиана, структурно-параметрический синтез.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2016-19-3-32-41

Одной из важных проблем при разработке СВЧ-устройств является построение точных и быстродействующих моделей пассивных компонентов [1–9, 11, 12]. Такая задача возникает при проектировании устройств, выполняемых в виде гибридных (ГИС) и монолитных (МИС) интегральных схем, а также СВЧ-схем на основе печатных плат и дискретных компонентов. С точки зрения применения в САПР целым рядом преимуществ (простота, быстродействие, физический смысл) обладают компактные модели пассивных компонентов, т.е. модели в виде эквивалентных схем (ЭС-модели).

Задачам построения ЭС-моделей пассивных СВЧ-компонентов посвящено много работ [1–9, 11, 12]. Для определения значений элементов ЭС в настоящее время используются три основных подхода: параметрическая оптимизация [3], прямая экстракция [1, 4–7] и комбинированный подход [1, 5, 7, 8].

Параметрическая оптимизация предполагает применение численных методов для минимизации отклонений электрических характеристик модели компонента (например, параметров рассеяния) от измеренных зависимостей в требуемом частотном диапазоне. Достоинством данного подхода является универсальность, недостатками – зависимость получаемых значений элементов ЭС от начального приближения, а также отсутствие гарантии нахождения величин элементов модели, близких к их реальным физическим значениям (например, не исключено получение отрицательных величин паразитных параметров и т.д.).

При прямой экстракции [1, 4–7] значения элементов рассчитываются непосредственно по результатам измерений компонента с помощью аналитических выражений; последние получаются путем решения системы уравнений, записанной для конкретной структуры ЭС. К преимуществам данного подхода относятся простота и скорость вычислений элементов модели, а также (при достаточной точно-

сти измерений и правильном выборе структуры модели) – физичность значений элементов ЭС. Недостатком является необходимость составления и решения системы уравнений для каждой отдельной модели.

Комбинированный подход [1, 5, 7, 8] сочетает достоинства и недостатки методов параметрической оптимизации и прямой экстракции.

Однако при применении всех рассмотренных подходов остается нерешенной задача выбора оптимальной структуры ЭС, которая должна, с одной стороны, обеспечить необходимый компромисс между сложностью и точностью модели и, с другой стороны, правильно отразить протекающие в пассивном компоненте физические процессы – например, паразитные явления и параметры, имеющие место при изготовлении компонента на основе конкретной технологии, и т.д.

В ряде работ сделаны попытки автоматической или автоматизированной генерации моделей пассивных СВЧ-компонентов по измеренным данным на основе методов классического синтеза [9, 10] или численных подходов [11–13]. В этом случае задачи определения структуры модели и значений элементов ЭС решаются одновременно. Однако получаемые таким образом ЭС пассивного компонента являются, как правило, избыточно сложными, а также формальными, т.е. они не отражают реальных физических процессов и паразитных параметров.

В связи со сказанным в настоящее время задача выбора структуры ЭС решается чаще всего эмпирически при использовании литературных данных, а также метода проб и ошибок.

Во многих работах [1, 2 и др.] представлены структуры моделей (ЭС) СВЧ-пассивных компонентов (резисторов, конденсаторов, катушек индуктивности, отверстий в подложке, контактных площадок и др.) как в дискретном, так и в интегральном исполнении. При этом обычно для одного и того же

типа компонента (например, резистора) приводится некоторое множество ЭС-моделей разной сложности и с разными структурами. Эти модели различаются как точностью представления компонента, так и отражением особенностей различных технологических процессов изготовления (например, модели пассивных компонентов для полупроводниковых GaAs- и SiGe-технологий производства МИС часто отличаются между собой).

Пользуясь этой информацией, разработчик для моделируемого компонента выбирает некоторое множество возможных структур ЭС. Далее, используя один из представленных выше методов, он находит значения элементов для выбранной структуры ЭС и затем сравнивает характеристики компонента, рассчитанные по полученной модели, с измеренными данными. При недостаточной точности модели разработчик выбирает более сложную структуру ЭС (для этого он иногда корректирует и дополняет исходную модель), далее все действия повторяются. В результате зачастую разработчику приходится выполнять построение нескольких разных моделей одного компонента, чтобы получить модель с нужным сочетанием сложности и точности. Такой процесс весьма трудоемок, так как определить пригодность выбранной структуры ЭС возможно только после расчета значений ее элементов и сравнения характеристик модели с измеренными данными.

В статье предлагается новая методика, которая позволяет выполнить автоматизированный синтез (т.е. определение структуры и значений элементов) ЭС-моделей пассивных дискретных и интегральных СВЧ-компонентов. При этом рассмотрение ограничено только моделями, состоящими из сосредоточенных элементов. Методика основана на оптимальном выборе структуры каждого звена модели, который может быть осуществлен либо автоматически с помощью предложенного алгоритма, либо самим разработчиком с использованием предоставляемой алгоритмом информации. Для автоматического определения величин элементов ЭС разработан другой численный алгоритм, основанный на прямой экстракции элементов в заданном частотном диапазоне и применении модифицированной статистической медианы. Эффективность методики продемонстрирована на примерах построения моделей тонкопленочного резистора и катушки индуктивности для GaAs- и SiGe-технологий изготовления СВЧ МИС.

#### Морфологический анализ структуры ЭС-моделей пассивных СВЧ-компонентов

Построение моделей в виде эквивалентных схем, как правило, выполняется в два этапа [1, 5]:

- 1) определение структуры (схемы) ЭС-модели;
- 2) определение значений элементов выбранной структуры.

Определение структуры ЭС-модели, как было отмечено ранее, осуществляется на основе анализа конструкции и физических процессов в компоненте, знания особенностей технологии изготовления, литературных данных и опыта разработчика моделей.

В ЭС-модели пассивного СВЧ-компонента обычно присутствуют основные элементы, соответствующие назначению компонента ( $R$  для резистора,  $C$  для конденсатора,  $L$  для индуктивности), и дополнительные элементы, характеризующие паразитные параметры.

В качестве примера на рис. 1 приведены модели пассивных сосредоточенных СВЧ-компонентов в дискретном и интегральном исполнении – резистора, конденсатора и катушки индуктивности [1, 5].

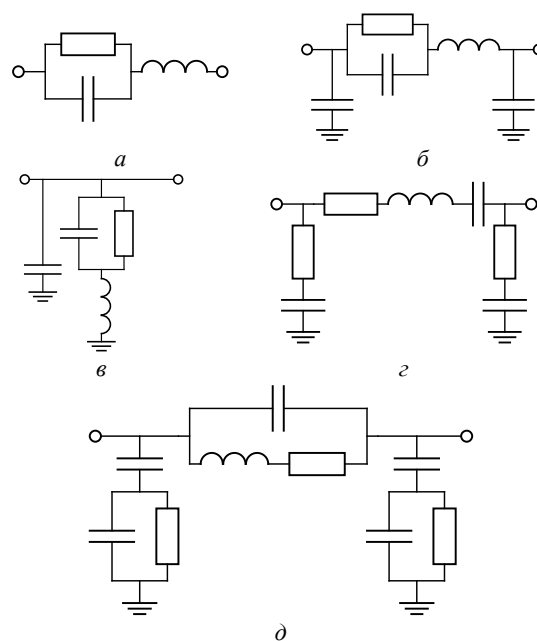


Рис. 1. Примеры ЭС-моделей СВЧ-пассивных компонентов: дискретного резистора в виде двухполюсника (а); в виде четырехполюсника при последовательном (б) и параллельном (в) включении; интегрального GaAs МДМ-конденсатора (г); и интегральной SiGe спиральной катушки индуктивности (д)

Как видно, чаще всего при моделировании пассивные СВЧ-компоненты представляются в виде четырехполюсников, при этом различаются последовательный и параллельный способы включения компонента (см. рис. 1). Однако если в рассматриваемом диапазоне частот можно пренебречь паразитными элементами, отражающими электромагнитные связи между самим компонентом и земляной плоскостью, тогда компонент может быть представлен в виде двухполюсника.

Для автоматизированного синтеза структуры целесообразно выполнить морфологический анализ ЭС-моделей пассивных компонентов СВЧ-схем [14]. Морфологический анализ позволяет представить в систематическом виде все возможные решения для создания технического объекта путем определения так называемого *морфологического множества* – пространства морфологических признаков исследуемого объекта. В случае построения ЭС-моделей такими морфологическими признаками могут выступать тип компонента, технология его изготовления, структура и сложность ЭС-модели и т.д. Таким

образом, в результате морфологического анализа разработчик получает упорядоченное представление множества возможных ЭС для применения их при построении моделей.

В ходе проведенного морфологического анализа в доступной отечественной и зарубежной литературе были рассмотрены состоящие из сосредоточенных элементов ЭС-модели пассивных СВЧ-компонентов (резисторов, конденсаторов, катушек индуктивности) как в дискретном исполнении (так называемые компоненты поверхностного монтажа, или SMD-компоненты), так и в интегральном для полупроводниковых технологий GaAs, GaN, Si и SiGe. Полученные схемы были сгруппированы по типу компонента, технологии, типовой структуре и декомпозированы на отдельные звенья. Это позволило выявить наиболее распространенные структуры моделей СВЧ пассивных компонентов (рис. 2 и 3).

На рис. 2 показаны наиболее распространенные структурные схемы ЭС-моделей. Они могут иметь вид либо пассивного двухполюсника (см. рис. 2, а), либо лестничного четырехполюсника, в последовательных и параллельных ветвях которого включены пассивные двухполюсники – звенья (см. рис. 2, б–д). В частности, здесь показаны четырехполюсники, образованные последовательным (см. рис. 2, б) и параллельным (см. рис. 2, в) включением двухполюсного звена, а также Т-образный (см. рис. 2, з) и П-образный (рис. 2, д) четырехполюсники, содержащие по три двухполюсных звена.

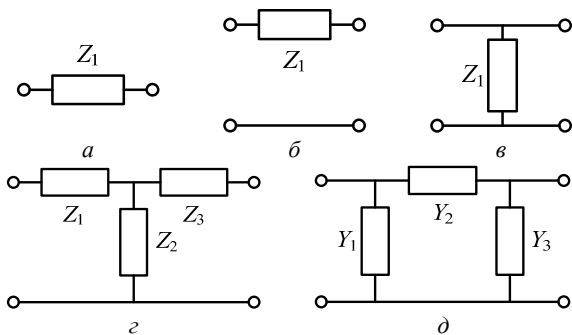


Рис. 2. Типовые структурные схемы ЭС-моделей СВЧ-пассивных компонентов

Примеры имеющихся в литературе схем на сосредоточенных элементах, которые могут использоваться в качестве звеньев в моделях СВЧ пассивных компонентов (см. рис. 2), изображены на рис. 3. Схемы звеньев могут представлять собой одиночные сосредоточенные пассивные элементы либо соединения двух, трех и четырех таких элементов. Использование в каждой из структур (см. рис. 2) конкретных схем звеньев, представленных на рис. 3, зависит от типа компонента, технологии изготовления, а также места конкретного звена в структуре. Так, при описании резистора с помощью П-образной структуры (см. рис. 2, д) в качестве звена  $Y_2$  используются схемы рис. 3, а, г, ж, л, схема рис. 3, м предназначена для моделей катушек индуктивности, а

схемы рис. 3, в, е, ж, и часто используются для описания паразитных процессов в подложке.

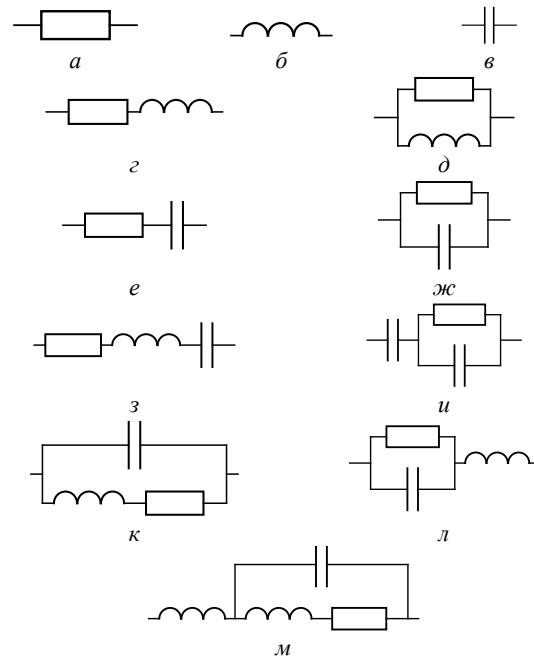


Рис. 3. Примеры типовых звеньев моделей пассивных компонентов

Полученные в результате морфологического анализа типовые структуры ЭС-моделей СВЧ-пассивных компонентов, примеры которых показаны на рис. 2 и 3, охватывают преобладающее большинство моделей, представленных в литературе. Определение морфологического множества ЭС позволяет формализовать задачу структурного синтеза моделей СВЧ-пассивных компонентов – в частности, на основе перебора структурных схем и звеньев моделей, изображенных на рис. 2 и 3.

#### Методика автоматизированного синтеза ЭС-моделей СВЧ-компонентов

Предлагаемая новая методика автоматизированного структурно-параметрического синтеза ЭС-моделей СВЧ-компонентов основана на сочетании двух идей: а) свести задачу синтеза моделей со структурными схемами на рис. 2 к синтезу отдельных ветвей (двухполюсных звеньев) [1]; б) организовать автоматизированный расчет элементов сразу для некоторого допустимого множества схем звеньев, например, из числа показанных на рис. 3, и отбор из этого множества тех звеньев, которые в наилучшей степени отвечают необходимому компромиссу между точностью и сложностью модели.

Рассмотрим реализацию этих идей. Для структурных схем моделей на рис. 2, а–в сведение задачи синтеза модели к синтезу двухполюсного звена тривиально – здесь только нужно по измеренным параметрам рассеяния с помощью известных формул найти численные значения  $Z$ - или  $Y$ -параметров звена в рассматриваемом частотном диапазоне и далее, используя эти значения, решить задачу экстракции элементов звена при известной (заранее выбранной)



его схеме. Решение последней задачи для звеньев, показанных на рис. 3, обычно не очень сложное; в частности, для звеньев на рис. 3, а–ж расчетные формулы, позволяющие определить значения элементов, представлены в литературе [1]. Для схем на рис. 3, и–м и некоторых других формулы экстракции элементов были выведены автором, но из-за ограничения места здесь не приводятся.

Для Т-образного (см. рис. 2, з) и П-образного (см. рис. 2, д) четырехполосников сведение задачи к синтезу отдельных двухполосных звеньев выполняется на основе известных формул, связывающих Z- и Y-параметры четырехполосников соответственно с импедансами и полными проводимостями звеньев [1]. Из этих формул вытекают следующие соотношения:

для Т-образного четырехполосника (рис. 2, з)

$$Z_1 = Z_{11} - Z_{12}, \quad (1)$$

$$Z_2 = Z_{22} - Z_{12}, \quad (2)$$

$$Z_3 = Z_{12} = Z_{21} \quad (3)$$

для П-образного четырехполосника (рис. 2д)

$$Y_1 = Y_{11} + Y_{12}, \quad (4)$$

$$Y_2 = Y_{22} + Y_{12}, \quad (5)$$

$$Y_3 = -Y_{12} = -Y_{21}. \quad (6)$$

Здесь  $Z_1, Z_2, Z_3$  и  $Y_1, Y_2, Y_3$  – соответственно импедансы и полные проводимости звеньев;  $Z_{ij}$  и  $Y_{ij}$  ( $i, j = 1, 2$ ) – соответственно Z- и Y-параметры четырехполосника.

Это позволяет декомпозировать структуру модели на три отдельных звена и выполнить построение моделей для частей структуры в виде двухполосников независимо друг от друга. Такой подход значительно облегчает задачу прямой экстракции элементов модели, так как вместо весьма сложной задачи определения значений элементов полной модели компонента как четырехполосника решаются три более простые задачи для двухполосных звеньев.

Методика автоматизированного синтеза ЭС-моделей СВЧ-компонентов включает следующие этапы.

1. Выбор структурной схемы модели из числа структур на рис. 2.

2. Получение (измерение) параметров рассеяния пассивного СВЧ-компонента как двухполосника или четырехполосника на фиксированных частотах  $\omega_k$  ( $k = 1, 2, \dots, m$ ) в заданном диапазоне частот  $[\omega_L, \omega_U]$ .

3. Для структур рис. 2, а–в – расчет по параметрам рассеяния желаемых численных значений иммитанса  $W_d(\omega_k)$  (сопротивления  $Z_d(\omega_k)$  или проводимости  $Y_d(\omega_k)$ ) двухполосного звена на частотах  $\omega_k \in [\omega_L, \omega_U]$ . Для структур рис. 2, з, д – расчет по параметрам рассеяния Z- или Y-параметров и затем с помощью формул (1)–(6) – желаемых численных зависимостей иммитансов  $W_{d1}(\omega_k), W_{d2}(\omega_k), W_{d3}(\omega_k)$  (импедансов  $Z_{d1}(\omega_k), Z_{d2}(\omega_k), Z_{d3}(\omega_k)$  или проводимостей  $Y_{d1}(\omega_k), Y_{d2}(\omega_k), Y_{d3}(\omega_k)$ ) двухполосных звеньев на частотах  $\omega_k \in [\omega_L, \omega_U]$ .

4. Определение множества допустимых схем (см. рис. 3) для каждого звена модели выбранной структуры на рис. 2. Решение задачи прямой экс-

тракции (т.е. определения значений элементов на основе аналитических выражений) для каждой из множества допустимых схем первого звена  $Z_1$  модели.

5. Расчет для каждой из множества допустимых схем звена  $Z_1$  частотной зависимости иммитанса  $W_c(\omega)$  и абсолютной среднеквадратичной ошибки (СКО)  $\Delta_W$  воспроизведения желаемой иммитансной характеристики  $W_d(\omega_k)$  зависимостью  $W_c(\omega)$  на частотах  $\omega_k \in [\omega_L, \omega_U]$ :

$$\Delta_W = \sqrt{\sum_{k=1}^m |W_d(\omega_k) - W_c(\omega_k)|^2 / m}. \quad (7)$$

6. Определение «наилучших» схем для звена  $Z_1$  модели, которые обеспечивают приемлемый компромисс между сложностью схемы звена и величиной СКО  $\Delta_W$ .

7. Если модель содержит несколько звеньев, – повторение пп. 5–7 для остальных звеньев ( $Z_2, Z_3$ ).

8. Составление нескольких различных ЭС-моделей СВЧ-компонента, которые образованы всеми возможными комбинациями «наилучших» схем для каждого звена.

9. Расчет параметров рассеяния полученных ЭС-моделей СВЧ-компонента в диапазоне  $[\omega_L, \omega_U]$ , сравнение с измеренными параметрами и определение относительной СКО  $\delta_S$  параметров рассеяния моделей:

$$\delta_S = \sqrt{\sum_{k=1}^m \delta_k / p^2 n}; \quad (8)$$

$$\delta_k = \sum_{i=1, j=1}^p \delta S_{ij}(\omega_k)^2; \quad (9)$$

$$\delta S_{ij}(\omega_k) = \frac{|S_{ijMeas}(\omega_k) - S_{ijModel}(\omega_k)|}{|S_{ijMeas}(\omega_k)|}, \quad (10)$$

где  $p$  – количество портов СВЧ-компонента.

10. Параметрическая оптимизация элементов полученных ЭС-моделей (при необходимости).

11. Выбор наилучшей модели.

При автоматизированном построении моделей СВЧ-компонентов на основе предложенной методики разработчик должен самостоятельно выполнить пп. 1, 2, остальные пункты могут быть реализованы автоматически компьютерным алгоритмом. В случае необходимости разработчик может также взять на себя принятие решений на этапах пп. 4, 6, 8 и 11.

Остановимся более подробно на определении множества допустимых схем для каждого звена модели (п. 4). При выборе такого множества, помимо литературных данных и результатов морфологического анализа, здесь нужно еще учитывать допустимую сложность схем звеньев, а также физические соображения, включая импедансы звеньев на нулевой и бесконечной частотах. Например, модель резистора должна обладать чисто активным (резистивным) сопротивлением на нулевой частоте, это нужно учитывать при выборе схем последовательных и параллельных звеньев в Т-образной (см. рис. 2, з) и П-образной (см. рис. 2, д) структурах модели и т.д.

### Алгоритм автоматического определения значений элементов ЭС

Одним из недостатков метода прямой экстракции является то, что расчет значений (параметров) элементов ЭС с помощью аналитических выражений обычно выполняется на основании данных измерений СВЧ-компонента в одной или двух частотных точках. При этом значения элементов ЭС, рассчитанные для разных частотных точек, могут значительно отличаться. Это связано, во-первых, с ошибками измерений и, во-вторых, с тем, что выбранная схема ЭС-модели не всегда способна точно описать поведение компонента во всем рассматриваемом частотном диапазоне.

Поэтому на практике экстракция каждого из элементов ЭС часто проводится на некотором множестве точек, расположенных во всем заданном диапазоне частот. После этого определяется частотный поддиапазон, где экстрагированная величина элемента ЭС изменяется мало (т.е. график зависимости значения элемента от частоты близок к прямой линии, параллельной оси абсцисс). Средняя величина элемента в указанном частотном поддиапазоне и выбирается в качестве окончательного экстрагированного значения.

Определить частотный поддиапазон, соответствующий постоянству значений элемента ЭС, разработчик может достаточно просто визуальным способом, построив частотную зависимость экстрагированного параметра. Однако при компьютерной реализации предложенной методики автоматизированного синтеза ЭС-моделей СВЧ-компонентов задача экстракции значений элементов должна решаться автоматически без участия человека. Заметим, что в известной литературе по построению моделей СВЧ-компонентов не приведены надежные способы автоматического решения такой задачи.

В основе предлагаемого нами алгоритма лежит сведение проблемы выбора оптимального значения элемента из определенного множества к задаче оценки числовой выборки, относящейся к математической статистике. Выборка – это некоторый набор числовых данных, например значений элемента ЭС, полученных в результате прямой экстракции. Оценка выборки – это некоторое число, которое характеризует всю выборку в целом. Например, это может быть максимальное или минимальное значение в наборе числовых данных. Однако чаще в качестве оценки выборки подразумевают некоторое число, преобладающее в конкретном наборе значений. Стоит отметить, что оценка как число необязательно входит в выборку, но рассчитывается на её основе. Так, среднее значение является оценкой преобладающего числа в числовом множестве, однако необязательно содержится в нём.

Применительно к рассматриваемой задаче экстракции элементов ЭС с точки зрения оценки выборки преимуществом перед средним значением обладает статистическая медиана. Медиана – это число, характеризующее выборку таким образом,

что ровно половина элементов выборки больше медианы, а другая половина меньше. В общем случае медиану можно вычислить, упорядочив элементы выборки по возрастанию или убыванию и взяв средний элемент. Понятие медианы используется в математической статистике благодаря лучшей устойчивости к различного рода выбросам и помехам в выборке по сравнению с усредненной величиной.

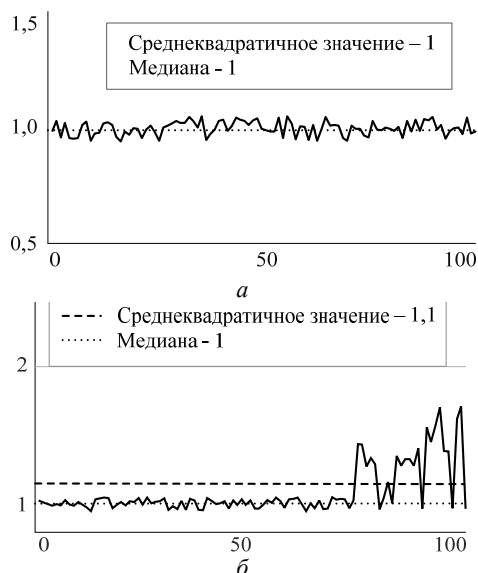


Рис. 4. Сравнение среднееквдратичного значения и медианы: *a* – на равномерной выборке; *б* – на выборке со значительным случайным выбросом

На рис. 4 приведено сравнение среднееквдратичного значения (СКЗ) и медианы для двух характерных случаев изменения некоторого параметра. Как видно, медиана даёт схожую со средним значением оценку параметра, если числа в наборе лежат в относительно небольшом интервале значений (рис. 4, *a*). Однако если в выборке присутствуют числа, значительно отличающиеся от других – так называемые «случайные выбросы», СКЗ существенно изменяется, тогда как медиана остается практически неизменной и гораздо ближе к оценке постоянной величины параметра, которую получил бы человек визуальным способом (рис. 4, *б*).

Ситуация, когда экстрагированные на разных частотах значения элемента ЭС имеют случайные выбросы (см. рис. 4, *б*), характерна при наличии случайных ошибок измерений исходных параметров рассеяния компонента. Однако достаточно часто при решении задачи экстракции наблюдается и другой случай, когда зависимость получаемого значения элемента ЭС от частоты имеет регулярный характер. Пример показан на рис. 5, где приведены частотные зависимости экстрагированных значений паразитных элементов  $R_{sub}$  и  $C_{sub}$  модели GaAs тонкопленочного резистора (рис. 5, *a*) в диапазоне от 0 до 50 ГГц.

Такая ситуация характерна, если используемая схема ЭС-модели не может с одинаковой точностью воспроизвести поведение компонента во всем заданном частотном диапазоне. При этом, например, в

результате экстракции в нижней части частотного диапазона получаются одни значения элементов ЭС, а в верхней части – другие. В рассматриваемом случае применение классической медианы неэффективно и неспособно получить результат, близкий к оценке постоянного значения параметра человеком (см. рис. 5).

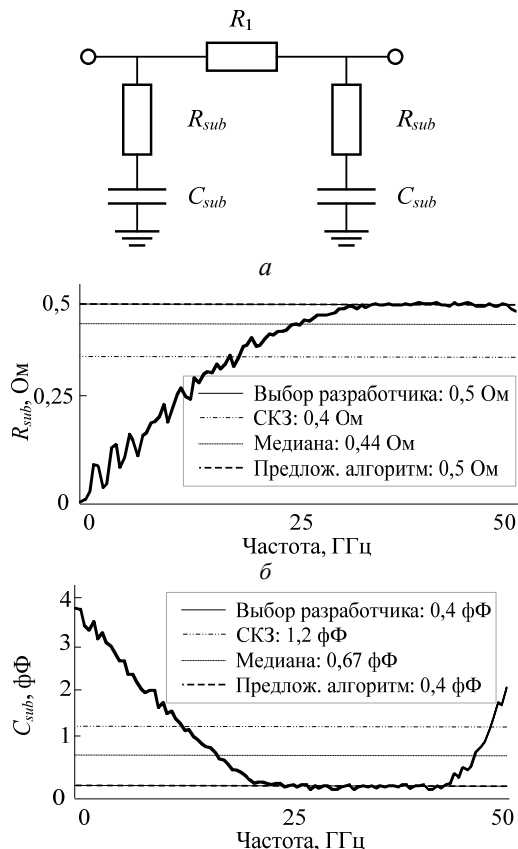


Рис. 5. ЭС-модель GaAs тонкопленочного резистора (а) и сравнение различных способов определения значений паразитных элементов: сопротивления (б) и ёмкости (в)

Для надежного определения постоянных значений элементов ЭС в ситуациях случайных выбросов и регулярных частотных зависимостей экстрагированных параметров предлагается следующий алгоритм, основанный на модификации понятия статистической медианы (далее кратко – «модифицированная статистическая медиана»):

1. Получение значений  $e_k \equiv e(\omega_k)$  ( $k = 1, 2, \dots, m$ ) элемента  $e$  звена ЭС, экстрагированных из численных зависимостей иммитанса звена  $W_d(\omega_k)$  на всех частотах  $\omega_k \in [\omega_L, \omega_U]$ .
2. Упорядочение выборки  $e_k$  ( $k = 1, 2, \dots, m$ ) по возрастанию значений элемента  $e$ .
3. Разделение выборки  $e_k$  на равные поддиапазоны  $D_1, D_2, D_3, D_4$  по значениям элемента  $e$ .
4. Расчёт разности  $\Delta e_n$  между последним (максимальным) и первым (минимальным) значениями элемента  $e$  в каждом поддиапазоне  $D_n$  ( $n = 1, 2, 3, 4$ ).
5. Среди поддиапазонов  $D_n$  определение поддиапазона  $D_J$  ( $J = 1, 2, 3, 4$ ) с наиболее постоянными

значениями элемента  $e$  (т.е. с наименьшей разностью  $\Delta e_n$ ):  $\Delta e_J = \min(\Delta e_1, \Delta e_2, \Delta e_3, \Delta e_4)$ .

6. Определение результирующей экстрагированной величины  $e_{extr}$  элемента  $e$  как медианы значений  $e_k$  в поддиапазоне  $D_J$ .

Разделение выборки на равные поддиапазоны по значениям элемента обусловлено поиском участка выборки с постоянным частотнезависимым значением элемента. Для определения участка с наименьшей частотной зависимостью выполняется расчет разности между первым и последним значением элемента каждого поддиапазона. Количество поддиапазонов, равное 4, объясняется имеющимся опытом построения моделей – если в выборке значений элемента, полученной с помощью прямой экстракции, нет поддиапазона частот, занимающего четверть и более исходного диапазона частот, где величина экстрагированного элемента ЭС меняется мало, высока вероятность неправильного выбора структуры ЭС-модели (т.е. эту структуру необходимо изменить).

На рис. 5 представлено сравнение различных способов выбора значения элемента при прямой экстракции паразитных сопротивлений  $R_{sub}$  и ёмкости  $C_{sub}$  в модели тонкопленочного резистора – с применением усреднения, статистической медианы и предложенного алгоритма (модифицированная статистическая медиана). Здесь же показана оценка постоянного значения элемента, сделанная визуальным способом экспертом-разработчиком модели. Очевидно, что оценка, найденная с помощью предложенного алгоритма, очень близка к экспертной оценке разработчика модели. Это свидетельствует о возможности применения алгоритма для автоматического решения задач экстракции моделей.

Предложенная методика построения моделей и алгоритм автоматического определения значений элементов ЭС реализованы в программе *Extraction-P* [6], предназначенной для построения моделей сосредоточенных пассивных СВЧ компонентов.

Ниже приведены примеры применения разработанных методики, алгоритмов и ПО для построения моделей интегральных пассивных сосредоточенных элементов, изготовленных на основе GaAs и SiGe монокристаллических технологий.

### Построение модели интегрального тонкопленочного резистора

Рассмотрим построение модели тонкопленочного резистора величиной 375 Ом, изготовленного по 0,15 мкм GaAs-pHEMT-технологии СВЧ МИС. Измерения параметра рассеяния  $S_{11}$  компонента были выполнены с одним заземленным выводом (т.е. как двухполюсника) в диапазоне частот 2–50 ГГц с шагом 0,48 ГГц. С этой целью на полупроводниковой пластине был изготовлен специальный тестовый элемент, который измерялся на зондовой станции.

Очевидно, в данном случае следует выбрать структуру модели резистора в виде двухполюсника (см. рис. 2, а). Множество допустимых схем единственного двухполюсного звена ограничим цепями

(см. рис. 2, а, з, ж, к). Далее для каждой цепи была выполнена автоматическая прямая экстракция значений элементов с использованием предложенного алгоритма, основанного на модифицированной статистической медиане. При этом аналитические формулы для экстракции были либо взяты из литературы, либо выведены самостоятельно.

В качестве примера на рис. 6 приведены результаты прямой экстракции значений элементов из исходных параметров рассеяния для цепи рис. 3, ж. С помощью алгоритма оценки выборки были получены значения элементов  $R$  и  $C$  – соответственно 375,34 Ом и 5,72 фФ (показаны на рис. 6 штриховыми линиями).

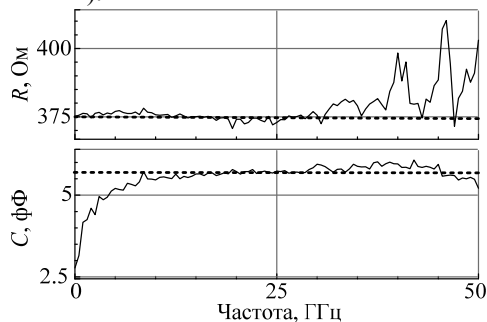


Рис. 6. Результат прямой экстракции значений элементов модели резистора в виде параллельной  $RC$ -цепочки

На следующем шаге необходимо выполнить моделирование каждой цепи с рассчитанными значениями элементов и оценить СКО импеданса модели относительно измеренных данных. Сравнение импедансов  $Z_1 \equiv Z_{11}$ , рассчитанных из результатов измерений  $S_{11}$  и полученных путём моделирования, для двух цепей представлено на рис. 7.

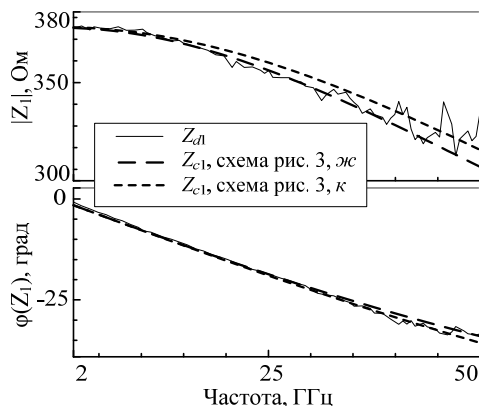


Рис. 7. Частотные зависимости модуля и фазы желаемого импеданса звена и импеданса схем

Информация, характеризующая построенные таким образом различные модели тонкопленочного резистора, дана в табл. 1. Здесь для каждой модели приведены:

- 1) значения элементов ЭС-модели;
- 2) значение абсолютной СКО  $\Delta_Z$  воспроизведения желаемой частотной характеристики импеданса звена  $Z_d(\omega_k)$  в частотном диапазоне 2–50 ГГц, вычисляемой по формуле (7);

- 3) значение относительной СКО  $\delta_S$  воспроизведения моделью измеренного параметра рассеяния  $S_{11}$  резистора, вычисляемой по формуле (8).

Таблица 1  
Значения элементов и СКО  
для различных моделей тонкопленочного резистора

Цепь, рис.	$R$ , Ом	$L$ , нГн	$C$ , фФ	$\Delta_Z$ , Ом	$\delta_S$ , %
3, а	372,1	–	–	0,051	7,41
3, з	372,1	Н/з	–	–	Н/з
3, ж	375,3	–	5,72	<b>0,0031</b>	<b>0,335</b>
3, к	375,6	0,254	7,54	0,0032	0,337

Примечание. \*Н/з – нет значения. В результате экстракции не удалось рассчитать значение элемента.

Из табл. 1 видно, что наименьшие погрешности импеданса  $Z_1 \equiv Z_{11}$  и параметра рассеяния  $S_{11}$  обеспечивают модели резистора на рис. 3, ж и рис. 3, к. Однако модель рис. 3, ж в виде параллельной  $RC$ -цепочки содержит наименьшее число элементов. Поэтому ее целесообразно использовать в качестве модели интегрального резистора в САПР.

Следует также отметить, что прямая экстракция для модели резистора в виде последовательной  $RL$ -цепочки (см. рис. 3, з) приводит к нефизическим отрицательным значениям элемента  $L$  во всем частотном диапазоне. Это означает, что данная ЭС является неподходящей для описания поведения тонкопленочного резистора.

На рис. 8 представлено сравнение измеренных значений модуля и фазы коэффициента отражения  $S_{11}$  тонкопленочного GaAs-резистора с рассчитанными по полученной модели (см. рис. 3, ж). Данные табл. 1 и рис. 8 свидетельствуют о высокой точности модели.

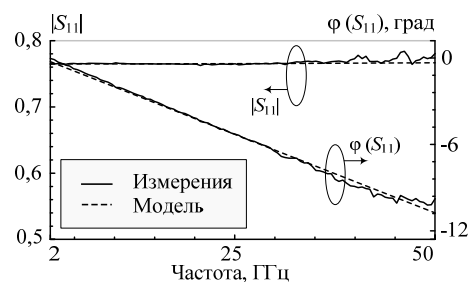


Рис. 8. Сравнение измеренных значений модуля и фазы коэффициента отражения  $S_{11}$  тонкопленочного GaAs-резистора с рассчитанными по модели рис. 3, ж

### Построение модели интегральной спиральной катушки индуктивности

Выполним построение модели интегральной квадратной спиральной катушки индуктивности величиной 1 нГн, изготовленной по технологии 0,25 мкм SiGe BiCMOS. Модель катушки в четырехполюсном включении строится на основе результатов зондовых измерений компонента в диапазоне частот 0,3–17 ГГц с шагом 0,1 ГГц. Следует отметить, что частота 1-го резонанса катушки индуктивности находится выше указанного частотного диапазона.

В соответствии с проведенным морфологическим анализом для модели были выбраны следующие структурные ограничения:

1. П-образная типовая структура (см. рис. 2, д).
2. Цепи рис. 3, б, г, д, к для звена  $Z_2 (Y_2)$ .
3. Цепи рис. 3, в, е, ж, и для звеньев  $Z_1 (Y_1)$  и  $Z_3 (Y_3)$  с целью описания паразитных сопротивлений и ёмкостей кремниевой подложки.

При оценке моделей оказалось более удобным оперировать с импедансами звеньев  $Z_l = 1/Y_l$  ( $l = 1, 2, 3$  – номер звена). На рис. 9 показаны частотные зависимости модуля и фазы для желаемых импедансов всех звеньев, а также импедансов некоторых из указанных выше схем звеньев, элементы которых были найдены с помощью прямой экстракции.

В табл. 2–4 для всех исследованных схем, используемых в звеньях модели, представлены абсолютные СКО  $\Delta_{Zl}$  [формула (7)], максимальные относительные ошибки модуля  $\max\delta(|Z_{dl}| - |Z_{cl}|)$  и максимальные абсолютные ошибки фазы  $\max\Delta(\varphi(Z_{dl}) - \varphi(Z_{cl}))$  импедансов  $Z_l$  в частотном диапазоне 0,3–17 ГГц.

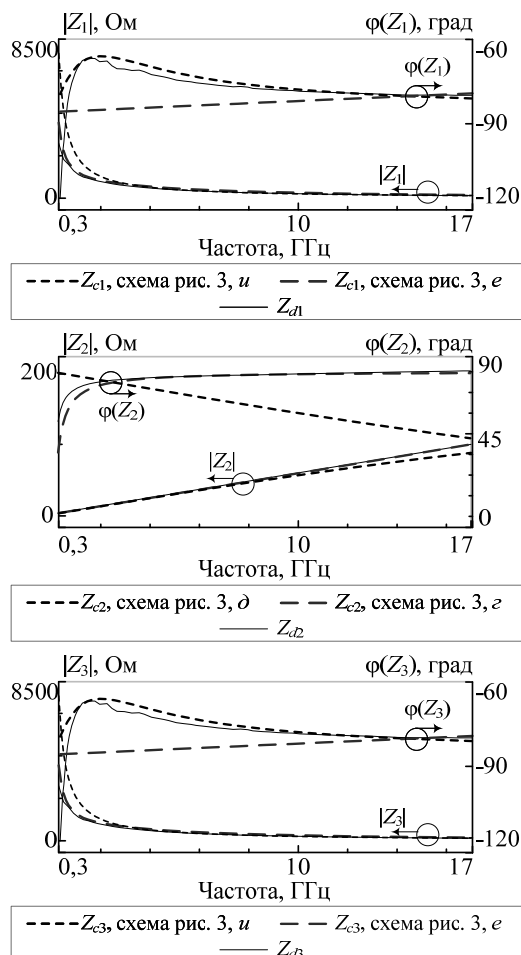


Рис. 9. Частотные зависимости модуля и фазы для желаемых импедансов звеньев  $Z_1, Z_2, Z_3$  и импедансов рассчитанных схем звеньев

В соответствии с данными табл. 2–4 для звена  $Z_2$  выбрана схема рис. 3, г, а для звеньев  $Z_1$  и  $Z_3$  – схема рис. 3, и. В результате получена ЭС-модель

интегральной спиральной катушки индуктивности на основе технологии SiGe, показанная на рис. 10. Следует отметить, что ЭС является несимметричной (значения паразитных элементов, моделируемых цепями в звеньях  $Z_1$  и  $Z_3$ , отличаются между собой, хотя и близки). Это естественно, так как конструкция катушки индуктивности также несимметрична.

Таблица 2

**Погрешности импеданса  $Z_1$  для схем звена  $Z_1$**

Цепь, рис.	$\max\delta( Z_{d1}  -  Z_{c1} )$ , %	$\max\Delta(\varphi(Z_{d1}) - \varphi(Z_{c1}))$ , град	$\Delta_{Z1}$ , Ом
3, в	1,6	40,3	0,1
3, е	1,2	40,5	0,019
3, ж	54,9	120,7	0,015
3, и	38,6	49,1	0,004

Таблица 3

**Погрешности импеданса  $Z_2$  для схем звена  $Z_2$**

Цепь, рис.	$\max\delta( Z_{d2}  -  Z_{c2} )$ , %	$\max\Delta(\varphi(Z_{d2}) - \varphi(Z_{c2}))$ , град	$\Delta_{Z2}$ , Ом
3, б	11,7	28,47	0,11
3, г	3,18	13,13	0,057
3, д	11,4	21,1	0,10
3, к	н/з	н/з	н/з

Таблица 4

**Погрешности импеданса  $Z_3$  для схем звена  $Z_3$**

Цепь, рис.	$\max\delta( Z_{d3}  -  Z_{c3} )$ , %	$\max\Delta(\varphi(Z_{d3}) - \varphi(Z_{c3}))$ , град	$\Delta_{Z3}$ , Ом
3, в	1,8	26,7	0,095
3, е	1,3	25,9	0,018
3, ж	56,9	101,5	0,016
3, и	41,1	44,3	0,004

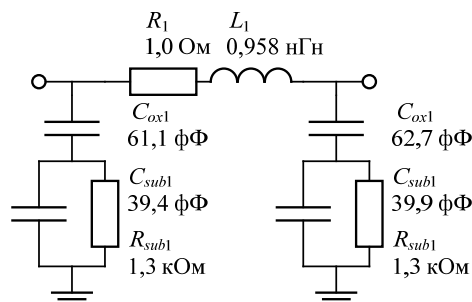


Рис. 10. Полученная ЭС-модель катушки индуктивности на основе технологии SiGe

Рисунок 11 иллюстрирует сравнение параметров рассеяния катушки индуктивности, полученных в результате измерения, с рассчитанными по модели. В табл. 5 приведены максимальные погрешности модели для модулей и фаз всех S-параметров, рассчитанные в диапазоне 0,3–17 ГГц.

На частотах выше 2 ГГц максимальные относительные ошибки параметров рассеяния по модулю не превышают 3,1%, а максимальные абсолютные ошибки по фазе находятся в пределах 4,0°. На частотах ниже 1 ГГц максимальные погрешности фаз параметров  $S_{11}$  и  $S_{22}$  достигают соответственно 11,3 и 11,2°. Однако это не имеет большого значения, так как в указанном частотном диапазоне величины  $|S_{11}|, |S_{22}| < -25$  дБ, т.е. входной и выходной импедансы

катушки индуктивности в стандартном тракте близки к 50 Ом независимо от фаз  $S_{11}$  и  $S_{22}$ .

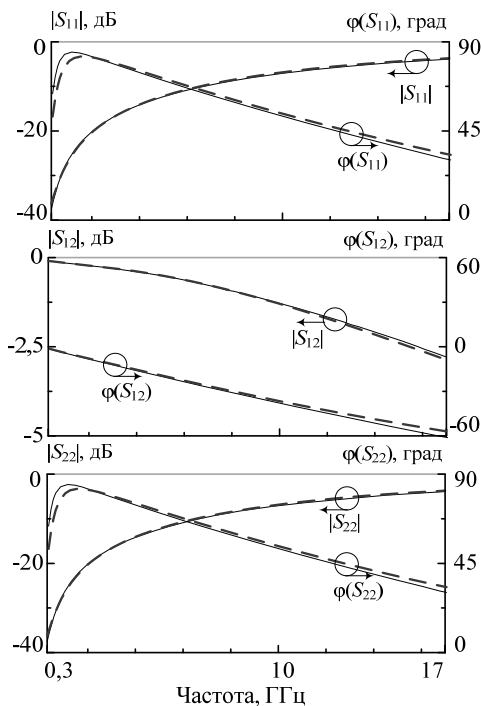


Рис. 11. Сравнение измеренных параметров рассеяния катушки индуктивности с рассчитанными по модели

Таблица 5

**Ошибки модели интегральной квадратной спиральной катушки индуктивности**

Ошибка	Значение ошибки	
	0,3–2 ГГц	2–17 ГГц
$\max \delta  S_{11} , \%$	0,5	3,1
$\max \delta  S_{12} , \%$	0,4	2,6
$\max \delta  S_{22} , \%$	0,5	2,6
$\max \Delta \varphi(S_{11}), \text{град}$	11,3	2,9
$\max \Delta \varphi(S_{12}), \text{град}$	0,3	4,0
$\max \Delta \varphi(S_{22}), \text{град}$	11,2	2,9

При разработке моделей конденсаторов и катушек индуктивности важно также воспроизведение добротности компонента. На рис. 12 приведены частотные зависимости добротности катушки, рассчитанные по измеренным  $S$ -параметрам и по модели.

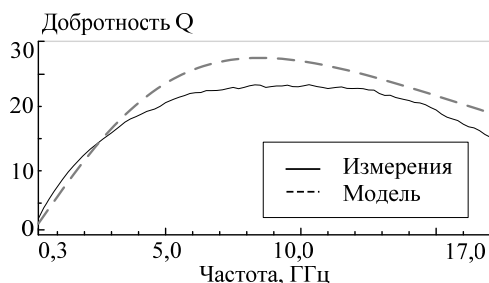


Рис. 12. Частотные зависимости добротности катушки, рассчитанные по измеренным  $S$ -параметрам и по модели

Из рис. 11, 12 и табл. 5 следует, что построенная модель интегральной катушки индуктивности с

достаточной для практики точностью описывает ее характеристики.

Приведенные примеры показывают, что рассмотренная методика позволяет решить задачу структурно-параметрического синтеза ЭС-моделей различных пассивных СВЧ-компонентов, обеспечивая одновременно приемлемую точность моделей.

### Заключение

Представленная методика по сравнению с существующими методами построения моделей пассивных СВЧ-компонентов имеет ряд преимуществ. В отличие от традиционных подходов (параметрическая оптимизация, прямая экстракция и комбинированный подход), она дает возможность определять не только значения элементов, но и структуру (схему) ЭС-модели. В отличие от приводящих к формальным моделям методов структурного синтеза ЭС, основанных на классической теории цепей [9, 10] либо итерационных стохастических и интеллектуальных алгоритмах [11–13], она позволяет контролировать структуру модели путем задания множества допустимых цепей в звеньях. Благодаря этому, во-первых, можно добиться необходимого компромисса между сложностью и точностью модели; во-вторых, сохраняется физичность ЭС-модели, т.е. отражение свойств конструкции реального компонента (паразитные элементы и др.). Использование алгоритма, основанного на декомпозиции модели, оптимальном выборе звеньев и прямой экстракции, в комбинации с предложенным алгоритмом определения значений элементов ЭС на базе модифицированной статистической медианы обеспечивает автоматизацию построения моделей при значительном выигрыше во времени по сравнению с традиционными подходами.

### Литература

1. Bahl I.J. Lumped elements for RF and microwave circuits / I.J. Bahl. – Boston; London: Artech House, 2003. – 488 p.
2. Noyan K. Modern Microwave Circuits / K. Noyan, M.I. Aksun. – Boston; London: Artech House, 2005. – 604 p.
3. Extraction of Passive Device Model Parameters Using Genetic Algorithms / I. Yun, L.A. Carastro, R. Poddar, M.A. Brooke, G.S. May, H. Kyung-Sook, K.E. Pyun // ETRI Journal. – 2000. – Vol. 22, № 1. – P. 38–46.
4. Accurate Systematic Model-Parameter Extraction for On-Chip Spiral Inductors / H.-H. Chen, H.-W. Zhang, S.-J. Chung, J.-T. Kuo, T.-C. Wu // IEEE Trans. on Electron Devices. – 2008. – Vol. 55, № 11. – P. 3267–3273.
5. Добуш И.М. Построение моделей пассивных элементов и автоматизированное проектирование СВЧ-монокристаллических усилителей с учетом влияния температуры: дис. ... канд. техн. наук: 05.12.07. – Томск, 2012. – 199 с.
6. Добуш И.М. Программа экстракции эквивалентных схем пассивных СВЧ-компонентов в среде символьных вычислений / И.М. Добуш, М.В. Черкашин, Л.И. Бабак // Электронные средства и системы управления: матер. докладов междунар. науч.-практ. конф. – Томск: В-Спектр, 2011. – С. 161–168.
7. Горяинов А.Е. Программа для экстракции параметров эквивалентных схем пассивных компонентов СВЧ-монокристаллических интегральных схем / А.Е. Горяинов, А.В. Степачева, И.М. Добуш, Л.И. Бабак // 22-я Междунар. Крым-



ская конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии»: сб. трудов. – Севастополь: Вебер, 2012. – Т. 1. – С. 129–130.

8. Durev V. Parameter Extraction of Geometry Dependent RF Planar Inductor Model / V. Durev, E. Gadjeva, M. Hristov // 17<sup>th</sup> International Conference: Mixed Design of Integrated Circuits and Systems: proceedings. – Wroclaw, 2010. – P. 420–424.

9. Choi K.L. Development of Model Libraries for Embedded Passives Using Network Synthesis / K.L. Choi, M. Swaminathan // IEEE Trans. on Circuits and Systems – II: Analog and Digital Signal Processing. – 2000. – Vol. 47, №4. – P. 249–260.

10. Mangold T. Full-wave modeling and automatic equivalent-circuit generation of millimeter-wave planar and multilayer structures / T. Mangold, P. Russer // IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques. – 1999. – Vol. 47, №6. – P. 851–858.

11. Baden Fuller A.J. Computer optimization of circuits applied to the modelling of microwave IC passive components / A.J. Baden Fuller // IEE Microwaves, Antennas and Propagation: Proceedings. – 1986. – Vol. 133, №5. – P. 411–418.

12. Gadjeva E. Analysis, model parameter extraction and optimization of planar inductors using MATLAB / E. Gadjeva, V. Durev, M. Hristov // Matlab – Modelling, Programming and Simulations – InTech, 2010. – P. 277–301.

13. Koza J.R. Automated synthesis of analog electrical circuits by means of genetic programming / J.R. Koza, F.H. Bennett // IEEE Trans. on Evolutionary Computation. – 1997. – Vol. 1, № 2. – P. 109–128.

14. Акимов С.В. Анализ проблемы автоматизации структурно-параметрического синтеза // Доклады ТУСУРа. – 2011. – № 2, ч. 2. – С. 204–211.

---

**Горяинов Александр Евгеньевич**

Мл. науч. сотр. лаборатории интеллектуальных компьютерных систем ТУСУРа

Тел.: +7-913-841-24-29

Эл. почта: goryainov.alex@gmail.com

Goryainov A.E.

**Automated synthesis of passive microwave component models represented as equivalent circuit and based on optimal choice of subcircuits and direct extraction**

A new technique for automated synthesis of passive microwave components (resistors, capacitors, inductors, etc.) models in the form of equivalent circuits (EC-models) is presented. An advantage of the technique is an automated definition of EC structure by model decomposition into one port subcircuits and optimal choice of each subcircuit. Elements' values are determined by direct extraction and modified statistical median. As an example, GaAs thin-film resistor and SiGe BiCMOS inductor models constructing is presented.

**Keywords:** passive components, microwave, GaAs, SiGe, model constructing, EC-models, direct extraction, statistical median, structural-parametric synthesis.

УДК 621.397.4

Н.И. Мищенко, И.Н. Пустынский, В.В. Капустин

## Методы и средства повышения эффективности активно-импульсных телевизионно-вычислительных систем мониторинга и обеспечения безопасности объектов

Выполнен анализ применяемых в настоящее время телевизионных систем и комплексов видеонаблюдения и контроля объектов. Рассмотрены и предложены методы и средства, позволяющие повысить технические характеристики телевизионно-вычислительных систем мониторинга и обеспечения безопасности объектов в различных условиях окружающей среды.

**Ключевые слова:** видеосистема, освещенность, дальность, изображение, наблюдение, измерение, информативные параметры, безопасность.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2016-19-3-42-46

В настоящее время для мониторинга, наблюдения, контроля и обеспечения безопасности объектов применяются телевизионные (ТВ) системы и комплексы, формирующие и обрабатывающие видеосигналы и изображения объектов телевизионно-вычислительными средствами. Полученная в результате обработки видеoinформация используется для обнаружения, распознавания, измерения параметров объектов, передачи видеоданных и команд на пункты наблюдения или управления объектами. К таким системам относятся и видеoinформационные телевизионно-вычислительные системы наблюдения или приборы визуализации изображений, в которых выполняется обработка изображений и формирование видеoinформации, необходимой для измерительных и автоматических устройств или комплексов интеллектуального управления автомобилей и других транспортных средств [1].

Для увеличения эффективности комплексов мониторинга и обеспечения безопасности объектов, применяемых в различных условиях окружающей среды, необходимы исследования и разработка методов и средств, позволяющих повысить основные технические характеристики видеoinформационных систем: динамический диапазон регулировки входной освещенности, глубины дальности видимости, точности измерения информативных параметров, достоверности обнаружения, распознавания и идентификации объектов в сложных условиях видимости [2].

### Назначение систем

В зависимости от назначения системы мониторинга и обеспечения безопасности (МОБ) объектов могут использоваться в космических, воздушных, наземных, подземных, надводных и подводных условиях окружающей среды. В состав комплексной системы МОБ-объектов входят ТВ-система, аппаратно-программные средства обработки сигналов, изображений и видеoinформации, блоки формирования и передачи видеоданных и команд на пульты управления дистанционно управляемых, автоматизированных систем или на исполнительные устройства автономных робототехнических аппаратов и комплексов, устройства подсветки объектов в сложных условиях видимости и источники питания. В

воздушных, наземных и надводных условиях системы МОБ-объектов могут применяться и решать поставленные задачи в любое время суток, в солнечный день, в сумерки и ночью, при малой яркости и контрасте объектов интереса, ограниченной или низкой прозрачности атмосферы, при воздействии различных осадков, тумана, дымки, пыли и световых помех.

Системы МОБ-объектов должны быть мобильными, так как мониторинг, видеонаблюдение и контроль выполняются не только за локальными, малоразмерными, но и за протяженными объектами, за состоянием больших площадей и территорий земной и водной поверхности. В воздушных условиях наблюдения наиболее эффективными средствами для наблюдения, обнаружения, распознавания, идентификации и измерения информативных параметров объектов являются малые и средние дистанционно-управляемые или автономные, беспилотные летательные аппараты, использование которых гораздо безопаснее и дешевле по сравнению с пилотируемыми самолетами и вертолетами [3]. Беспилотные летательные аппараты могут применяться для охраны и воздушного патрулирования местности, обнаружения очагов пожаров, спасательно-поисковых работ, дистанционного наблюдения за удаленными, необслуживаемыми объектами и окружающей обстановкой в опасных или недоступных для человека местах.

В наземных и надводных условиях наиболее эффективно системы МОБ-объектов могут использоваться для управления подвижными транспортными средствами. Для автоматического управления аппаратно-программные средства систем должны в режиме реального времени получать и обрабатывать сигналы и изображения объектов, находящихся в поле зрения видеокамер, формировать и выдавать необходимую видеoinформацию или команды управления на устройства отображения, расположенные в кабине водителя, или на исполнительные устройства транспортных средств. Видеокамеры могут применяться для обзора, обнаружения, распознавания и измерения параметров объектов перед транспортным средством, за ним и в боковых на-

правлениях, позволяя водителю более уверенно ориентироваться в сложных условиях видимости. Для увеличения поля зрения видеокамер применяются широкоугольные объективы, вызывающие искажения координат, размеров, формы и других информативных параметров объектов. Для коррекции искажений и повышения точности измерений параметров применяются специальные методы, алгоритмы и программы цифровой обработки изображений объектов телевизионно-вычислительными средствами [4]. Основными задачами и проблемами, которые в настоящее время ограничивают применение автоматизированных или беспилотных, автономно управляемых автомобилей и других транспортных средств являются достоверное обнаружение, распознавание, определение параметров окружающих подвижных объектов и принятие правильных решений, обеспечивающих их безопасность в сложных ситуациях и условиях окружающей среды.

Кроме воздушных, наземных и надводных систем МОБ-объектов видеонаблюдения создаются различные подводные мобильные дистанционно управляемые автоматизированные или автономные аппараты и робототехнические комплексы. Мобильные подводные системы могут использоваться для мониторинга большеразмерных объектов и территорий, технического обследования плотин, мостов, поиска и обнаружения затонувших объектов, инспекции подводных магистральных газовых и нефтяных трубопроводов, кабелей и других подводных коммуникаций и объектов [5]. В ручном, дистанционном режиме управления оператор может наблюдать за подводной обстановкой и окружающей средой, следить за работой системы МОБ-объектов и управлять ее движением в нужном направлении при помощи команд, передающихся по каналу связи. В наиболее простых робототехнических комплексах передача команд от оператора и трансляция информации от видеосистемы выполняется по кабелю, связывающему мобильный аппарат с пультом управления. В автономных режимах работы, как и в наземных комплексах, управление подводными аппаратами может выполняться бортовыми компьютерами.

Подземные системы МОБ-объектов применяются для видеонаблюдения и оперативного контроля технологических процессов добычи полезных ископаемых шахтным способом, повышения эффективности работы горнодобывающего оборудования и обеспечения безопасного труда горняков и горноспасателей. Мобильные дистанционно управляемые автоматизированные или автономные подземные аппараты и робототехнические комплексы могут применяться для работы в труднодоступных и удаленных местах, в сложных условиях видимости, в полной темноте и низкой освещенности объектов, при воздействии дымки, пыли, взрывоопасных газов и в других сложных и опасных ситуациях и условиях окружающей среды.

#### **Режимы работы систем**

В зависимости от назначения и условий окружающей среды применяются различные режимы

работы систем и комплексов МОБ-объектов: непрерывные пассивный или активный и активно-импульсный режимы с подсветкой объектов, стробированием и селекцией сигналов излучения отраженных от объектов. Одной из задач и проблем повышения эффективности систем МОБ-объектов является обеспечение их работоспособности в реальных условиях окружающей среды при изменении освещенности объектов, фона и яркости оптических помех.

Системы МОБ-объектов должны обладать широким динамическим диапазоном входной освещенности и подстраиваться к ее изменениям в реальном режиме времени. Для адаптации к различным условиям окружающей среды, регулировки светового динамического диапазона видеокамер и обеспечения оптимальной освещенности фоточувствительных элементов преобразователей свет-сигнал применяется оперативное ручное или автоматическое изменение параметров и режимов работы систем.

Пассивный непрерывный режим работы систем МОБ-объектов применяется при нормальных естественных уровнях освещенности объектов и поля зрения видеосистем, позволяющих получать высокое качество наблюдаемых изображений, повышенные достоверность обнаружения и распознавания, точность измерения информативных параметров объектов и видеоданных. Активный непрерывный режим работы с дополнительной подсветкой объектов наблюдения импульсным излучением применяется в воздушных, наземных и подземных, надводных и подводных условиях, в закрытых помещениях и сооружениях, в полной темноте или при низких уровнях естественной освещенности поля зрения видеокамер, не позволяющих получать необходимые характеристики систем.

Освещенность окружающей среды и объектов в воздушных, наземных и надводных условиях может изменяться в широких пределах от максимальных значений в ясный солнечный день более  $10^5$  лк до минимальной освещенности в безлунную ночь и при сплошной облачности менее  $10^{-4}$  лк. Для адаптации к условиям наблюдения и освещенности окружающей среды применяются ручная или автоматическая регулировка параметров систем. Широкий диапазон динамического регулирования освещенности может обеспечиваться в результате изменения диафрагмы или относительного отверстия объективов, регулировки экспозиции преобразователей свет-сигнал, длительности и скважности импульсов излучения и стробирования затворов электронно-оптических преобразователей (ЭОП) или светочувствительных элементов матриц видеокамер. Если изменение диафрагмы приемного объектива уменьшает избыточную освещенность фона и оптических помех до  $2 \cdot 10^2$ , а стробирование затворов до  $2 \cdot 10^5$ , то динамический диапазон регулировки освещенности может увеличиться до  $4 \cdot 10^7$ , что позволит адаптироваться к освещению окружающей среды и повысить характеристики систем МОБ-объектов.

Для подсветки объектов применяются лазерные импульсные излучатели со спектром излучения, совпадающим с полосой пропускания излучения окружающей среды и спектральной чувствительностью фотокаатода ЭОП или светочувствительных элементов матриц видеокамер. В воздушных и наземных условиях в качестве источников подсветки используются инфракрасные, лазерные, полупроводниковые, диодные источники с небольшим ослаблением излучения в атмосфере и возможностью скрытного наблюдения и обеспечения безопасности объектов. Для расширения диапазона регулировки освещенности в оптическую систему комплексов МОБ-объектов включаются узкополосные фильтры с полосой пропускания, совпадающей со спектром

излучаемых импульсов подсветки. Спектральная селекция отраженных от объектов сигналов может в (10–100) раз уменьшить освещенность от окружающей среды или помех, не совпадающих со спектром излучения подсветки, что позволит при регулировке других параметров системы увеличить до  $4 \cdot 10^9$  общий диапазон адаптации к изменяющемуся освещению объектов и окружающей среды.

Активно-импульсный режим работы систем с подсветкой объектов импульсами излучателя и селекцией отраженных от объектов сигналов (рис. 1) применяется при работе активно-импульсных телевизионно-вычислительных систем (АИТВС) в сложных условиях видимости [1, 2].



Рис. 1. Структурная схема активно-импульсной телевизионно-вычислительной системы

В состав системы входят: оптический блок с входным объективом, формирующим поле зрения системы, диафрагмой объектива, регулирующей световой динамический диапазон и оптическим фильтром, обеспечивающим спектральную селекцию объектов; ЭОП с микроканальными пластинами, усиливающий яркость изображения поля зрения; согласующий объектив для переноса изображения с экрана ЭОП на матрицу ТВ-камеры; блок обработки изображений; блок управления диафрагмой; формирователь импульсов стробирования ЭОП; блок сканирования зоны видимости по дальности; пульт дистанционного или автономного управления режимами работы и регулировки параметров системы; формирователь импульсов излучения; полупроводниковый излучатель; объектив излучателя, формирующий угол подсветки объектов. В состав пульта управления могут входить монитор, отображающий изображение поля зрения системы и необходимые видеоданные, блок управления системой, ноутбук для компьютерной обработки, формирования, хранения, дистанционной передачи и приема видеoinформации или команд управления, источники питания блоков системы.

Селекция отраженных от объектов сигналов выполняется ЭОП или видеокамерой, снабженных затвором, который открывается синхронно и в такт с посылкой импульсов излучения. Затвор открывается на время длительности импульса стробирования, равного по длительности импульсу излучения, и с задержкой, зависящей от дальности до наблюдаемого объекта. Если временная задержка равна времени прохождения излучения до объекта и обратно, то выполняется прием и селекция сигнала только от объекта интереса и окружающей его зоны наблюдения по дальности. Глубина зоны наблюдения зависит от длительности импульсов стробирования, а дальность до объекта определяется величиной временной задержки импульсов стробирования относительно импульсов излучения. Глубина дальности видимости АИТВС ограничена временем селекции сигналов и длительностью импульсов стробирования, открывающих затвор приемника, что является недостатком активно-импульсного режима работы [6]. Для увеличения глубины дальности видимости АИТВС применяется ручное, полуавтоматическое или автоматическое изменение и управление задержки импульса стробирования по дальности и согласованные с ними по времени селекция и прием

сигналов излучения, отраженных от объектов, находящихся в зоне наблюдения.

#### Режимы управления систем

В ручном режиме управления [1] задержка импульсов стробирования, предварительно установленная на выбранной величине, вручную плавно и непрерывно или дискретно и ступенчато увеличивается или уменьшается до величины, соответствующей максимальной или минимальной дальности действия АИТВС. При изменении задержки зона наблюдения непрерывно или дискретно смещается по дальности и совмещается оператором с выбранным объектом интереса. После приема и стробирования отраженного от объекта сигнала излучения производятся прием и обработка видеосигналов и изображения, регистрация и индикация дальности, соответствующая задержке импульсов стробирования, измерение информативных параметров объекта интереса, формирование видеоданных и команд управления.

В полуавтоматическом режиме управления выполняется периодическое изменение задержки импульсов стробирования и сканирование зоны наблюдения от минимальной до максимальной дальности действия и обнаружение объекта по глубине дальности видимости. Изменение задержки и сканирование зоны выбираются с низкой скоростью и частотой, позволяющей оператору вручную выполнять остановку задержки импульсов стробирования и смещения зоны. В момент появления объекта интереса в поле зрения АИТВС и обнаружения его в зоне наблюдения сканирование зоны останавливается, принимаются и обрабатываются сигналы излучения, отраженные от объекта, определяются параметры объекта и формируются необходимые видеоданные.

В автоматическом режиме управления [2] выполняется периодическое программно-управляемое изменение задержки импульсов стробирования, высокочастотное сканирование зоны наблюдения и обзор поля зрения системы по дальности в прямом или обратном направлениях до максимальной или минимальной дальности действия. При появлении объекта в зоне наблюдения в реальном режиме времени производится автоматическое стробирование, селекция, прием, обработка и обнаружение сигналов излучения, отраженных от объекта. После обнаружения объекта производятся автоматическая остановка сканирования зоны, измерение информативных параметров, распознавание объекта интереса, регистрация его дальности по величине задержки импульсов стробирования, формирование видеоданных и команд управления.

Автоматическое изменение задержки импульсов стробирования, высокочастотное сканирование зоны наблюдения по дальности, обработка сигналов и изображений, измерение параметров объектов, формирование видеоданных и команд в реальном режиме времени могут повысить быстродействие АИТВС и увеличить глубину дальности видимости до максимальной дальности действия системы. Для

АИТВС с дальностью действия 200 м, частотой повторения импульсов излучения 50–5000 Гц, длительностью импульсов стробирования 120 нс и размерами зоны видимости 20 м [1] глубина видимости при дальности действия системы 100–200 м может в результате автоматического сканирования зоны наблюдения увеличиться в (5–10) раз.

Время нахождения объекта в зоне наблюдения зависит от скорости движения объекта относительно подвижной системы МОБ-объектов. При взаимной суммарной скорости движения объекта и системы 35–70 км/ч время нахождения объекта наблюдения в зоне видимости, равной 20 м, не превышает 1–2 с, что является недостатком АИТВС с ручным режимом управления. Для увеличения времени обнаружения, распознавания и определения информативных параметров подвижных объектов в автоматическом или автономном непрерывном режиме наблюдения необходимо выбирать частоту импульсов подсветки, стробирования и сканирования, значительно превышающую частоту кадровой развертки видеокамеры, равную 50 Гц. Необходимая частота импульсов подсветки зависит от дальности действия системы, размеров зон наблюдения и их взаимного расположения при сканировании по дальности. При дальности действия системы в сложных условиях видимости 100–200 м, зонах, расположенных вплотную без промежутков и перекрытий, и размерах зон 20 м частота импульсов подсветки и сканирования, необходимая для непрерывного наблюдения объектов до максимальной дальности, должна превышать 250–500 Гц.

В автономном режиме управления в процессе автоматического сканирования зоны наблюдения по дальности в режиме реального времени должны выполняться обзор, обнаружение, распознавание и идентификация объектов интереса, находящегося в поле зрения системы МОБ-объектов. Для повышения достоверности обнаружения и распознавания объектов интереса в режиме обзора может применяться метод дополнительного анализа сигнала от объекта. В режиме обзора сигналы излучения, отраженные от объектов, принимаются, преобразуются в цифровую форму и после цифровой обработки сигналов поступают на решающее устройство обнаружения объектов. Если сигналы превышают уровень порогового устройства обнаружения, выбранный по уровню шумов, допустимой вероятности ложной тревоги и вероятности пропуска сигнала и объекта, то автоматическое сканирование зоны по дальности останавливается. Принятые сигналы суммируются за время анализа и поступают на решающее устройство распознавания объекта. После суммирования сигналов система переходит на этап анализа обнаруженного объекта. Если накопленные за время анализа сигналы превышают пороговый уровень решающего устройства анализа, то производится измерение параметров объекта и принимается решение о достоверном обнаружении, распознавании и идентификации объекта интереса. Выполняется из-

мерение дальности и других информативных параметров объекта, необходимых для формирования видеоданных и команд управления системы. Время анализа выбирается в соответствии с необходимой вероятностью достоверного распознавания и идентификации объектов. При максимальной частоте импульсов излучения, стробирования и сканирования 5 кГц в режиме обнаружения может накапливаться до 10 отраженных от объекта сигналов излучения в кадре. Накопление сигналов в режиме обнаружения увеличивает число сигналов, накопленных в режиме анализа, повышает достоверность обнаружения, распознавания и идентификации объектов интереса, точность измерения информативных параметров, видеоданных и других характеристик систем и комплексов мониторинга и обеспечения безопасности объектов в сложных условиях окружающей среды.

#### Заключение

Применение спектральной и временной селекции сигналов излучений отраженных от объектов, регулировки диафрагм объективов, длительности и скважности импульсов стробирования электронных затворов приемников сигналов может обеспечить необходимый диапазон динамического регулирования и адаптацию систем к изменению освещенности объектов и фона в различных условиях окружающей среды.

Использование предлагаемых методов и средств автоматической задержки импульсов стробирования относительно импульсов подсветки объектов и высокочастотного сканирования зоны наблюдения по дальности увеличит глубину дальности видимости до максимальной дальности действия системы.

Многоэтапный метод обнаружения и анализа сигналов позволит повысить достоверность обнаружения, распознавания и идентификации объектов интереса, точность измерения их информативных параметров и эффективность работы систем мониторинга и обеспечения безопасности объектов в сложных условиях видимости.

Работа выполнена при поддержке РФФИ в рамках гранта по научному проекту №16-47-700939.

#### Литература

1. Кирпиченко Ю.Р. Видеоинформационные системы наблюдения и контроля при сложных условиях видимости / Ю.Р. Кирпиченко, М.И. Курячий, И.Н. Пустынский //

Доклады Том. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники. – 2012. – № 2 (26), – С. 105–110.

2. Мищенко Н.И. Методы и средства повышения технических характеристик активно-импульсных телевизионно-вычислительных систем наблюдения / Н.И. Мищенко, И.Н. Пустынский // Доклады Том. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники. – 2014. – № 3 (35). – С. 47–52.

3. Волков В.Г. Телевизионные системы для спецтехники // Спецтехника и связь. – 2010. – №2. – С. 2–17.

4. Капустин В.В. Коррекция координатных искажений в телевизионно-вычислительных системах // Доклады Том. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники. – 2015. – № 4 (38). – С. 174–178.

5. Лазерная система подводного видения LSV-W [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://turn.ru/rus/products/lynx\\_lsv.htm](http://turn.ru/rus/products/lynx_lsv.htm), свободный (дата обращения: 04.10.16).

6. Волков В.Г. Активно-импульсные приборы ночного видения // Специальная техника. – 2002. – №3. – С. 2–11.

---

#### Мищенко Николай Иванович

Ст. науч. сотрудник каф. телевидения и управления (ТУ) ТУСУРа  
Тел.: 8 (382-2) 41-33-68  
Эл. почта: mish@tu.tusur.ru

#### Пустынский Иван Николаевич

Д-р техн. наук, профессор каф. ТУ  
Тел.: 8 (382-2) 41-34-23  
Эл. почта: in@tu.tusur.ru

#### Капустин Вячеслав Валериевич

Аспирант каф. ТУ  
Тел.: +7-960-969-88-77  
Эл. почта: peregnun@mail.ru

Mishchenko N.I., Pustynsky I.N., Kapustin V.V.

#### Methods and means to increase efficiency of active-pulsed television-computing monitoring systems and security of objects

The analysis of the currently used television systems, video surveillance systems and control facilities is carried out. Methods and means to improve technical characteristics of computer security systems and TV-monitoring facilities in different environments are examined and proposed.

**Keywords:** video system, image, luminance, range, observation, measurement, informative parameters.



УДК 621.3

А.В. Носов, Р.С. Суровцев, А.М. Заболоцкий, Т.Т. Газизов

## Экспериментальное подтверждение возможности защиты радиоэлектронной аппаратуры от сверхкороткого импульса за счет его разложения в С-секции с лицевой связью

Экспериментально доказана возможность разложения сверхкороткого импульса в С-секции с лицевой связью. Для этого изготовлены макеты секции разной длины. Максимальный уровень сигнала на выходе макета составил 24% от уровня сигнала на входе линии.

**Ключевые слова:** С-секция, лицевая связь, защита, четная и нечетная моды, сверхкороткий импульс.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2016-19-3-47-50

В настоящее время основную часть элементов современных цифровых устройств составляют микропроцессоры и системы, построенные на их основе. Их активное развитие в последние несколько десятилетий привело к значительному увеличению быстродействия современных устройств, а также росту их рабочих частот и уменьшению напряжений используемых сигналов. Наряду с увеличивающимися уровнями мощности и расширяющимися диапазонами частот электромагнитных воздействий, а также растущим числом их источников самой разнообразной природы, это ведет к повышению восприимчивости современной радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) к воздействию электромагнитного излучения. Все реальнее становится угрозой преднамеренного электромагнитного воздействия с целью выведения из строя важных объектов инфраструктуры общества в террористических целях, о чем свидетельствует ряд зарегистрированных случаев такого воздействия [1].

Наиболее опасны импульсы наносекундного и субнаносекундного диапазонов, которые могут проникать внутрь РЭА. Традиционно для защиты от таких сверхкоротких импульсов (СКИ) применяются электромагнитные экраны, различные фильтры, устройства развязки, ограничители помех. Однако они имеют ряд недостатков, наиболее существенными из которых являются недостаточное быстродействие, малая мощность, а также наличие паразитных параметров, затрудняющих защиту устройств от мощных СКИ. Кроме того, реализация такой защиты требует обязательного введения в состав устройства дополнительных компонентов, а защита РЭА от воздействий в широком диапазоне требует построения сложных многоступенчатых устройств, что неизбежно ведет к росту массогабаритных показателей конечных устройств. Между тем на практике требуются простые и дешевые устройства защиты от СКИ. Поэтому актуален поиск новых технических решений.

В этой связи примечателен подход к защите РЭА, основанный на использовании искажений в витке меандровой линии задержки [2–4], часто называемом С-секцией [5–7]. Достоинством подхода является то, что его реализация может не требовать устройства защиты как такового. Вместо него могут

быть использованы уже имеющиеся на печатной плате меандровые линии, прямое назначение которых – задержка сигнала на печатной плате для тактирования импульсных сигналов в точках приема.

Защита от СКИ с помощью предложенного подхода достигается за счет его разложения на последовательность импульсов с меньшей (относительно исходной) амплитудой, минимизация которой осуществляется путем выравнивания амплитуд этих импульсов. Для этого необходимо выполнить ряд условий, связывающих параметры меандровой линии и длительность СКИ. Так, для линии с однородным диэлектрическим заполнением необходимо, чтобы импульс основного сигнала пришел к концу линии по окончании импульса перекрестной наводки на ближнем конце линии (в терминологии связанных линий) за счет обеспечения нескольких простых условий [8, 9]. Основным из них является значение задержки в линии большее, чем длительность СКИ. Тогда за счет оптимизации связи между сигнальными проводниками линии могут быть обеспечены минимизация и равенство амплитуд импульсов наводки и основного сигнала на выходе линии [2]. В линии с неоднородным заполнением могут различаться скорости распространения мод, что может быть использовано для разложения основного сигнала на два импульса. Эти импульсы можно назвать импульсами четной и нечетной мод, поскольку форма сигнала в любой точке линии, по существу, является результатом суперпозиции четной и нечетной мод, а увеличение разности задержек мод приводит к разделению сигнала на два импульса. Поэтому для простоты изложения далее эти импульсы будут называться импульсами четной и нечетной мод. Их разделение позволяет дополнительно ослабить амплитуду СКИ в 1,5 раза в линии с боковой связью [3].

Описанные исследования проведены только на основе моделирования, причем идеализированных структур, а не межсоединений реальных печатных плат, где влияние потерь и дисперсии на результаты может быть существенным. Поэтому выполнено исследование С-секции с лицевой связью, при котором учтены потери в проводниках и диэлектрике [4]. Оно показало, что учет потерь приводит к дополнительному уменьшению амплитуды СКИ. В работе

отмечено, что из-за потерь, наряду с уменьшением амплитуды СКИ на выходе линии, также уменьшается оптимальное значение связи между ее проводниками, что упрощает практическую реализацию защитных линий. Затем была экспериментально доказана возможность защиты РЭА от СКИ за счет его разложения в С-секции с боковой связью, где ослабление СКИ составило 6,3 раза [10, 11].

Логичным продолжением исследований защитных устройств было бы экспериментальное подтверждение возможности защиты от СКИ за счет использования С-секции с лицевой связью. Хотя в такой линии и протекают те же волновые процессы, что и в линии с боковой связью, но они имеют существенное различие с точки зрения реализации устройства защиты. Это различие заключается в принципиально разном подходе к выравниванию амплитуд импульсов разложения на выходе линии. В первом случае (линия с боковой связью) при прохождении по витку импульс перекрестной наводки имеет значительно меньшую амплитуду, чем импульсы четной и нечетной мод, поэтому для их выравнивания необходимо усиление связи между сигнальными проводниками (что осуществить на практике может быть довольно сложно). Во втором случае (линия с лицевой связью) – наоборот, импульс перекрестной наводки имеет большую амплитуду, по сравнению с амплитудой импульсов четной и нечетной мод, поэтому для их выравнивания необходимо ослабление связи между сигнальными проводниками.

Целью данной работы является экспериментальное подтверждение возможности защиты РЭА от СКИ за счет его разложения в С-секции с лицевой связью. Для достижения поставленной цели сначала необходимо разработать и изготовить макеты С-секций, для чего нужны предварительная оптимизация и моделирование в соответствии с технологическими возможностями изготовителя печатных плат. После изготовления макетов необходимы проведение натурных экспериментов и обработка результатов.

Моделирование и оптимизация параметров поперечного сечения выполнялись в системе компьютерного моделирования TALGAT [12]. Критерием оптимизации выбрана минимизация амплитуды СКИ на выходе линии. Ее поперечное сечение представлено на рис. 1, а. Его параметры выбраны так, чтобы обеспечить равенство среднего геометрического волновых сопротивлений четной ( $Z_c$ ) и нечетной ( $Z_o$ ) мод линии сопротивлению измерительного тракта 50 Ом, а также выполнение условия для разложения СКИ на последовательность импульсов меньшей амплитуды [3]:

$$2 \cdot l \cdot |\tau_c - \tau_o| > t_r + t_d + t_f. \quad (1)$$

Вводя условие (1), необходимо сделать несколько замечаний о прохождении полезного сигнала по С-секции. Прежде всего, отметим, что невыполнение условия (1) не обеспечивает прохождения полезного сигнала без разложения на последовательность импульсов. В случае если длительность полезного сигнала сопоставима или меньше левой час-

ти неравенства (1), то полезный сигнал также будет подвергаться искажениям, вызванным различием скоростей распространения четной и нечетно мод и приводящим к разложению сигнала, однако увеличение его длительности будет приводить к уменьшению влияния этих искажений на форму сигнала. Таким образом, при длительности полезного сигнала много большей верхней длительности СКИ, для которой выполнено проектирование линии, влияние искажений будет несущественным и не приведет к разложению сигнала на последовательность импульсов с меньшей амплитудой.

В качестве материала основы для изготовления печатной платы выбран материал FR-4. В соответствии с технической документацией на частоте 1 МГц диэлектрическая проницаемость материала может варьироваться в диапазоне от 3,5 до 4,1. Поэтому при моделировании принято среднее значение диэлектрической проницаемости  $\epsilon_r = 3,8$ . При оптимизации значения некоторых параметров поперечного сечения линии выбирались из типовых значений для этого материала [13]. Так, толщина стеклотекстолита  $h = 500, 1000, 1500$  и  $2000$  мкм, а толщина сигнального проводника  $t = 18$  и  $35$  мкм. В результате оптимизации выбраны следующие параметры поперечного сечения:  $h = 1500$  мкм,  $w = 6000$  мкм и  $t = 18$  мкм соответственно, расстояние между активным и опорным проводниками  $s = 200$  мкм.

На рис. 1, б приведена схема соединений линии. Она состоит из двух параллельных проводников длиной  $l$ , соединенных между собой на одном конце. Один из проводников линии соединен с источником импульсных сигналов, представленным на схеме идеальным источником ЭДС  $E$  и внутренним сопротивлением  $R1$ . Другой проводник линии соединен с приёмным устройством, которое представлено на схеме сопротивлением  $R2$ . Значения  $R1$  и  $R2$  при моделировании приняты равными 50 Ом для имитации измерительного тракта.

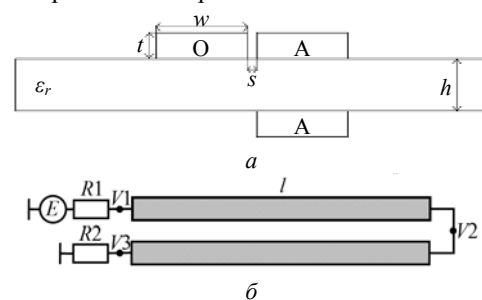


Рис. 1. Поперечное сечение (а) и схема соединений (б) С-секции с лицевой связью

Из вычисленных матриц погонных коэффициентов электромагнитной и электростатической индукции получены погонные задержки четной и нечетной мод:  $\tau_c = 6,007$  нс/м,  $\tau_o = 4,578$  нс/м. Таким образом, для выполнения условия (1) достаточно обеспечить длину линии  $l = 40$  мм. Однако длина линии  $l$  была выбрана с запасом и имела значения 100, 150, 200 мм, чтобы оценить ее влияние на амплитуду и форму сигнала на выходе линии. При

длине линии 100 мм произведение модуля разности погонных задержек четной и нечетной мод линии на ее удвоенную длину составляет 285,8 пс. Сумма длительностей фронта, плоской вершины и спада импульсного сигнала составляет 108 пс. Таким образом, условие (1) выполняется с запасом. Соответственно для большей длины линии условие (1) также будет выполняться.

По результатам моделирования и оптимизации из двухстороннего стеклотекстолита марки FR-4 изготовлена печатная плата с набором макетов С-секций с лицевой связью длиной  $l = 200, 150$  и  $100$  мм. Затем макеты были разделены (рис. 2).

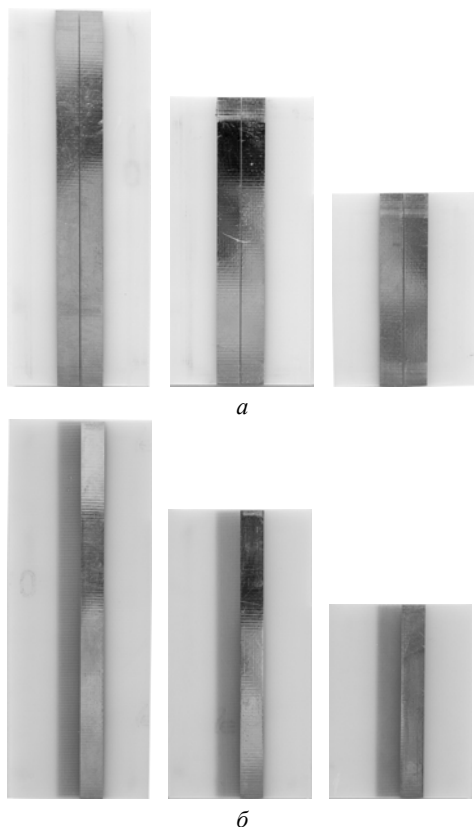


Рис. 2. Изготовленные макеты С-секций с лицевой связью: виды сверху (а) и снизу (б)

С выхода генератора на вход комбинированного осциллографа С9-11 подавался сигнал с параметрами: амплитуда 0,648 В, длительность по половине от максимального уровня  $t_{0,5}=40$  пс, длительность по уровню 0,1  $t_{0,1}=72$  пс, при аппроксимации трапецидальным импульсом длительность фронта и спада импульса составили  $t_{\phi}=60$  пс,  $t_c=48$  пс соответственно (рис. 3).

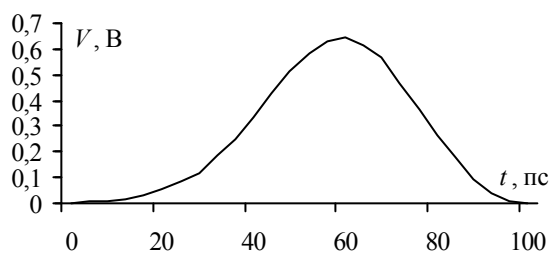


Рис. 3. Форма воздействующего импульса

Для снятия осциллограмм между выходом генератора и входом осциллографа С9-11 последовательно включались макеты С-секций с помощью соединителей типа SMA. Полученные осциллограммы сигналов на выходе каждого макета представлены на рис. 4.

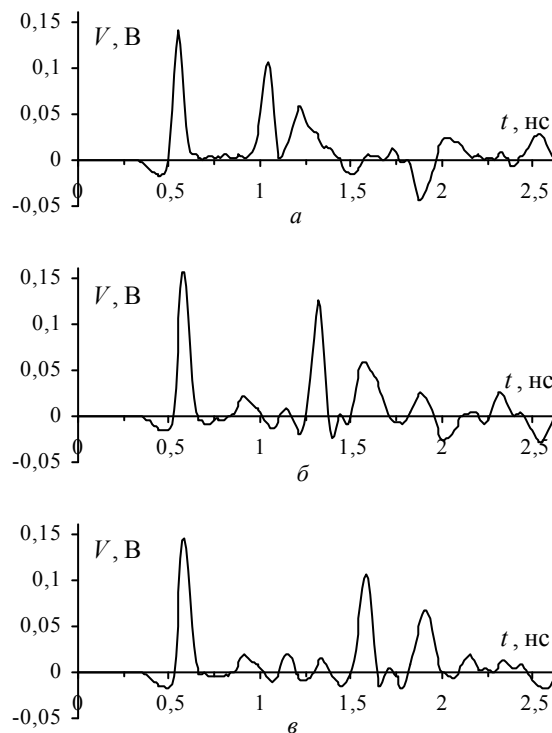


Рис. 4. Осциллограммы сигналов на выходе макетов С-секций длиной 100 (а), 150 (б) и 200 (в) мм

Из осциллограмм рис. 4 видно, что сигнал приходит к выходу с задержкой 340 пс, которая обусловлена наличием в измерительном тракте дополнительных переходных устройств и соединителей SMA, которые необходимы для ее включения в измерительный тракт. Видно, что на осциллограммах присутствуют импульсы небольшой амплитуды, вызванные отражениями от неоднородностей тракта и при переходе от соединителей в линию. Отражения также могут быть вызваны неоднородностью, возникшей при пайке соединителей SMA и переключки для соединения полувитков.

Выходной сигнал, как и в любой связанной линии передачи, определяется суперпозицией четной и нечетной мод, возбуждаемых в линии. В данной С-секции выходной сигнал представлен последовательностью из трех основных импульсов. В упрощенном представлении первый импульс можно считать перекрестной наводкой на ближнем конце, а второй и третий импульсы – импульсами нечетной и четной мод воздействующего импульса. Видно, что при увеличении длины линии увеличивается время прихода второго и третьего импульсов. Максимальный уровень сигнала на выходе макета меандровой линии с лицевой связью составляет 24% от уровня сигнала на входе линии. Однако видно, что он определяется амплитудой первого импульса, т.е. остался

небольшой резерв ее уменьшения за счет уменьшения связи между проводниками С-секции.

Таким образом, в работе экспериментально доказана возможность разложения СКИ на последовательность импульсов в С-секции с лицевой связью.

Разработка макетов выполнена за счет средств гранта Российского научного фонда (проект №14-19-01232) в ТУСУРе, алгоритмы и программное обеспечение разработаны в рамках выполнения проектной части государственного задания Минобрнауки РФ № 8.1802.2014/К, оптимизация выполнена при поддержке гранта РФФИ 14-29-09254.

#### Литература

1. Защита объектов топливно-энергетического комплекса от угроз электромагнитного воздействия / О. Петкау, А. Тарабцев, А. Дерябин, С. Ларионов, В. Чванов // Безопасность объектов топливно-энергетического комплекса. – 2014. – № 2 (6). – С. 74–76.

2. Surovtsev R.S. Pulse Decomposition in a Turn of Meander Line as a New Concept of Protection against UWB Pulses / R.S. Surovtsev, T.R. Gazizov, A.M. Zabolotsky // Proc. of Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), Omsk, Russian Federation, May 2015. – 7 p.

3. Surovtsev R.S. Simple Method of Protection against UWB Pulses Based on a Turn of Meander Microstrip Line / R.S. Surovtsev, A.V. Nosov, A.M. Zabolotsky // 16<sup>th</sup> International Conference of Young Specialists on Micro / Nanotechnologies and Electron Devices. 29 June – 3 July 2015. – 3 p.

4. Gazizov A.T. Simple printed structures for low-cost and effective protection against UWB pulses // Asia Electromagnetics Symposium (ASIAEM 2015), Jeju-si, Jeju Province, South Korea, 3–8 August 2015. – P. 1–4.

5. Shiffman B.M. A new class of broad-band microwave 90-degree phase shifters // IRE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 1956. – Vol. 4, № 2. – P. 75–81.

6. Семенов Э.В. Особенности импульсных последовательностей, формируемых фазовыми фильтрами на основе С-секций с периодической характеристикой группового времени запаздывания / Э.В. Семенов, А.Н. Маничкин, Н.Д. Малютин // Радиотехника. – 2006. – № 6. – С. 27–30.

7. Семенов Э.В. Фазовая обработка в задачах формирования, передачи и исследования искажений сверхширокополосных сигналов. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2007. – 122 с.

8. Распространение импульса в меандровой линии с неоднородным диэлектрическим заполнением без искажений его формы перекрестными наводками / Р.С. Суровцев, А.М. Заболоцкий, Т.Р. Газизов, П.Е. Орлов // Доклады Том. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники. – 2014. – № 4(34). – С. 36–40.

9. Пат. №2556438 РФ, МПК Н 03 Н 7/30. Линия задержки, неискажающая импульс / Р.С. Суровцев, А.М. Заболоцкий, Т.Р. Газизов. – №2013159347/08(092269); заявл. 30.12.2013; опубл. 16.06.2015. Бюл. №19.

10. Суровцев Р.С. Вычислительные алгоритмы, методики и рекомендации для проектирования бортовой радиоэлектронной аппаратуры космического аппарата с учетом электромагнитной совместимости: дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 2016. – 247 с.

11. Protection against Ultrashort Pulses Based on a Turn of Meander Microstrip Line / R.S. Surovtsev, A.V. Nosov, A.M. Zabolotsky, T.R. Gazizov // X International IEEE Scientific and Technical Conference «Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines». Omsk, Russian Federation, November 15–17, 2016. – Принята к публикации.

12. Новые возможности системы моделирования электромагнитной совместимости TALGAT / С.П. Куксенко, А.М. Заболоцкий, А.О. Мелкозеров, Т.Р. Газизов // Докл. Том. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники. – 2015. – № 2 (36). – С. 45–50.

13. Производство печатных плат. ООО «МАЗТранс» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.mazhtrans.tomsk.ru>, свободный (дата обращения: 23.09.2016).

---

#### Носов Александр Вячеславович

Магистрант каф. телевидения и управления,  
инж. НИЛ «БЭМС РЭС» ТУСУРА  
Тел.: +7 (382-2) 41-34-39  
Эл. почта: alexns2094@gmail.com

#### Суровцев Роман Сергеевич

Канд. техн. наук, мл. науч. сотрудник НИЛ «БЭМС РЭС»  
Тел.: +7 (382-2) 41-34-39  
Эл. почта: surovtsvrs@gmail.com

#### Заболоцкий Александр Михайлович

Канд. техн. наук, зав. НИЛ «БЭМС РЭС»  
Тел.: +7 (382-2) 41-34-39  
Эл. почта: zabolotsky\_am@mail.ru

#### Газизов Тимур Тальгатович

Канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник НИЛ «БЭМС РЭС»  
Тел.: +7 (382-2) 41-34-39  
Эл. почта: timurtsk@gmail.com

Nosov A.V., Surovtsev R.S., Zabolotsky A.M., Gazizov T.T.  
**Experimental confirmation of possibility of the electronic equipment protection against an ultrashort pulse by means of its decomposition in the C-section with broad-side coupling**

The possibility of ultrashort pulse decomposition in C-section with broad-side coupling is experimentally proved. For this purpose the section prototypes of different length are designed. Peak signal level at output of prototypes is 24% from signal level at the input.

**Keywords:** C-section, broad-side coupling, protection, even and odd modes, ultrashort pulse.

УДК 621.391.825

А.О. Белоусов, А.М. Заблоцкий, Т.Р. Газизов

## Экспериментальное подтверждение модальной фильтрации в многопроводной микрополосковой линии

Выполнено экспериментальное подтверждение возможности реализации модальной фильтрации на основе многопроводной микрополосковой линии. Разработаны двух- и трехпроводные макеты модальных фильтров, в которых максимальные амплитуды импульсов разложения меньше в 11,5 и 13,7 раза по сравнению с исходным сигналом.

**Ключевые слова:** многопроводная микрополосковая линия, устройство защиты, модальная фильтрация, натурный эксперимент.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2016-19-3-51-54

Связанные линии передачи исследуются давно и интенсивно продолжают исследоваться. Между тем искажения сигнала в активной линии уделяется мало внимания: они показаны в реальном примере трёх связанных микрополосковых линий [1]; незначительные искажения видны из примера двух связанных линий при наличии существенных отражений сигналов [2]; в работах [3, 4] показано, что искажения могут происходить вследствие влияния потерь в земле. Однако эти искажения можно использовать, в частности, для защиты.

Известен импульсный расщепитель на связанных линиях, содержащий отрезок связанных линий передачи с диэлектрическим заполнением [5]. Для защиты радиолэктронной аппаратуры от сверхкоротких импульсов (СКИ) [6] предложена технология модальной фильтрации, основанная на использовании модального разложения импульсного сигнала в многопроводных линиях передачи из-за различия задержек мод [7]. Представлены результаты моделирования микрополосковой линии (МПЛ) из двух, трех, четырех и пяти проводников, демонстрирующие разложение исходного импульса в конце активного проводника на 2–5 импульсов, максимальные амплитуды разложения которых в 3, 3,6 и 4,5 раза меньше уровня сигнала в начале линии [8]. Путём оптимизации показано, что выравнивание разностей задержек между импульсами разложения позволяет увеличить длительность импульса, который будет разлагаться в этих структурах полностью [9]. Кроме того, выполнена оптимизация многопроводного модального фильтра (МФ) по критериям минимизации максимальной амплитуды выходного сигнала и максимизации разности задержек между первым и последним импульсами разложения [10]. Между тем экспериментальное подтверждение модальной фильтрации в многопроводных микрополосковых линиях ранее не выполнялось.

Цель данной работы – восполнить этот пробел, изготовив макеты многопроводного МФ и выполнив эксперимент.

### Макеты многопроводных МФ

Изготовление макетов многопроводных МФ основано на структурах и результатах, приведенных в работах [8–10]. Однако для изготовления печатной

платы необходимо выполнить моделирование и оптимизацию с учетом технологических параметров: минимальные значения ширины проводника и расстояния между проводниками ( $w$ ,  $s$ ), равные 0,2 мм, при толщине фольги ( $t$ ), равной 18 мкм и 0,25 мм при  $t = 35$  мкм; толщина диэлектрика  $h = 0,5$ ; 1; 1,5 мм.

Моделирование и оптимизация выполнялись в программном продукте TALGAT [11]. При этом допускалось, что в рассматриваемых линиях распространяются только квази-Т-волны. Учитывались потери в проводниках и диэлектриках. В качестве исходного импульса использовался оцифрованный сигнал осциллографа вычислительного комбинированного С9-11, измеренный на нагрузке 50 Ом, с амплитудой 0,657 В. Длительность фронта – 27 пс, спада – 29 пс и плоской вершины – 9 пс, так что общая длительность – 65 пс. (Длительности измерены по уровням 0,1–0,9).

В результате получены следующие параметры печатной платы для изготовления макета многопроводных МФ:  $w = 1000$  мкм,  $t = 18$  мкм и  $h = 500$  мкм, относительная диэлектрическая проницаемость равна  $\epsilon_r = 4,5$  и тангенс угла диэлектрических потерь  $\text{tg}\delta = 0,017$ , измеренные на частоте  $f = 1$  МГц. Значение  $w$  оптимизировалось для обеспечения волнового сопротивления одиночной линии 50 Ом и не менялось для остальных структур, как и значения  $t$ ,  $h$  и  $\epsilon_r$ . Значения  $s_i$  для линий различны, поскольку они оптимизировались по критерию минимизации максимальной амплитуды импульсов на выходе активного проводника МФ [8]. Для двухпроводной МПЛ  $s = 320$  мкм, а для трехпроводной – 200 и 685 мкм соответственно.

Макеты МПЛ представлены на рис. 1 (для сравнения изготовлен макет и одиночной МПЛ). Длины каждой из представленных МПЛ равны  $l = 60$  см. На концах пассивных проводников для  $N = 2$  и 3 установлены резисторы с сопротивлением 50 Ом. Для соединения макетов с измерительным трактом установлены SMA соединители.

### Описание эксперимента и его результатов

Для проведения эксперимента использовалась схема, представленная на рис. 2. Перед проведением эксперимента была выполнена программная калибровка канала. Поэтому погрешности измерения вре-

мени составляют не более  $\pm 1\%$ , а напряжений –  $\pm 7\%$ . Для соединения макетов с генератором и стробоскопическим преобразователем прибора С9-11 использовались дополнительно два коаксиальных

переходника ПК2-20-03Р-13 и один коаксиальный переходник 2.236.482, которые дают дополнительные задержки около 116 и 104 пс соответственно, так что суммарная задержка равна 336 пс.

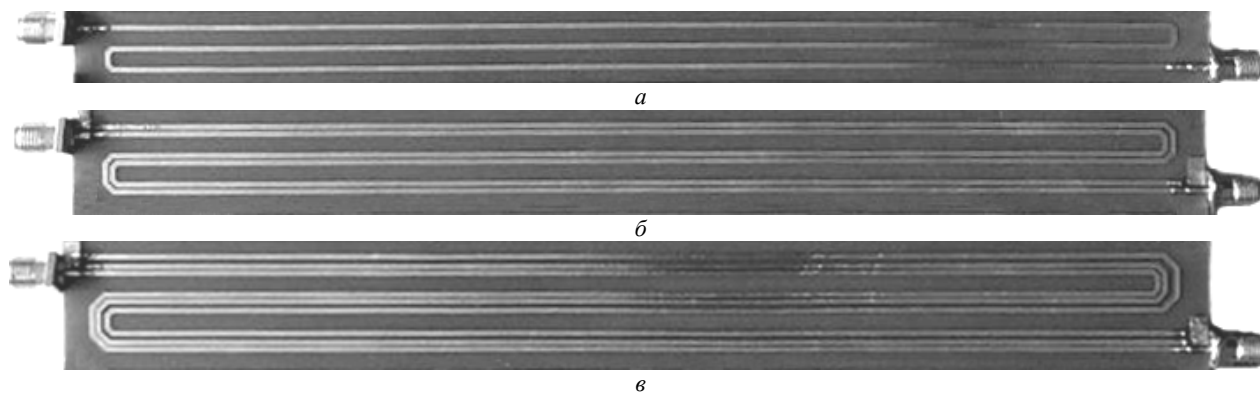


Рис. 1. Макеты с одно- (а), двух- (б) и трехпроводной (в) МПЛ



Рис. 2. Схема экспериментальной установки

**Максимальные значения амплитуд импульсов**

N	U, В		
	Без учета потерь	С учетом потерь	Результаты эксперимента
1	0,33	0,103	0,099
2	0,164	0,053	0,057
3	0,125	0,04	0,048

Измеренные формы сигнала на входе и выходе одно-, двух- и трехпроводной МПЛ представлены на рис. 3, а–в. Значения максимальных амплитуд импульсов в 6,6; 11,5; 13,7 раза меньше амплитуды исходного сигнала (таблица). При моделировании (см. рис. 3, а–в) получено, что с учетом потерь значения максимальных амплитуд в 6,4; 12,4; 16,4 раза меньше амплитуды исходного сигнала (см. таблицу). Расхождение результатов моделирования может быть связано с неточным вычислением матриц потерь для проводников и диэлектриков, а также с неучетом влияния частотной зависимости относительной диэлектрической проницаемости материала печатной платы. Таким образом, результаты эксперимента подтверждают возможность разложения исходного импульса в конце активного проводника МПЛ, что раньше было показано только при моделировании (см. рис. 3, а–в).

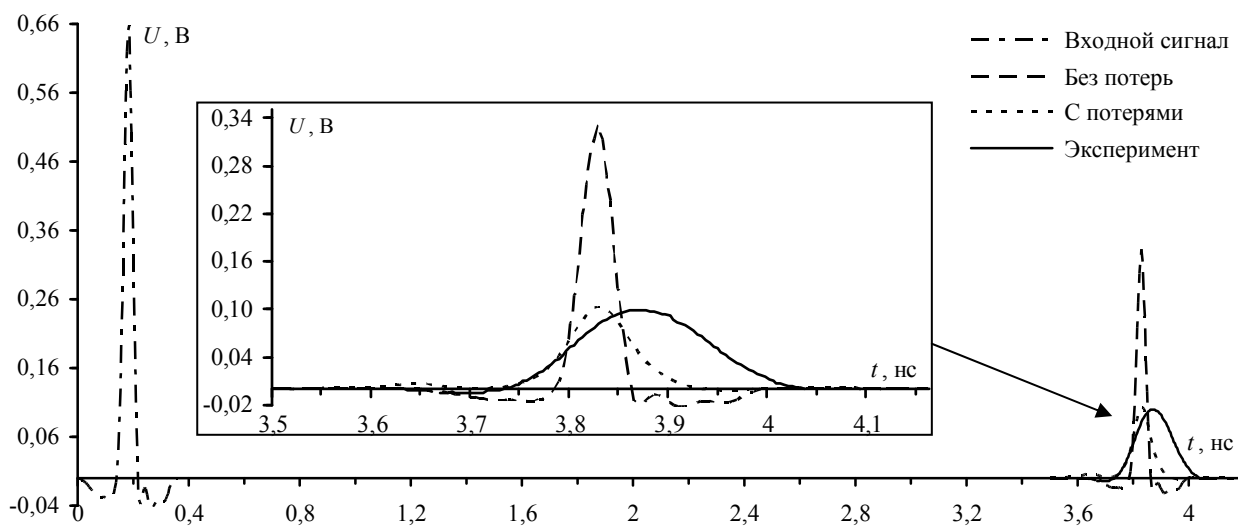


Рис. 3 (начало)

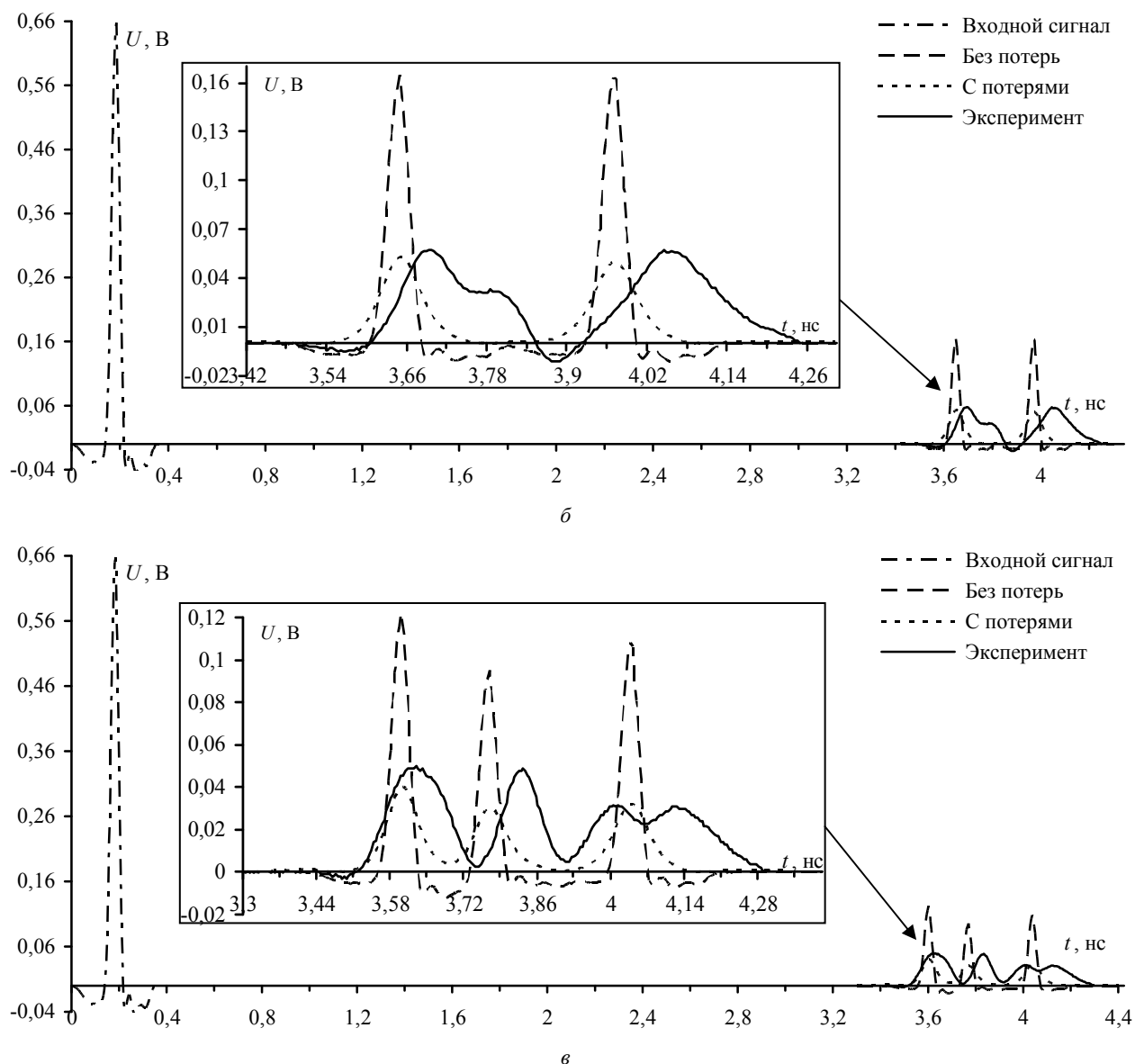


Рис. 3 (окончание). Формы сигналов на входе (---) и выходе (с их увеличенными фрагментами) одно- (а), двух- (б) и трехпроводной (в) МПЛ, полученные при моделировании без учета (---) и с учетом (····) потерь и экспериментально (—)

### Заключение

Разработаны три макета на основе МПЛ. Получено, что в двух- и трехпроводных структурах МФ исходный сигнал раскладывается на два и на три импульса. При этом максимальные значения амплитуд, в 11,5 и 13,7 раза меньше амплитуды исходного сигнала. В результате полученные экспериментальные данные подтверждают результаты моделирования и идею совершенствования защиты от СКИ за счет добавления к существующей структуре дополнительных проводников. (Полагается, что спектр полезного сигнала не ослабляется МФ.)

Таким образом, результаты показали перспективы исследования многопроводных МФ, поскольку при добавлении к исходной структуре дополнительных проводников уменьшается амплитуда исходного сигнала в конце активного проводника.

Моделирование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-19-01232) в ТУСУРе, алгоритмы и программное обеспечение разработаны в рамках выполнения проектной части государственного задания Минобрнауки РФ, оптимизация выполнена при поддержке гранта РФФИ 14-29-09254.

### Литература

1. Chang F.Y. Transient analysis of lossless coupled transmission lines in a nonhomogeneous dielectric medium // IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques. – Sept. 1980. – Vol. 18. – P. 616–626.
2. Красноперкин В.М. Импульсные сигналы в связанных линиях передачи / В.М. Красноперкин, Г.С. Самохин, Р.А. Силин // Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ. – 1983. – Вып. 7 (355). – С. 3–8.

3. Костенко М.В. Волновые процессы и электрические помехи в многопроводных линиях высокого напряжения / М.В. Костенко, Л.С. Перельман, Ю.П. Шкарин. – М.: Энергия, 1973. – 272 с.

4. Перенапряжения и защита от них в воздушных и кабельных электропередачах высокого напряжения / М.В. Костенко, К.П. Кадомская, М.Л. Левинштейн, И.А. Ефремов. – Л.: Наука, 1988. – 302 с.

5. Пат. 2 501 159 РФ, МПК Н 03 К 5/156. Импульсный расщепитель на связанных линиях / А.Н. Сычев (РФ), В.А. Шестаков (РФ), С.М. Стручков (РФ), В.Н. Путилов (РФ), М.А. Чекалин (РФ). – № 2 012 111 828 / 07; заявл. 27.03.12; опубл. 10.12.13. Бюл. № 34. – 7 с.

6. Study and classification of potential IEMI sources / N. Mora, F. Vega, G. Lugrin, F. Rachidi, M. Rubinstein // System and assessment notes. – Note 41. – 8 July, 2014 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://eceresearch.unm.edu/summa/notes/SDAN/0041.pdf>, свободный (дата обращения: 16.09.2016).

7. Заболоцкий А.М. Модальные фильтры для защиты бортовой радиоэлектронной аппаратуры космического аппарата / А.М. Заболоцкий, Т.Р. Газизов – Томск: Изд-во Том. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники, 2013. – 151 с.

8. Белоусов А.О. Многопроводная микрополосковая линия как модальный фильтр для защиты от сверхкоротких импульсов / А.О. Белоусов, Т.Р. Газизов, А.М. Заболоцкий // Докл. Том. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники. – 2015. – № 3 (37). – С. 124–138.

9. Belousov A.O. Maximization of duration of ultrashort pulse that is completely decomposed in multiconductor modal filters / A.O. Belousov, T.R. Gazizov, A.M. Zabolotsky // Proceedings of International Siberian conference on control and communications (SIBCON–2016). – Russia, Moscow. – May 12–14, 2016. – P. 1–4.

10. Belousov A.O. Optimization of parameters of multiconductor modal filters for protection against ultrashort pulses / A.O. Belousov, A.M. Zabolotsky, T.T. Gazizov // 17th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM. – Altai, Russia, June 30 – July 4, 2016. – P. 67–70.

11. New developments for improved simulation of interconnects based on method of moments / S.P. Kuksenko, T.R. Gazizov, A.M. Zabolotsky, R.R. Ahunov, R.S. Surovtsev, V.K. Salov, Eg.V. Lezhnin // Advances in Intelligent Systems Research (ISSN 1951-6851). Proc. of the 2015 Int. Conf. on Modeling, Simulation and Applied Mathematics (MSAM2015). – Phuket, Thailand, August 23–24, 2015. – P. 293–301.

#### **Белоусов Антон Олегович**

Магистрант, каф. телевидения и управления (ТУ) ТУСУРа

Тел.: 8-923-440-86-02

Эл. почта: ant1lafleur@gmail.com

#### **Заболоцкий Александр Михайлович**

Канд. техн. наук., доцент каф. ТУ

Тел.: 8 (382-2) 41-34-39

Эл. почта: zabolotsky\_am@mail.ru

#### **Газизов Тальгат Рашитович**

Д-р техн. наук, ст. науч. сотрудник, зав. каф. ТУ

Тел.: 8 (382-2) 41-34-39

Эл. почта: talgat@tu.tusur.ru

Belousov A.O., Zabolotsky A.M., Gazizov T.R.

#### **Experimental confirmation of modal filtering in multiconductor microstrip line**

Feasibility of modal filtering based on a multiconductor microstrip line is experimentally confirmed. Prototypes of modal filters with two and three conductors have been developed. The maximal amplitude of decomposed pulses of these prototypes is 11,5 and 13,7 times less than amplitude of the original signal.

**Keywords:** multiconductor microstrip line, protection devices, modal filtering, natural experiment.



УДК 621.317.08

В.В. Близнюк, Н.В. Березовская, В.А. Паршин, А.Е. Тарасов

## Определение режима генерации лазерного диода на фундаментальной моде

Рассмотрена методика экспресс-анализа диаграммы направленности излучения лазерных диодов, позволяющая быстро определить режим генерации лазерного диода на фундаментальной моде. Установлено, что для определения такого режима генерации достаточно связать координаты точек перегиба гауссовой кривой, найденные путем натуральных измерений угла расходимости излучения, с ходом касательных к кривой в этих точках.

**Ключевые слова:** лазерный диод, фундаментальная мода, диаграмма направленности излучения, ближняя зона поля, дальняя зона поля.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2016-19-3-55-58

Благодаря компактности, простоте способа накачки и высокому коэффициенту полезного действия лазерные диоды (далее – ЛД) нашли широкое применение в различных оптико-электронных комплексах и системах. Актуальным является использование ЛД в качестве базового элемента передающего оптоэлектронного модуля в волоконно-оптических линиях связи (далее – ВОЛС).

При выборе ЛД прежде всего учитывают следующие требования: длина волны излучения должна попадать в одно из окон прозрачности волокна – 1300 или 1550 нм; быстродействие источника излучения должно обеспечивать частоту модуляции, необходимую для передачи информации на требуемой скорости; большая часть излучения должна попадать в волокно с минимальными потерями. При проектировании сверхпротяженных безретрансляционных участков ВОЛС с одномодовым волокном со смещенной дисперсией предпочтение отдается ЛД, генерирующим излучение на длине волны 1,55 мкм, поскольку наименьшее затухание в таком волокне обеспечивается именно на этой длине волны. Однако в последние годы в магистральных ВОЛС, работающих на длине волны 1,55 мкм, все чаще используются ступенчатые одномодовые волокна, удельная хроматическая дисперсия которых на этой длине волны возрастает до 17 (пс/нм)/км. Единственной возможностью увеличения полосы пропускания волокна с такой дисперсией является уменьшение ширины спектра излучения передающего оптоэлектронного модуля. Поэтому к перечисленным выше требованиям, предъявляемым к источнику излучения, добавляется еще одно, крайне важное: ширина его спектра излучения должна быть как можно меньше.

Минимальная ширина спектра излучения обеспечивается в случае одночастотной генерации. Такой режим генерации идеально реализуется в инжекционном полупроводниковом лазере с вертикальным резонатором VCSEL. Однако типичные значения мощности генерации таких источников излучения находятся в диапазоне десятых долей милливатта, чего явно недостаточно для функционирования магистральных ВОЛС. Одночастотный режим генерации с шириной спектральной линии в

несколько мегагерц характерен и для лазеров с распределенной обратной связью (РОС-лазеров). При этом мощность генерации РОС-лазеров на два-три порядка больше, чем у лазеров с вертикальным резонатором, а длина волны излучения слабо зависит от температуры. Именно поэтому чаще всего в ВОЛС используются РОС-лазеры.

Одночастотный режим генерации является частным случаем генерации на фундаментальной моде, когда спектр излучения состоит из одной продольной моды. Поэтому нарушение режима генерации РОС-лазера на фундаментальной моде сигнализирует о нарушении одночастотной генерации, а значит, и об уширении спектра излучения передающего оптоэлектронного модуля в ВОЛС, что приводит к существенному ухудшению параметров линии передачи.

Именно по этой причине при проведении как пусконаладочных работ, так и регламентных работ по проверке режима функционирования ВОЛС особое внимание уделяется анализу модовой структуры излучения РОС-лазеров. При этом особую роль играет фактор времени.

В практической метрологии лазерного излучения задача определения генерации на фундаментальной моде занимает доминирующее положение. Методы решения этой задачи для остроуправленного излучения подробно рассмотрены в ряде стандартов [1–3], а средства измерений коэффициентов распространения лазерных пучков  $M^2$ , в которых реализуются эти методы, уже более десяти лет выпускаются мелкими партиями фирмами Ophir и Coherent.

Значительно хуже выглядит ситуация с решением задачи определения генерации на фундаментальной моде в случае диагностики сильно расходящегося излучения ЛД. В настоящее время нет стандартизованных методов определения параметра  $M^2$ , характеризующего распространение излучения с большими углами расходимости, и, как следствие, стандартизованных средств измерений параметров такого излучения.

Использование нестандартизованных методик диагностики излучения ЛД базируется на измерениях распределения его интенсивности в ближней и

дальней зоне в плоскости, перпендикулярной  $p$ - $n$ -переходу (далее – вертикальной плоскости), и в плоскости  $p$ - $n$ -перехода (далее – горизонтальной плоскости). Измерения распределения интенсивности излучения в ближней зоне являются наиболее сложным и в то же время необходимым этапом реализации таких методик при нахождении параметра  $M^2$ . Однако при определении режима генерации излучения ЛД на фундаментальной моде измерения параметра  $M^2$  можно исключить и ограничиться анализом распределения интенсивности излучения  $f(\theta)$  в дальней зоне.

Целью данной работы является разработка методики экспресс-анализа диаграмм направленности излучения ЛД, описываемых функцией  $f(\theta)$ . Остановимся на анализе распределения интенсивности излучения  $f^\perp(\theta)$  в дальней зоне в вертикальной плоскости.

#### Методика исследования

При разработке методики воспользуемся тем, что при генерации излучения на фундаментальной моде нормированное распределение интенсивности излучения ЛД в вертикальной плоскости в дальней зоне имеет вид [4]

$$f^\perp(\theta) = G^2(\theta^\perp) \exp(-A^2 z^2), \quad (1)$$

где  $G^2(\theta^\perp)$  – квадрат углового фактора Гюйгенса [5]:

$$G^2(\theta^\perp) = \left[ \frac{m^2 + \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta^\perp}}{m^2 \cos \theta^\perp + \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta^\perp}} \right]^2 \cos^2 \theta^\perp, \quad (2)$$

где  $m = 1$  для ТЕ-мод или  $m = n$  для ТМ-мод, а  $n$  – показатель преломления волновода;

$$A^2 = \frac{\ln \left[ 2G^2(\theta_{1/2}^\perp) \right]}{\sin^2 \theta_{1/2}^\perp}; \quad (3)$$

$$z^2 = \sin^2 \theta^\perp; \quad (4)$$

$G^2(\theta_{1/2}^\perp)$  – квадрат углового фактора при  $\theta = \theta_{1/2}^\perp$ , рассчитываемый по формуле (2);  $\theta_{1/2}^\perp$  – половинный угол расходимости излучения в вертикальной плоскости;  $z$  – абсцисса точки гауссовой кривой  $\varphi_g(z) = \exp(-A^2 z^2)$  в декартовой системе координат.

Из (1)–(4) следует, что функция  $f^\perp(\theta)$ , описывающая диаграмму направленности излучения ЛД на фундаментальной моде, является четной, сама диаграмма симметрична относительно оси лазерного пучка, а для определения ее вида в каждом конкретном случае необходимо измерить угол расходимости излучения диагностируемого лазера.

При разработке методики экспресс-анализа диаграммы направленности излучения ЛД в первую очередь измеряется распределение плотности мощности его излучения. Измерение проводится на ус-

тановке, аналогичной описанной в [6], согласно методике измерений распределения плотности мощности, включающей сканирование сечения пучка одноканальным приемником с пинхолом [7]. Особое внимание уделяется обеспечению пространственной и временной стабильности пучка излучения.

Затем находится вид функции  $f^\perp(\theta)$  для каждого диагностируемого ЛД. Для этого, согласно методу, изложенному в [8], по экспериментально найденной диаграмме направленности излучения на уровне 1/2 от максимальной интенсивности излучения определяется полный угол расходимости излучения диагностируемого ЛД  $\theta_{1/2}^\perp \text{trad}$ . При этом с целью уменьшения погрешности измерений обеспечивается выполнение требований, предъявляемых к приемно-усилительным устройствам согласно [7].

В случае симметричных диаграмм направленности излучения ЛД функция  $f^\perp(\theta)$  принимает некоторое значение  $i$  при двух аргументах  $\theta_i^\perp$ , равных по модулю, но противоположных по знаку. Именно поэтому для удобства проведения количественного анализа таких диаграмм в настоящей работе используется половинный угол расходимости  $\theta_{1/2}^\perp$ , определяемый по формуле

$$\theta_{1/2}^\perp = 0,5 \theta_{1/2}^\perp \text{trad}, \quad (5)$$

где  $\theta_{1/2}^\perp \text{trad}$  – полный угол расходимости излучения.

Точки перегиба гауссовой кривой имеют координаты  $\pm 1/(A\sqrt{2})$ ,  $1/\sqrt{e}$  [9], а касательные к кривой в этих точках описываются функцией

$$\Theta(z) = \exp(-1/2)(2 - |z|/z_p), \quad (6)$$

где  $\pm z_p$  – абсциссы точек перегиба.

Так как  $z_p = \pm 1/(A\sqrt{2})$ , то  $|z_p| = 1/(A\sqrt{2})$ . Тогда (6) принимает вид

$$\Theta(z) = \exp(-1/2)(2 - A\sqrt{2}|z|), \quad (7)$$

где, с учетом (4),  $-1 \leq z \leq 1$ .

Далее, с учетом (7), проводится операция по определению вида функции  $\Theta(z)$ , используемой при анализе диаграммы направленности излучения диагностируемого ЛД. Для этого в (3) подставляется экспериментально определенное значение угла  $\theta_{1/2}^\perp$ , а затем рассчитывается значение параметра  $A$ .

Для проведения экспресс-анализа функции  $f^\perp(\theta)$  с использованием функции  $\Theta(z)$  определяем из (7) связь этой функции и  $z$ :

$$|z| = \left[ 2 - \sqrt{e}\Theta(z) \right] / (A\sqrt{2}). \quad (8)$$

После ряда простых преобразований, находим, что

$$A^2 z^2 = 2 - 2\sqrt{e}\Theta(z) + \frac{e\Theta^2(z)}{2}. \quad (9)$$

Тогда (1) принимает следующий вид:

$$f^\perp(\theta) = G^2(\theta^\perp) \exp\left[-\frac{e\Theta^2(z)}{2} + 2\sqrt{e}\Theta(z) - 2\right]. \quad (10)$$

Задавая некоторое значение  $\Theta(z_i)$ , из (10) находим, что

$$f^\perp(\theta_i) = G^2(\theta_i^\perp) \exp\left[-\frac{e\Theta^2(z_i)}{2} + 2\sqrt{e}\Theta(z_i) - 2\right], \quad (11)$$

где, согласно (4),  $z_i = |\sin\theta_i^\perp|$ .

Далее, пользуясь (4) и тем, что функция  $\Theta(z)$  линейна, определяем аргумент  $z_i$ , а значит, и угол  $\theta_i^\perp$ , при котором эта функция принимает значение  $\Theta(z_i)$ :

$$\sin^2 \theta_i^\perp = \sin^2 \theta_{1/2}^\perp \frac{2 - 2\sqrt{e}\Theta(z_i) + \frac{e\Theta^2(z_i)}{2}}{\ln\left[2G^2(\theta_{1/2}^\perp)\right]}. \quad (12)$$

Как уже отмечалось выше, расчетный параметр  $\theta_i^\perp$  имеет два значения. Модули этих значений равны, а знаки противоположны. Используя найденные из (12) значения  $\theta_i^\perp$ , по массиву экспериментально определенных значений нормированной функции углового распределения интенсивности излучения ЛД в свободное пространство определяем соответствующие им значения  $f^\perp(\theta_i^\perp)$ . В случае симметричной диаграммы направленности эти значения должны быть равными с точностью, определяемой погрешностью измерений.

Зная  $\theta_i^\perp$  и используя (2), находим квадрат углового фактора  $G^2(\theta_i^\perp)$  и численное значение функции  $f^\perp(\theta_i^\perp)$ :

$$f_{\text{расч}}^\perp(\theta_i^\perp) = G^2(\theta_i^\perp) \exp\left[-\frac{e\Theta^2(z_i)}{2} + 2\sqrt{e}\Theta(z_i) - 2\right]. \quad (13)$$

Если значение  $f^\perp(\theta_i^\perp)$ , найденное из массива чисел, полученного при измерениях нормированной функции углового распределения интенсивности излучения ЛД, равно правой части (13) при любых значениях параметра  $\theta_i^\perp$  (а значит, и соответствующих им значениях параметра  $z_i$ ), при которых возможно измерение диаграммы направленности излучения с погрешностью, не превышающей 5%, имеет место генерация ЛД на фундаментальной моде. В ходе выполнения настоящей работы установлено, что при углах расходимости излучения ЛД, равных 12–15°, верхняя граница диапазона значений параметра  $\theta_i^\perp$ , определяемая с использованием такого условия, равна 40–42°.

Методика экспресс-анализа диаграммы направленности излучения ЛД в свободное пространство использована нами для определения режима генера-

ции пяти экземпляров ЛД типа KLM-D650-5-5 с длиной волны 650 нм и мощностью излучения 5 мВт и шести ЛД типа KLM-H980-200-5 с длиной волны 980 нм и мощностью излучения 200 мВт. Все ЛД изготовлены фирмой «ФТИ-ОПТРОНИК» (г. Санкт-Петербург). Углы расходимости излучения ЛД типа KLM-D650-5-5 варьируются в диапазоне значений от 12,5 до 12,7°, а ЛД типа KLM-H980-200-5 – от 14,5 до 14,9°.

Экспериментально установлено, что условие (13) выполняется при всех значениях параметра  $\theta_i^\perp$  вплоть до 40° для всех ЛД типа KLM-D650-5-5 и вплоть до 42° для четырех ЛД типа KLM-H980-200-5.

У двух ЛД типа KLM-H980-200-5 с углами расходимости 14,5 и 14,8° верхняя граница диапазона значений  $\theta_i^\perp$ , при которых выполняется условие (13), равна 22 и 24°. Из чего следует, что режим генерации этих лазеров не является одномодовым.

Определение верхней границы рабочего диапазона значений  $\theta_i^\perp$  является крайне необходимым и важным этапом конструирования узла связи источника лазерного излучения и одномодового оптического волокна.

#### Заключение

Разработана методика экспресс-анализа диаграммы направленности излучения ЛД, позволяющая быстро определить их режим генерации на фундаментальной моде. Установлено, что для определения такого режима генерации достаточно связать координаты точек перегиба гауссовой кривой, найденные путем натурных измерений угла расходимости излучения, с ходом касательных к кривой в этих точках. Для описания диаграммы направленности излучения ЛД использована функция, полученная нами ранее в явном виде. Установлено, что в качестве аргумента такой функции целесообразно использовать значения функции, описывающей касательные к гауссовой кривой в точках ее перегиба. Такой подход позволил разработать простой алгоритм определения режима генерации на фундаментальной моде. Установлено, что у некоторых ЛД экспериментально найденные значения  $f^\perp(\theta_i^\perp)$  в периферийной области лазерного пучка отличаются от расчетных, что говорит о нарушении режима генерации на фундаментальной моде, а значит, и изменении условий ввода излучения ЛД в оптическое волокно. Это необходимо учитывать при конструировании узла согласования излучения с оптическим волокном.

#### Литература

1. ГОСТ Р ИСО11146-1–2008. Лазеры и лазерные установки (системы). Методы измерений ширин, углов расходимости и коэффициентов распространения лазерных пучков. – Ч. 1: Стигматические (гомоцентрические) и слабоастигматические пучки. – М.: Стандартинформ, 2010. – 20 с.
2. ГОСТ Р ИСО11146-2–2008. Лазеры и лазерные установки (системы). Методы измерений ширин, углов рас-

ходимости и коэффициентов распространения лазерных пучков. – Ч. 2. Астигматические пучки. – М.: Стандартинформ, 2010. – 17 с.

3. ГОСТ Р/ТР ИСО11146-3–2008. Лазеры и лазерные установки (системы). Методы измерений ширины, углов расходимости и коэффициентов распространения лазерных пучков. – Ч. 3: Стигматические (гомоцентрические) и слабоастигматические пучки. – М.: Стандартинформ, 2010. – 24 с.

4. Non-standardized measurement methods and measuring instruments for parameters and characteristics of laser diodes radiation and their standardization prospects / V. Bliznyuk, N. Berezovskaya, V. Parshin, A. Tarasov // Proceedings of the International Academic Forum AMO–SPITSE –NESEFF. – Smolensk: Universum, 2016. – P. 85–86.

5. Thompson G.H.B. Physics of semiconductor laser devices. – N.Y.: J. Wiley and Sons, 1980. – P. 185–186.

6. Яркость и филаментация оптического потока мощных квантоворазмерных InGaAs/GaAs-лазеров, работающих в непрерывном режиме / А.П. Богатов, А.Е. Дракин, А.А. Стратонников, В.П. Коняев // Квантовая электроника. – 2000. – Т. 30, № 5. – С. 401–405.

7. ГОСТ Р ИСО 13694–2010 (Е). Оптика и оптические приборы. Лазеры и лазерные установки (системы). Методы измерений распределения плотности мощности (энергии) лазерного пучка. – М.: Стандартинформ, 2010. – 20 с.

8. ГОСТ Р 50471-93. Излучатели полупроводниковые. Метод измерения угла излучения. – М.: Госстандарт России, 1993. – 6 с.

9. Выгодский М.Я. Справочник по высшей математике. – М.: АСТ, 2006. – 991 с.

**Близнюк Владимир Васильевич**

Канд. техн. наук, доцент каф. физики им. В.А. Фабриканта Национального исследовательского университета «МЭИ»  
Тел.: +7-916-608-86-83  
Эл. почта: 4059541@mail.ru

**Березовская Наталия Витальевна**

Аспирант каф. физики  
Тел.: +7-926-134-02-14  
Эл. почта: Natalia.Berezovskaya@inbox.ru

**Паршин Василий Алексеевич**

Студент каф. физики  
Тел.: +7-915-289-94-47  
Эл. почта: ParshinVasA@gmail.com

**Тарасов Александр Евгеньевич**

Ст. преп. каф. физики  
Тел.: +7-915-353-46-62  
Эл. почта: TarasovAY01@gmail.com

Bliznyuk V.V., Berezovskaya N.V., Parshin V.A., Tarasov A.E.

**Method of rapid analysis of radiation pattern of the laser diode**

The method of rapid analysis of the radiation pattern of laser diodes allows to quickly determine the mode of generation of the laser diode on the fundamental mode. It was found that for the determination of the lasing, is enough to link the coordinates of inflection points of the Gaussian curve, found by in-situ measurements of the angle of radiation divergence, with the progress of the tangent to the curve at these points.

**Keywords:** laser diode, fundamental mode, directional radiation pattern, the near-field zone, the far-field zone.

**УПРАВЛЕНИЕ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА  
И ИНФОРМАТИКА**



УДК 614.8

М.Ю. Катаев, А.А. Скугарев

## Интеллектуальный ситуационный центр, основанный на комплексировании космических и наземных данных

Показываются отдельные аспекты, связанные с созданием интеллектуального ситуационного центра основанного на комплексировании космических и наземных данных. Приводится описание структуры ситуационного центра, необходимой для эффективного взаимодействия его отдельных элементов, с целью повышения скорости и точности результатов функционирования ситуационного центра при анализе процессов и явлений. Полученные результаты должны стать надежной опорой для принятия решений различными организациями.

**Ключевые слова:** спутниковые данные, ситуационный центр, обработка данных, принятие решений, структура данных.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2016-19-3-61-64

В последнее время в связи с ростом возможности технических и программных средств получать, хранить, преобразовывать и анализировать разнородную информацию наблюдается резкий рост создания ситуационных центров в различных областях народного хозяйства. Ситуационные центры создаются не только на базе МЧС, но и на транспорте, сельском и водном хозяйстве и др. Понятие «ситуационный центр» (СЦ) прочно вошло в обиход и понятно даже непрофессионалам. Основными задачами СЦ являются сбор разнородных данных, ситуационное моделирование, прогнозирование и анализ с целью выработки эффективных решений [1–3].

Как правило, СЦ располагается в специально выделенном помещении, предназначенном для совещания и оперативного принятия управленческих решений руководящим составом. Для снабжения руководящего состава информацией существуют другие помещения, в которых расположены средства сбора, хранения, предварительной обработки анализа и комплексирования данных, получаемых различными информационными системами и приборами. В ситуационном центре не только вырабатываются решения, но и проводятся коммуникационные связи с различными подразделениями территории.

СЦ разрабатываются в соответствии с требованиями стандартов, ГОСТ и других нормативных документов (например, для информационных систем ГОСТ 34, РД 50-34.698–90 и др.), специальных стандартов (ГОСТ Р51583, ГОСТ Р53113 и др.) и требованиями силовых ведомств.

Важным аспектом, с которым связана работа ситуационных центров, являются своевременность и точность принятия решений. Для обеспечения этого факта необходим сбор разнородных данных в режиме реального времени. Помимо этого, необходимо иметь историю развития тех или иных событий, которые являются причиной создания СЦ, например, паводки, пожары и др. Одним из наборов данных, который стал основой для многих СЦ, являются космические данные, однако эти данные представляют чаще всего набор изображений, которые анализируются.

В данной статье нами приводятся некоторые аспекты создания ситуационного центра, в основе

которого лежат космические данные, приводятся возможности и ограничения.

### Ситуационные центры

Определение «ситуационный центр» связано с понятием «ситуация». Можно привести определение [http://www.pravo.vuzlib.su]: «В любой области человеческой деятельности объективно складывается некоторая совокупность фактических обстоятельств, между которыми существует причинная, временная, пространственная или иная связь и которые в силу этой связи образуют целостную систему элементов, называемую ситуацией». Таким образом, под ситуацией подразумевается наличие причинно-следственных связей, связанных или приводящих к определенным событиям, происходящих во времени и пространстве.

Понятно, что пространственные характеристики события, определяющие ту или иную ситуацию, определяются размерами, а вот временные характеристики можно представить в виде декомпозиции, представленной на рис. 1.



Рис. 1. Декомпозиция понятия «ситуация»

Данные, которые связаны с ситуацией, являются разнородными (температура, влажность, ветер, толщина снегового покрова и др.) и неоднородными (временные и пространственные масштабы). Для ситуации одной из важнейших характеристик является временной масштаб событий, которые могут быть медленными, быстрыми и катастрофическими (см. рис. 1).

Любую ситуацию можно увидеть на качественном, интуитивном уровне знаний человека, а можно со стороны сбора данных. В последнем случае, с ситуацией связано получение оценки состояния территории по набору спутниковых и наземных данных. Эта оценка зависит от количества и качества

получаемых СЦ данных, от пространственного расположения источников данных (удаленности от центра события) и их временного разрешения (например, метеорологические данные поступают с частотой 4 раза в сутки).

В данной статье нами будет рассмотрен лишь один аспект, который связан со спутниковыми данными, и как они могут повлиять на работу ситуационного центра.

#### Спутниковые данные

В настоящее время на орбите работает достаточно большое количество спутниковых приборов в мониторинговом режиме [4, 5]. Примеры спутниковых приборов, данные с которых широко используются на практике, вследствие относительно высокой повторяемости получения данных приведены в таблице.

Из таблицы видно, что спутниковые приборы определяются такими характеристиками, как ширина полосы захвата (область получения данных при пролете над наземной точкой), разрешение в надире (определяет размер пикселя), повторяемость (через какое время спутниковый прибор попадает в район исследуемой точки) и число спектральных каналов (спектральные области).

Возможность получения спутниковых данных, необходимых для обработки, существенно зависит от наличия солнечных дней, так как облачность мешает наблюдать за поверхностью Земли. Так, по

данным сайта <http://russia.pogoda360.ru> среднее количество пасмурных, облачных и солнечных дней представлено на рис. 2.

Из рис. 2 видно, что количество солнечных дней в среднем 130–160 дней в году и большая часть из них бывает в летний период времени. Конечно же, среди пасмурных дней бывают участки времени дня, когда облачности практически нет или она разорванная, когда спутниковые измерения позволяют фиксировать поверхность Земли. Этим дням вполне достаточно, чтобы отслеживать долговременные ситуации, возникающие на поверхности Земли и связанные с типами поверхности. В отдельные периоды времени можно отслеживать с помощью спутников и быстрые ситуации, например пожары или паводки.

Спутниковые измерения можно представить в виде многомерного пространства  $S(x, y, t, k)$ , где  $(x, y)$  – пиксель с параметрами  $\{L_{at}, L_{on}\}$ , время  $(t)$  и спектральный канал  $k, k = 1, \dots, N_k$ . Для каждого пикселя  $(x, y)$  с учетом спектральных каналов  $k$  можно построить  $n = 1, \dots, N_i$  разнообразных индексов  $I(n, t)$ . Одним из распространенных индексов, используемых на практике, является вегетационный индекс NDVI [5]. На рис. 3 показан временной ряд вегетационного индекса за 6 лет для одного из исследуемых тестовых участков.

Характеристики спутниковых приборов

Спутниковый прибор	Ширина захвата, км	Разрешение в надире, м	Повторяемость, дни	Число спектральных каналов
Terra / Aqua MODIS	2300	250, 500, 1000	2 раза в день	36
Landsat-8	185	30, 90	16	11

30	С	С	С	С	С	С	С	С	С	С	С	С
27	О	О	О	О	О	О	О	О	О	О	О	О
24	П	П	П	О	О	О	О	О	О	О	О	О
21				О	О	О	О	О	О	О	О	О
18												
15				П	О	О	О	О	О	О	О	О
12					П	О	О	О	О	О	О	О
9												
6												
3												
	Янв	Фев	Мар	Апр	Май	Июн	Июл	Авг	Сен	Окт	Ноя	Дек

Рис. 2. Количество пасмурных (П), облачных (О) и солнечных (С) дней в районе г. Томска

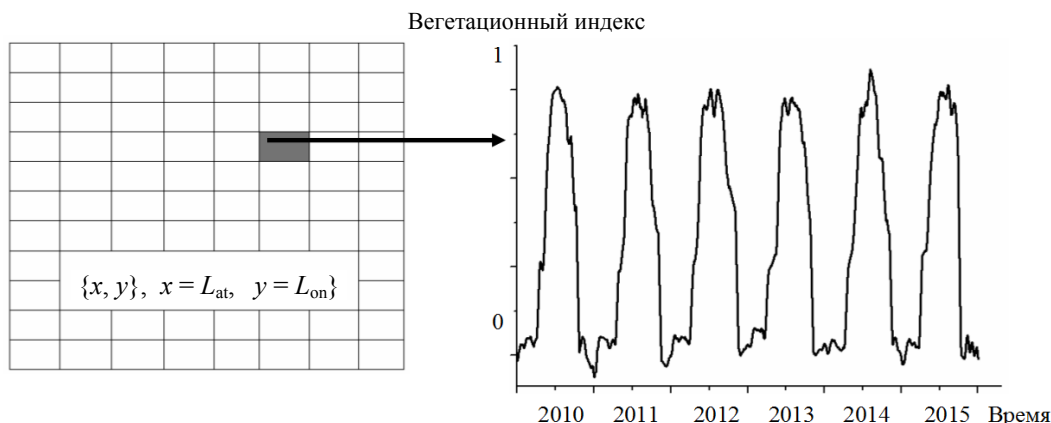


Рис. 3. Временной ряд вегетационного индекса за 6 лет для одного из пикселей изучаемой территории



Каждый временной ряд  $I(t)$  можно разложить в ряд на составляющие: трендовую  $I_{tr}(t)$ , сезонную  $I_s(t)$  и случайную  $I_c(t)$ :

$$I(t) = I_{tr}(t) + I_s(t) + I_c(t).$$

В качестве тренда, как правило, выбирается линейная функция:

$$I_{tr}(t) = \alpha + \beta t, \quad (1)$$

где  $\alpha$  – константа,  $\beta$  – средняя скорость изменения сигнала.

Для оценивания параметров линейного тренда используется метод наименьших квадратов. Далее находится сезонная составляющая  $I_s(t)$ , например, по формуле:

$$I_s(t) = A \cdot \exp\{-(t - B)^2/C\}, \quad (2)$$

здесь  $A, B, C$  – искомые параметры.

Величина случайной составляющей  $I_c(t)$  определяется рядом факторов: сезоном года, типом поверхности, условиями измерений, погодой во время и непосредственно перед измерением и др.

Множество параметров  $\mathbf{P} = \{\alpha, \beta, A, B, C\}$  представляют собой модель, которая описывает поведение индекса в течение года. Для каждого пикселя по набору параметров можно построить среднее значение  $E\{I(t_{st})\}$ , дисперсия  $D\{I(t_{st})\}$ , где  $t_{st}$  – шаг временной сетки (день, неделя или месяц). Задача поиска изменений сводится к анализу разности  $\Delta_j = P_{j+1} - P_j$ , здесь  $j$  – номер года. Естественно полагать, что при малых разностях  $\Delta_j$ , изменения укладываются в статистическую погрешность, обусловленную естественными природными изменениями. При некоторой величине  $\Delta_j$ , превышающей статистическую погрешность, изменения считаются значимыми и тогда анализируются те параметры, которые повлияли на это изменение. Например, параметр тренда  $\beta$  может иметь положительное или отрицательное значение, нейтральный ход или возрастающий и др.

#### Структура программного комплекса обработки спутниковых данных

В центре космического мониторинга ТУСУРА (ЦКМ) нами проводится разработка программного комплекса [6, 7], позволяющего считывать из разнообразных хранилищ спутниковые данные, хранить, обрабатывать, анализировать и генерировать отчеты. Структура программного комплекса (ПК) приведена на рис. 4.

Основной работы ПК является регулярное получение с приемной станции ЦКМ ТУСУРА и скачивание из Интернета источников (хранилищ) спутниковых данных, которые на первом этапе попадают в слой загрузки. Этот слой необходим для формирования данных за текущий день, так как их скачивание проходит в различные периоды времени по началу и длительности. Далее данные проверяются на целостность, проводится их распаковка из текущего формата (например, hdf или netCDF) во внутренний формат ПК. После этого выполняется этап предварительной и тематической обработки. Предварительная обработка заключается в атмосферной коррекции сигналов, а тематическая обработка – в вычислении маски облачности и набора индексов. После того как определены основные наборы индексов

$I(n, t)$ , проводится комплексирование данных, т.е. учет априорных данных (наземные измерения, сопутствующие спутниковые данные, например, угловые характеристики измерений, влажность, температура и др.). Комплексирование позволяет построить модельное представление  $\mathbf{P}$  более точно с учетом ежегодных изменений параметров атмосферы и поверхности.

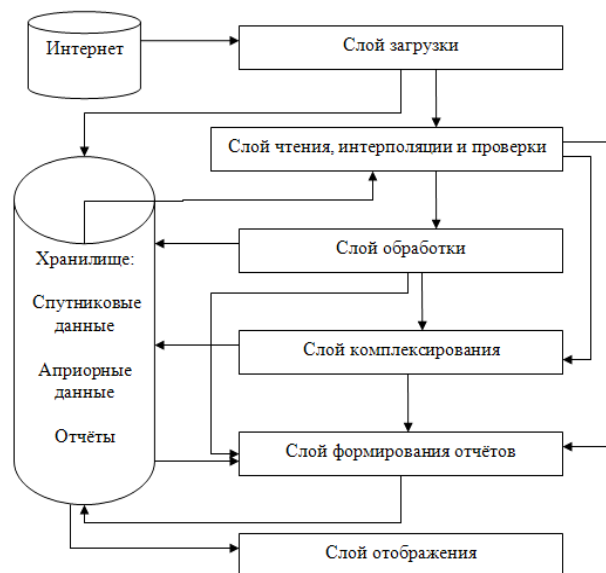


Рис. 4. Структура программного комплекса обработки спутниковых сигналов.

#### Структура интеллектуального ситуационного центра

Получаемые после обработки спутниковых данных параметры являются основой для дальнейшего анализа и выработки управляющих решений в зависимости от типа и величины изменений, что определяется состоянием процессов и явлений на наблюдаемой территории. Интеллектуальность заключается в том, что нами предлагается применять разнообразные математические подходы, которые в автоматическом режиме ежедневно позволяют проводить обследование территории с целью выявления изменений ее состояния. Обследование территории в СЦ путем получения и обработки данных в автоматическом режиме приводит к технологии, когда человек начинает взаимодействовать с системой при появлении определенных «сигналов» об выявленных изменениях, а также выработке окончательного прогноза или управленческого решения на основе предлагаемых системой рекомендаций. Имея модель поведения естественного состояния для каждого пикселя, возможно построить прогнозное поведение состояния, что важно при выявлении изменений и определения причин изменений (пожар, подтопление и т.п.). Изменения возможны различной величины и, как правило, связаны либо с естественными причинами (мокрая почва или листва после дождя и др.), либо с изменениями типа поверхности (там, где ранее была почва, теперь вода). Эти изменения можно ранжировать по величине и типу, что позволяет

определить не только длительные изменения (например, строительство микрорайона), но и быстрые (например, пожар). Выявление катастрофических изменений для спутниковых измерений – чрезвычайная редкость, так как в момент развития события спутник должен проходить в этом районе и в это время должна отсутствовать облачность.

Можно сформулировать алгоритм выработки определенных рекомендаций для СЦ, в основе которого лежит обработка спутниковых данных: текущее состояние → наблюдение → обработка → изменения → классификация изменений → анализ тенденций → прогноз (начальное состояние, промежуточное и текущее) → выработка рекомендаций.

В данной последовательности наиболее сложной задачей является классификация изменений, так как требует под собой однозначного определения типов поверхности данного пикселя. От точности решения этой задачи зависит погрешность прогноза и, значит, верности вырабатываемых рекомендаций. Данная задача является достаточно обширной в математическом плане и будет представлена в следующих работах авторов. Отметим, что предлагаемая вниманию задача является весьма трудоемкой в вычислительном плане. Сложность состоит в многомерности пространства данных и различной пространственно-временной структуре спутниковых и априорных данных. Возникает задача комплексирования, при которой необходимо данные наземных измерений (или аэровоздушных) привести к единой пространственной и временной сетке спутниковых измерений.

На рис. 5 показана обобщенная структура программного комплекса интеллектуального ситуационного центра, в котором решение принимается на основе отчетов, генерируемых системой анализа при комплексировании наземных и спутниковых измерений.

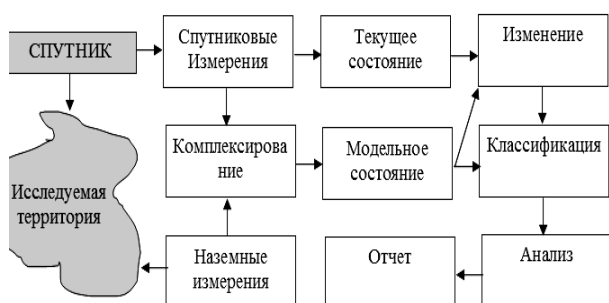


Рис. 5. Структура программного комплекса интеллектуального ситуационного центра

### Заключение

Данная статья является не детальным описанием элементов ситуационного центра, а лишь одной из его частей, основанных на использовании спутниковых данных. Приводится описание подхода к созданию интеллектуального ситуационного центра, в котором проходит регулярный анализ текущей ситуации на поверхности Земли, и эта информация накапливается. Накопленная информация является

основой для разработки модели, со значениями которой происходит сравнение текущих измерений. При сравнении получаются изменения, которые ранжированы по величине и определяют естественные или иные изменения. Классификация изменений позволяет после анализа выделить состояния, которые требуют определенных управленческих решений.

### Литература

1. Бычков И.В. Интеграция информационно-аналитических ресурсов и обработка пространственных данных в задачах управления территориальным развитием / И.В. Бычков, Г.М. Ружников, А.Е. Хмельнов и др. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2012. – 369 с.
2. Информационно-аналитические средства поддержки принятия решений и ситуационные центры. – М.: Изд-во РАГС, 2006. – 326 с.
3. Симанков В.С. Режимы работы ситуационного центра регионального уровня / В.С. Симанков, Д.А. Колесников // Программные продукты и системы. – 2010. – № 1. – 52 с.
4. Кронберг П. Дистанционное изучение Земли. – М.: Мир, 1988. – 343 с.
5. Малинников В.А. Мониторинг природной среды аэрокосмическими средствами / В.А. Малинников, А.Ф. Стеценко, А.Е. Алтынов. – М.: МИИГАиК, 2009. – 140 с.
6. Катаев М.Ю. Интернет-информационная система накопления, обработки и анализа спутниковых данных MODIS / М.Ю. Катаев, А.А. Бекеров, А.К. Лукьянов // Доклады Том. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники. – 2015. – № 1(35). – С. 93–99.
7. Катаев М.Ю. Обнаружение экологических изменений природной среды по данным спутниковых измерений / М.Ю. Катаев, А.А. Бекеров // Оптика атмосферы и океана. – 2014. – Т. 27, № 7. – С. 652–656.

### Катаев Михаил Юрьевич

Д-р техн. наук, профессор каф. автоматизированных систем управления (АСУ) ТУСУРА, профессор Юргинского технологического института (филиала) Национального исследовательского Томского политехнического университета, научный руководитель ЦКМ ТУСУРА  
Тел.: +7-960-975-2785, +7 (382-2) 70-15-36  
Эл. почта: kataev.m@sibmail.com

### Скугарев Андрей Анатольевич

Руководитель ЦКМ ТУСУРА  
Тел.: +7-913-889-98-03  
Эл. почта: skugarev@inbox.ru

Kataev M.Yu., Skugarev A.A.

### Intelligent situational center based on the aggregation space and ground-based data

The article describes some aspects related to the creation of intelligent situational centre that is based on the integration of space and terrestrial data. The description of the structure of a situational center for effective interaction of the individual elements is presented, in order to obtain optimal accuracy and time results. The obtained results are supposed to be a reliable support for decision making in various instances.

**Keywords:** satellite data, situational centers, data processing, decision making, structure.

УДК 621.396.

Д.А. Покаместов, А.Я. Демидов, Я.В. Крюков

## Влияние формирующих матриц на помехозащищенность каналов связи с множественным доступом на основе разреженных кодов

Исследовано влияние формирующих матриц на помехозащищенность каналов связи с множественным доступом на основе разреженных кодов. Приведен алгоритм создания разреженных матриц, на основе которых строятся кодовые книги. Показано, что множественный доступ с разреженным кодом превосходит существующие методы доступа в помехозащищенности в канале с белым гауссовским шумом.

**Ключевые слова:** множественный доступ с разреженным кодом, SCMA, OFDM, разреженные матрицы, кодовые книги, алгоритм распространения доверия, MPA, 5G.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2016-19-3-65-69

Сети мобильной связи постоянно развиваются, увеличиваются объем передаваемого трафика и количество подключаемых устройств. По этой причине технологии, обеспечивающие беспроводную связь, устаревают и перестают справляться с сетевой нагрузкой, и на смену им приходят новые поколения стандартов, описывающие технические аспекты работы систем связи. Сейчас для передачи мобильного трафика используются сети четвертого поколения LTE, в основе физического уровня которых лежит технология ортогонального частотного разделения абонентов, – OFDM.

В телекоммуникациях появляется новое направление – Интернет вещей, концепция которого предполагает подключение бытовых приборов и вещей к глобальной сети, что ведет к многократному увеличению нагрузки на системы связи. В первую очередь это касается гибкости распределения ресурсов и обслуживания большого количества подключенных устройств. Так, компания Ericsson прогнозирует более 50 млрд подключений к 2020 году [1]. Кроме того, растет трафик и от ставших уже традиционными планшетов и мобильных телефонов. Сети LTE не смогут справиться с такой нагрузкой, поэтому уже сейчас идет работа над стандартом связи нового, пятого, поколения.

Для решения стоящих проблем физический уровень новых сетей должен основываться на методе доступа, более эффективно использующем частотно-временные ресурсы и поддерживающем большее количество подключений по сравнению с OFDMA.

Сейчас появилось новое направление методов, получивших общее название «неортогональные методы доступа». Под неортогональностью имеется в виду тот факт, что пользователи передают данные одновременно и в одной полосе частот. К этим методам относится и рассматриваемый в данной статье множественный доступ с разреженным кодом SCMA (Sparse Code Multiple Access).

SCMA включает подходы OFDMA – передача данных ведется на ортогональных поднесущих, формируемых с помощью обратного быстрого преобразования Фурье. SCMA также использует подходы кодов с низкой плотностью проверок на четность

LDPC – для распределения пользователей по поднесущим используются разреженные матрицы, а для детектирования символов – вероятностные алгоритмы, основанные на алгоритме MPA (Message Passing Algorithm), применяемом для декодирования LDPC кодов [2].

Характеристики SCMA полностью определяются кодовыми книгами, которые построены на формирующих разреженных матрицах. В данной статье рассмотрены алгоритмы формирования таких матриц и их влияние на работу системы связи с SCMA.

### Модель системы связи с SCMA

На рис. 1 приведена схема формирования SCMA символов. Каждый слой (абонент) передает биты  $b_v$ , которые подверглись помехоустойчивому кодированию (ПК). Биты поступают на специальный SCMA кодер, который выполняет две функции. Во-первых, он обеспечивает распределение пользователей по поднесущим. Во-вторых, каждой группе бит пользователя он ставит в соответствие набор комплексных амплитуд, отображаемых на поднесущие, – квадратурная амплитудная модуляция. При этом каждый пользователь ведет передачу на нескольких поднесущих, т.е. применяется расширение. Сформированные таким образом комплексные амплитуды поднесущих поступают на блок формирования сигнала во временной области, например, классический OFDM, включающий блок обратного быстрого преобразования Фурье (ОБПФ) и добавление циклического префикса (ЦП). В то же время вместо схемы OFDM можно применить другие методы формирования поднесущих, например набор гребенчатых фильтров FBMC, также входящих в концепцию развития сетей пятого поколения [3]

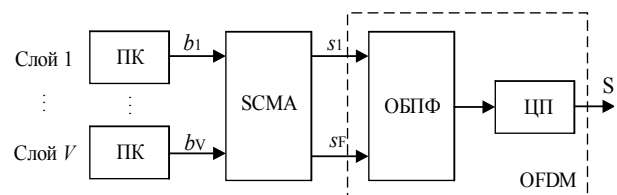


Рис. 1. Схема формирования SCMA символов

Распределение пользователей по поднесущим ведется в соответствии с разреженной матрицей  $\mathbf{B}$ ,

(пример такой матрицы приведен на рис. 2, а), которую можно также представить в виде двудольного графа (графа Таннера, рис. 2, б). Первая группа вершин (круги на графе, столбцы матрицы **B**) соответствует поднесущим, вторая группа (квадраты на графе, строки матрицы **B**) соответствует слоям. Ребра графа, соединяющие вершины, показывают на каких поднесущих ведет передачу каждый слой. Индекс  $k = 1 \dots F$  соответствует поднесущим, индекс  $v = 1 \dots V$  – слоям. Параметры  $dk$  и  $dv$  показывают, какое количество слоев передается на одной поднесущей, и наоборот, сколько поднесущих занимает один слой. При этом эти параметры связаны соотношением

$$dk = \frac{Vdv}{F} \tag{1}$$

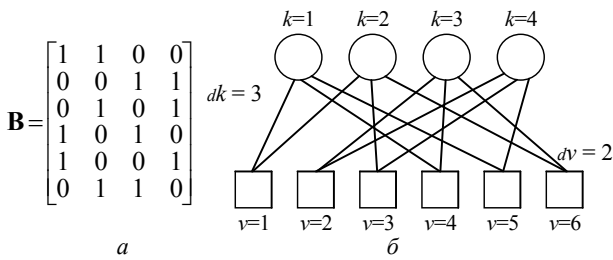


Рис. 2. Матрица для  $V=6, F=4-a$ ; соответствующий ей граф Таннера – б

На основе разреженной матрицы строится кодовая книга SCMA, содержащая значения комплексных амплитуд, модулирующих поднесущие. На рис. 3 приведен пример такой кодовой книги для матрицы **B**, рассмотренной выше. Общая кодовая книга **CB** состоит из кодовых книг слоев **CB<sub>v</sub>**, которые в свою очередь состоят из кодовых слов **CW<sub>vm</sub>**. Нулевые элементы кодовой книги обозначены белыми кубами.

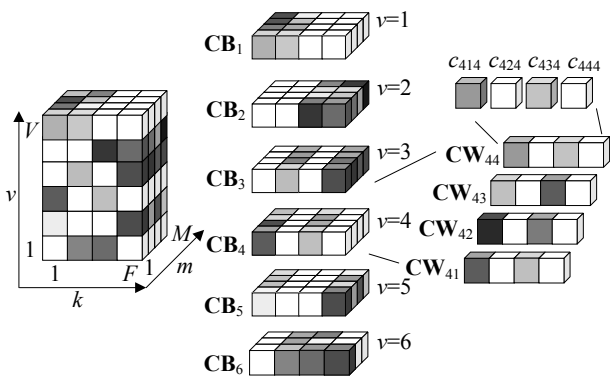


Рис. 3. Кодовая книга SCMA для  $V=6, F=4, M=4$

В зависимости от значения бит, передаваемых на слое  $v$ , выбирается соответствующее им кодовое слово с индексом  $m_v$  (где  $m_v = [1 \dots M]$ ,  $M$  – индекс модуляции кодового слоя). Символ SCMA формируется как суперпозиция всех  $V$  кодовых слов. Этот процесс иллюстрирует рис. 4, на котором изображен выбор кодовых слов и формирование итогового символа для конкретной битовой реализации.

Символьную скорость системы связи с SCMA можно определить как

$$R = V \log_2(M)$$

или в пересчете количества бит на поднесущую:

$$R = \frac{V \log_2(M)}{F} \tag{2}$$

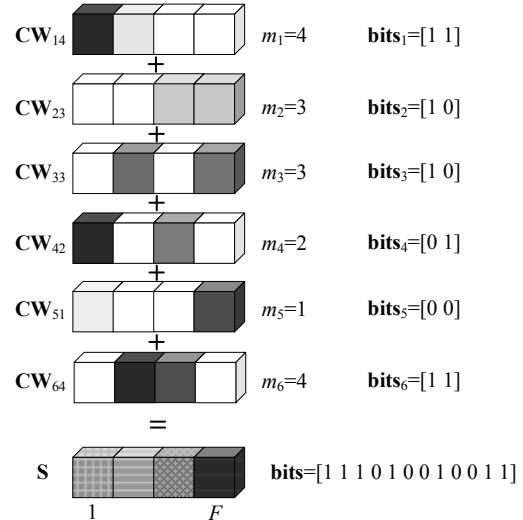


Рис. 4. Формирование SCMA символов по кодовой книге

Выбор конкретных значений амплитуд кодовых слов в значительной мере влияет на помехоустойчивость системы с SCMA. На каждой поднесущей в результате суперпозиции компонент кодовых слов формируется результирующее сигнальное созвездие, к которому можно предъявить ряд классических требований к созвездиям квадратурных сигналов, таких как максимизация евклидова расстояния между точками, нумерация в соответствии с кодом Грея, минимизация дисперсии модуля состояний и др. [3]. Такие же требования предъявляются и к сигнальным созвездиям, образованным разными элементами кодовых слов внутри кодовой книги каждого слоя. При этом эти сигнальные созвездия необходимо рассматривать сразу на  $dv$  поднесущих. Конечным критерием выбора значений комплексных амплитуд является минимизация вероятности битовой ошибки для системы связи с выбранной кодовой книгой.

Детектирование SCMA символов основано на алгоритме МРА, который в русскоязычных источниках называется алгоритмом распространения доверия. Этот алгоритм получил широкое распространение в практике декодирования LDPC кодов, т.к. существенно снижает вычислительные затраты по сравнению с классическими алгоритмами декодирования блочных кодов [3]. Алгоритм основан на пересчете вероятностей двунаправленной передачи сообщений на графе Таннера в течение нескольких итераций.

Более подробно вопросы формирования и обработки сигналов с SCMA рассмотрены в [4].

**Разреженные матрицы SCMA**

Параметры системы связи с SCMA, такие как количество слоев (пользователей), количество под-

несущих, помехоустойчивость и скорость передачи, полностью определяются формирующей разреженной матрицей и индексом модуляции  $M$ . Остановимся на требованиях, предъявляемых к матрицам, их свойствам и способам их формирования.

Как и в теории LDPC кодов, основным требованием к матрицам SCMA является отсутствие в соответствующих им графах циклов определенной кратности [5]. Цикл определяется как замкнутая последовательность ребер графа, начинающаяся и заканчивающаяся в одной вершине. Наименьшим возможным циклом является цикл кратности 4, именно такие циклы хуже всего влияют на исправляющие свойства LDPC кодов и помехоустойчивость SCMA. Граф с двумя циклами кратности 4, а также его матрица смежности приведены на рис. 5. Ребра первого цикла обозначены пунктирными, а второго – жирными линиями.

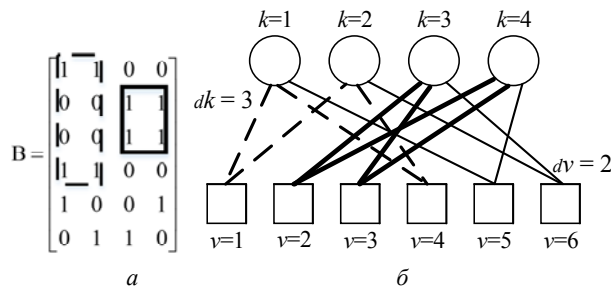


Рис. 5. Пример двух циклов кратности 4 в матрице SCMA – а; в графе Таннера – б

Пример матрицы и графа Таннера без циклов кратности 4 приведен на рис. 2. Вывести аналитическое выражение, позволяющее оценить степень влияния подобных циклов на помехоустойчивость SCMA, не представляется возможным, поэтому авторы ограничиваются результатами, полученными в ходе имитационного моделирования, которые приведены ниже в соответствующем разделе.

Для формирования матриц можно использовать алгоритмы, применяемые при заполнении проверочных матриц LDPC кодов. Поскольку количество ортогональных поднесущих в современных системах связи редко превосходит нескольких тысяч (стандартом LTE определяется максимальное количество 2048 [6]), размер формирующей матрицы SCMA будет меньше проверочных матриц LDPC. По этой причине можно использовать алгоритм, предложенный Галлагером [5]. Общий вид такой матрицы  $\mathbf{V}$ , полученной с помощью алгоритма Галлагера, можно записать в виде

$$\begin{bmatrix} \mathbf{V}_0 \\ \mathbf{V}_1 \\ \mathbf{V}_2 \\ \dots \\ \mathbf{V}_N \end{bmatrix},$$

где  $\mathbf{V}_0 \dots \mathbf{V}_N$  – подматрицы. Элементы строки  $i$  подматрицы  $\mathbf{V}_0$  с индексами  $(i-1) \cdot dv + 1 \dots i \cdot dv$  равны единицам, остальные элементы – нули,  $i = 1 \dots F/dv$ .

Подматрица  $\mathbf{V}_0$  для  $F = 9, dv = 3$  приведена на рис. 6. Благодаря такой структуре матрицы, в ней отсутствуют циклы.

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

Рис. 6. Подматрица  $\mathbf{V}_0$  для  $F = 9, dv = 3$

Подматрицы  $\mathbf{V}_1 \dots \mathbf{V}_N$  формируются путем перестановок столбцов в подматрице  $\mathbf{V}_0$ . В результате перестановок в сформированных подматрицах должны отсутствовать циклы минимальной кратности. Проверка на циклы кратности 4 может быть произведена путем нахождения попарного скалярного произведения между всеми столбцами (проверку пройдут подматрицы, чье скалярное произведение не превышает 1). Подматрицы, содержащие циклы, отбрасываются. Подматрицы формируются до тех пор, пока количество строк результирующей матрицы не достигнет  $V$ . На рис. 7 приведена матрица  $\mathbf{V}$ , получившаяся в результате выполнения алгоритма Галлагера для  $F = 9, V = 12, dv = 3, dk = 4$ .

$\mathbf{V}_0$	$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$
$\mathbf{V}_1$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
$\mathbf{V}_2$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$
$\mathbf{V}_3$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$

Рис. 7. Матрица  $\mathbf{V}$ , полученная в результате выполнения алгоритма Галлагера для  $F = 9, V = 12, dv = 3, dk = 4$

С помощью предложенного алгоритма можно формировать регулярные (количество единиц во всех столбцах одинаково) матрицы любой размерности  $F$ , однако при этом размерность  $V$  ограничена, с одной стороны, выражением (1). С другой стороны, вычислительная сложность алгоритма декодирования МРА пропорциональна  $M^{dk}$  [4]. При  $M = 4$  целесообразно брать параметр  $dk$  выше 4. Кроме того, начиная с определенного отношения  $V$  к  $F$  (большое число пользователей при малом числе поднесущих), при больших значениях  $dv$  и  $dk$  (более 4) невозможно выполнить требование отсутствия циклов кратности 4.

### Влияние формирующих матриц на помехоустойчивость системы связи с SCMA

На рис. 8 приведены зависимости коэффициента битовой ошибки (bit error rate, BER) от отношения энергии, приходящейся на бит к спектральной плотности мощности шума ( $E_b/N_0$ , для системы связи с SCMA при  $F = 4, V = 6, dv = 2, dk = 3$ , при формирующей матрице с циклами кратности 4 (см. рис. 5) и без циклов (см. рис. 2). В качестве канала передачи при моделировании рассматривался канал с аддитивным белым гауссовским шумом.

При вероятности битовой ошибки  $10^{-4}$  система SCMA с формирующей матрицей, в которой присутствуют циклы кратности 4, проигрывает системе без циклов порядка 2 дБ.

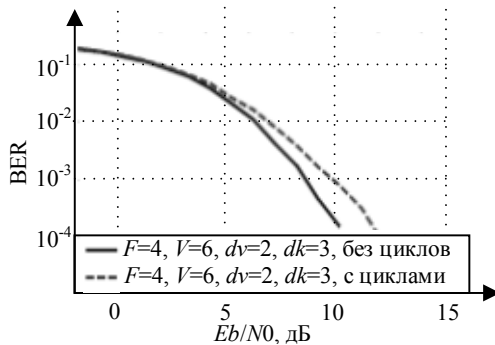


Рис. 8. Зависимость вероятности битовых ошибок от отношения энергии, приходящейся на бит, к спектральной плотности мощности шума для SCMA с формирующей матрицей с циклами кратности 4 и без циклов,  $V = 4$ ,  $F = 6$ ,  $dv = 2$ ,  $dk = 3$ ,  $M = 4$ , 8 итераций алгоритма MPA

На рис. 9 приведены зависимости коэффициента битовой ошибки от отношения энергии, приходящейся на бит, к спектральной плотности мощности шума, полученные в результате имитационного моделирования для различных размерностей разреженных матриц.

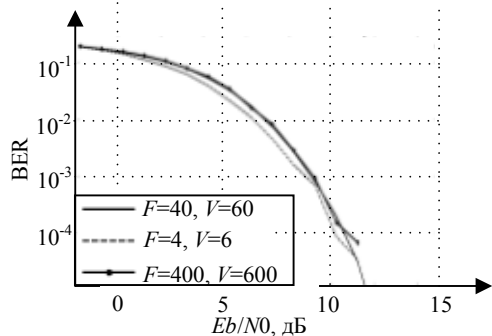


Рис. 9. Зависимость вероятности битовых ошибок от отношения энергии, приходящейся на бит, к спектральной плотности мощности шума для различных  $V$ ,  $F$ ;  $dv = 2$ ,  $dk = 3$ ,  $M = 4$ , 8 итераций алгоритма MPA

Как видно из рис. 9, увеличение размерности кодовой книги в 10 и 100 раз дает сопоставимую помехоустойчивость.

Рассмотрим три сценария распределения пользователей ( $V$ ) по поднесущим ( $F$ ) и соответствующие им зависимости вероятностей битовых ошибок и скорости передачи (рис. 10). Приведены зависимости вероятности ошибок от отношения сигнал/шум (ОСШ), т.к. зависимость от нормированных значений энергии, приходящейся на бит, к спектральной плотности мощности шума не позволит оценить эффект расширения спектра.

1. Количество пользователей совпадает с количеством поднесущих ( $V = F$ ). При этом сценарий SCMA сводится к схеме OFDM-QAM если каждый пользователь занимает одну поднесущую ( $dv = dk = 1$ ), или к схеме multicarrier (многочастотный, MC)

CDMA с QAM модуляцией [7] (если  $dv = dk > 1$ , т.е. присутствует расширение), притом помехоустойчивость и скорость в обоих случаях будет соответствовать помехоустойчивости OFDM-QAM при том же индексе модуляции поднесущей.

2. Количество пользователей меньше количества поднесущих ( $V < F$ ). В этом случае SCMA схож со схемой многочастотного кодового разделения с квадратурной модуляцией поднесущих MC CDMA QAM [7] или схемой доступа с низкой плотностью сигнатур LDS, однако в отличие от MC CDMA для детектирования будет использоваться не набор корреляторов, а MPA-алгоритм. При этом помехоустойчивость будет превосходить, а скорость передачи уступать OFDM-QAM при том же индексе модуляции поднесущей.

3. Количество пользователей превосходит количество поднесущих ( $V > F$ ). Такой сценарий наиболее интересен, т.к. число доступных пользователям ресурсов превосходит число ортогональных поднесущих, что особенно важно в условиях большого числа подключений. Скорость в таком сценарии будет превосходить, а помехоустойчивость уступать OFDM QAM при том же индексе модуляции поднесущей.

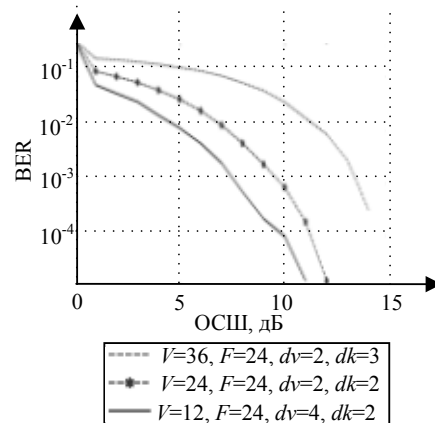


Рис. 10. Зависимость вероятности битовых ошибок от отношения сигнал/шум для различных  $V$ , при  $F = 24$ ,  $M = 4$ , 8 итераций алгоритма MPA

В зависимости от уровня помех и искажений в канале и сетевой нагрузки система может выбирать тот или иной сценарий, что обеспечивает большую гибкость и адаптивность по сравнению с системой OFDM, в которой необходимая помехоустойчивость и скорость регулируются только индексом модуляции.

Наконец, сравним помехоустойчивость систем связи с SCMA и OFDM-QAM при фиксированной скорости передачи (рис. 11). Параметры SCMA:  $V = 6$ ,  $F = 4$ ,  $dv = 2$ ,  $dk = 3$ ,  $M = 4$ , 8 итераций алгоритма MPA при детектировании, таким образом, согласно (2) скорость передачи составит 3 бита на поднесущую. Аналогичной по скорости является схема модуляции OFDM QAM-8.

Из рис. 11 видно, что система связи с SCMA при скорости передачи 3 бита на поднесущую и вероятности битовой ошибки  $10^{-6}$  превосходит систе-

му с модуляцией OFDM QAM-8 по помехоустойчивости на 1,5 дБ.

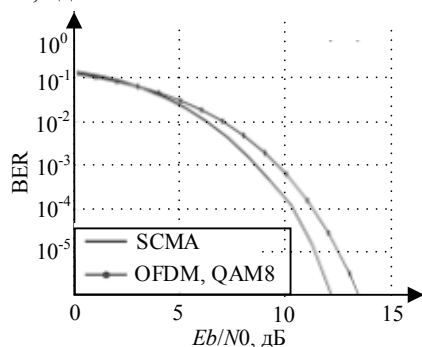


Рис. 11. Зависимость вероятности битовых ошибок от отношения энергии, приходящейся на бит, к спектральной плотности мощности шума для SCMA  $V = 6$ ,  $F = 4$ ,  $dv = 2$ ,  $dk = 3$ ,  $M = 4$ , 8 итераций алгоритма MPA и OFDM QAM-8

### Заключение

Предложенный алгоритм формирования разреженных формирующих матриц SCMA позволяет на их основе создавать кодовые книги для необходимого числа абонентов и поднесущих.

При генерировании разреженных матриц необходимо следить за наличием циклов кратности 4, наличие которых в соответствующих матрицам графах Таннера может существенно снизить помехоустойчивость. Кроме этого, ограничения при формировании матриц вносят вычислительные затраты алгоритма детектирования MPA, которые экспоненциально зависят от веса строк и столбцов матриц.

Система связи, работающая с кодовыми книгами, построенными на основе разреженных матриц, может адаптивно подстраиваться под состояние канала, обеспечивая необходимую вероятность битовой ошибки, используя саму структуру кодовой книги. Количество пользователей может превосходить количество поднесущих, что является одним из ключевых достоинств SCMA, благодаря возможности в ограниченном частотном ресурсе обеспечить работу большего числа пользователей по сравнению с существующими системами связи. Также SCMA превосходит существующие системы с OFDM в помехоустойчивости. По этим причинам SCMA может лечь в основу физического уровня систем связи пятого поколения.

### Литература

1. More than 50 billion connected devices. Ericsson White Paper [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.akosrs.si/files/Telekomunikacije/Digitalna\\_agenda/Internetni\\_protokol\\_Ipv6/More-than-50-billion-connected-devices.pdf](http://www.akosrs.si/files/Telekomunikacije/Digitalna_agenda/Internetni_protokol_Ipv6/More-than-50-billion-connected-devices.pdf) (дата обращения: 04.10.2016).

2. Nikopour H. Sparse code multiple access / H. Nikopour, H. Baligh. – Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), 2013 IEEE 24th International Symposium on // IEEE. – 2013. – P. 332–336.

3. Дворкович В.П. Цифровые видеотелекоммуникационные системы (теория и практика) / В.П. Дворкович, А.В. Дворкович. – М.: Техносфера, – 2012. – 1009 с.

4. Формирование и обработка сигналов множественного доступа с разреженным кодом / Д.А. Покаместов, А.Я. Демидов, Я.В. Крюков, Е.В. Рогожников, Р.Р. Абенов // Электросвязь. – 2016. – №10. – С. 56–61.

5. Gallager R. Low-density parity-check codes. – Cambridge; Massachusetts, 1963. – 90 p.

6. 3GPP TS 36.211, version 9.1.0, 3-rd Generation Partnership Project, Technical Specification Group Radio Access Network, Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA), Physical Channels and Modulation. – 2010.

7. Nathan Y. Multi-carrier CDMA in indoor wireless radio networks / Y. Nathan, J.P. Linnartz, G. Fettweis // IEICE Transactions on Communications. – 1994. – Vol. 77, № 7. – P. 900–904.

8. Hoshydar R. Novel low-density signature for synchronous CDMA systems over AWGN channel / R. Hoshydar, F.P. Wathan, R. Tafazolli // Signal Processing, IEEE Transactions on. – 2008. – Vol. 56, № 4. – P. 1616–1626

### Покаместов Дмитрий Алексеевич

Аспирант каф. телекоммуникаций и основ радиотехники (ТОР) ТУСУРа  
Тел.: +7-952-809-43-75  
Эл. почта: dmaltomsk@mail.ru

### Демидов Анатолий Яковлевич

Канд. физ.-мат. наук, зав. каф. ТОР  
Тел.: +7-913-840-36-28  
Эл. почта: demidovay@tor.tusur.ru

### Крюков Яков Владимирович

Аспирант каф. ТОР  
Тел.: +7-913-104-44-06  
Эл. почта: kryukov.tusur@gmail.com

### Pokamestov D.A., Demidov A.Ya. Kryukov Ya. V. Forming matrix of sparse code multiple access

In the article are considered the telecommunication system with sparse code multiple access on physical layer. The algorithm to generate sparse matrix, which forming codebook is described. Basic parameters of matrix, that influence to performance of telecommunication system are considered. It was shown that the sparse code multiple access excels the other methods in the channel with a white Gaussian noise.

**Keywords:** sparse code multiple access, SCMA, OFDM, sparse matrix, codebooks, message passing algorithm, MPA, 5G.



УДК 004.732

А.Ю. Исхаков

## Методика верификации личности субъекта доступа при удаленной регистрации с помощью доверенных лиц

Рассматриваются вопросы подтверждения личности при удаленной регистрации пользователей в системах контроля и управления доступом. На основе сформированных критериев проведен анализ современных способов верификации и определены основные проблемы их применения в выбранной предметной области. Автором предлагается применить механизм доверенных лиц в качестве инструмента верификации при удаленной регистрации. Подробно рассмотрена методика применения данного механизма и представлены результаты ее апробации.

**Ключевые слова:** места массового пребывания людей, система контроля и управления доступом, верификация, доверенные лица.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2016-19-3-70-75

В июле 2016 года были внесены изменения в Федеральный закон № 35-ФЗ «О противодействии терроризму» [1] и отдельные законодательные акты Российской Федерации в части установления дополнительных мер по обеспечению общественной безопасности. Правительству и ФСБ России даны поручения, касающиеся проработки и утверждения следующих вопросов:

- порядок сертификации средств шифрования при передаче сообщений в сети Интернет, а также установление норм ответственности за использование на сетях связи несертифицированных средств кодирования (шифрования);

- порядок передачи ключей шифрования в адрес уполномоченного органа в области обеспечения безопасности РФ;

- применение норм Федерального закона № 35-ФЗ «О противодействии терроризму» и отдельных законодательных актов о прекращении оказания услуг связи в случае неподтверждения соответствия персональных данных фактических пользователей услуг связи сведениям, указанным в абонентских договорах.

Подобные меры еще раз подчеркивают направленность политики государства на деанонимизацию пользователей сети Интернет. Газета «Известия» опубликовала [2] высказывание заместителя главы комитета Государственной думы РФ по информационной политике Вадима Деньгина: «Мы должны идти к тому, чтобы верификация пользователей была повсеместной. В повседневной жизни есть паспорт, и человек показывает его почти везде, и в Интернете должно быть так же. Тут нечего бояться. Это правильный шаг».

Несмотря на то, что на сегодняшний день существует множество способов и механизмов идентификации пользователей в сети Интернет, в большинстве случаев установить реальную личность не представляется возможным. Это приводит к затруднениям в расследовании правонарушений, а учитывая сложившуюся геополитическую обстановку, может быть использовано злоумышленниками для де-

стабилизации общества и возникновению угроз общественной безопасности.

Между тем идентифицировать людей нужно не только при использовании интернет-ресурсов, но и в обычной жизни. Особенно это касается мест массового пребывания людей (ММПЛ), под которыми понимаются общественные места с высокой плотностью человеческих потоков и вероятностью возникновения неуправляемой толпы [3]. Подобные объекты должны быть обеспечены системами безопасности, в том числе системами контроля и управления доступом (СКУД), позволяющими идентифицировать личность каждого посетителя.

Идентификация посетителей ММПЛ подразумевает их регистрацию в СКУД независимо от используемого набора идентификационных характеристик. Наиболее распространенным способом регистрации посетителей является непосредственное обращение в службу или подразделение ММПЛ, осуществляющее функции контроля за соблюдением пропускного режима. При этом предполагается предъявление человеком документа, удостоверяющего личность.

Как было сказано ранее, ММПЛ характеризуются высокой плотностью потоков посетителей, поэтому применение такого способа регистрации зачастую приводит к увеличению временных затрат и, как следствие, замедлению бизнес-процессов. Кроме того, такой подход предполагает возможные сложности при подтверждении личности человека (верификации). Например, в некоторых ММПЛ в качестве документа, удостоверяющего личность, может использоваться не только паспорт гражданина РФ, но и другие менее защищенные документы. Кроме того, в случае посещения подобных объектов иностранными гражданами и предъявления ими паспортов других государств также актуальной становится проблема проверки подлинности документов.

В связи с этим предлагается рассмотреть вопрос о возможности применения удаленной регистрации в СКУД. При этом особое внимание необходимо уделить вопросам определения механизма ве-



рификации, применимого в данной предметной области.

#### **Постановка задачи**

Примерами реализации удаленной регистрации посетителей в системе могут служить заказ пропуска на конференцию (выставку) посредством телефонного звонка, отправки электронного сообщения или заполнения онлайн-формы на сайте. Тогда, как правило, идентификатором выступает сгенерированный и распечатанный самим пользователем билет или пропуск.

Стоит отметить, что в большинстве случаев отсутствует возможность убедиться в достоверности представленной информации и, как следствие, подтвердить личность регистрируемого пользователя. Применение в качестве идентифицирующих признаков биометрических характеристик хоть и обеспечивает высокую степень достоверности, но в то же время подразумевает непосредственное посещение субъектом доступа ММПЛ для проверки документов, удостоверяющих личность. Подобное решение приводит к первоначальной проблеме – замедлению бизнес-процессов.

Одним из способов верификации является привязка регистрируемой учетной записи к номеру мобильного телефона путем отправки одноразовых паролей в виде SMS-сообщений. Такой подход используется, в том числе, в системах многофакторной аутентификации [4] для проведения финансовых операций через системы онлайн-банков, а также для получения государственных услуг в электронной форме.

Но в случае с банком или государственной услугой «привязка» определенного сотового телефона как дополнительного фактора аутентификации осуществляется непосредственно при посещении клиентом офиса и предъявления документа, удостоверяющего личность. Другими словами, сам процесс регистрации не является удаленным. Необходимо учитывать, что удаленная регистрация в ММПЛ преследует цель полностью отменить необходимость предварительного посещения объекта. Поэтому в данном случае применение SMS-сообщений в качестве единственной верифицирующей информации не всегда является достаточной. Номер телефона может быть зарегистрирован на другого человека, и определить данный факт невозможно без привлечения правоохранительных органов. Данное обстоятельство, вероятно, стало одной из причин поправок, внесенных в стандарт Digital Authentication Guideline [5], в части рекомендаций недопущения применения SMS-сообщений в качестве одного из элементов многофакторной аутентификации.

Таким образом, можно утверждать, что в настоящее время актуальна проблема верификации личности при удаленной регистрации посетителей ММПЛ, в основе инженерных технических систем безопасности которых лежит СКУД. Соответственно, важной представляется задача разработки подходов и методического обеспечения процедуры уда-

ленной регистрации пользователей СКУД, предусматривающей верификацию личности человека без необходимости предварительного посещения объекта в целях минимизации неудобств и ограничений для протекающих в ММПЛ бизнес-процессов.

Автором предлагается рассмотреть механизм доверенных лиц в качестве способа решения обозначенной выше проблемы.

#### **Верификация пользователей при удаленной регистрации**

В настоящее время существует ряд способов, которые используются для установления сведений о личности регистрируемого пользователя. Был проведен сравнительный анализ таких способов на предмет возможности их применения в ММПЛ. Особое внимание было уделено существующим ограничениям такого использования.

В качестве критериев при сравнении были выделены: возможность установления личности, возможность фальсификации сведений злоумышленником, возможность удаленного проведения процедуры, возможность использования способа нерезидентами РФ, а также массовость применения. Перечисленный набор критериев, по мнению автора, в полной мере охватывает спектр вопросов, которые необходимо учесть при организации пропускного режима в ММПЛ.

Очевидно, что возможность фальсификации процедуры верификации существует для любого механизма. Однако ее сложность изменяется в зависимости от используемых верификационных признаков, компетентности персонала (при наличии), проводящего процедуру, и других факторов. Сложность фальсификации оценивалась экспертами в области защиты информации и инженерно-технических систем безопасности по шкале от 1 до 10, где 1 – низкая сложность, 10 – очень высокая сложность.

Под возможностью установления личности понимается способность администратора системы получить паспортные данные зарегистрировавшегося человека.

При наличии возможности удаленной верификации пользователь не имеет необходимости предварительно посещать объект для регистрации, при отсутствии такой возможности – посещение необходимо.

Так как посещение многих ММПЛ не ограничено для иностранных граждан, важно учитывать возможность использования способов регистрации, доступных для нерезидентов РФ.

Массовость способа представляет собой его доступность на сегодняшний день для использования населением, независимо от места проживания, возраста, профессии, социального статуса и т.д. Чаще всего она зависит от необходимости наличия дополнительных устройств, доступа к специальным ресурсам или материальных затрат для их получения.

В табл. 1 представлен сравнительный обзор способов установления сведений о личности, используемых в современных подсистемах регистрации, на основе выделенных критериев.

Способы установления сведений о личности при регистрации

Способ	Сложность фальсификации	Установление личности	Удаленная верификация	Использование нерезидентами РФ	Массовость
Личная проверка документов, удостоверяющих личность	8. Использование чужого паспорта (изменение внешнего вида). Человеческий фактор при проверке фотографии	Да	Нет	Да	Да
Отправка кода активации на мобильный телефон	2. Использование чужих SIM-карт, услуги сервисов анонимных мобильных номеров	Да	Да	Да	Да
Отправка кода активации на указанный e-mail	1. Использование фальшивых аккаунтов в почтовых службах	Нет	Да	Да	Да
Привязка к аккаунту соц. сети	1. Использование фальшивых аккаунтов в соц. сетях	Нет	Да	Да	Нет
Запись IP-адреса	1. Использование анонимайзеров (прокси-серверы, VPN/SSH-туннели, Tor, I2P)	Нет	Да	Да	Да
Хранение browser Fingerprint, HTTP-referer и прочих характеристик клиента	1. Настройка анонимизации в браузерах	Нет	Да	Да	Да
Использование Federated Identity технологий (OpenID, OAuth протоколы)	1. Использование фальшивых аккаунтов у Federated Identity провайдеров	Нет	Да	Да	Нет
Использование «подтвержденных учетных записей» ФГИС ЕСИА	7. Кража аутентификационных данных от учетной записи. Кража носителя сертификата ключа проверки электронной подписи и PIN-кода	Да	Да	Да. <i>Множество ограничений</i>	Да
Применение технологий электронной подписи	8. Кража носителя сертификата ключа проверки электронной подписи и PIN-кода	Да	Да	Да. <i>Множество ограничений</i>	Нет

Способ отправки кода активации на мобильный телефон удовлетворяет всем критериям, необходимым для ММПЛ. Способ характеризуется сравнительно простой фальсификацией с использованием чужих SIM-карт и распространенных интернет-сервисов анонимных мобильных номеров. Таким образом, сведения о владельце SIM-карты могут быть недостоверными.

Использование «подтвержденных учетных записей» ФГИС ЕСИА и применение технологий электронной подписи обладают высокой сложностью фальсификации данных о личности, так как для их получения применяется проверка документов и необходимо личное присутствие. Эти способы позволяют однозначно установить личность пользователя, верифицировать его удаленно, кроме того, они доступны для нерезидентов РФ.

Применение технологий электронной подписи пока не является массовым для физических лиц ввиду необходимости материальных затрат на получение сертификата ключа, а также посещения удостоверяющего центра. В то же время бесплатная для населения учетная запись ФГИС ЕСИА на сегодняшний день есть более чем у 26 млн граждан РФ, что подтверждает ее распространение. Кроме того, получить такую учетную запись может каждый гражданин (в том числе нерезидент РФ).

Способы установления сведений о личности с использованием учетных записей ФГИС ЕСИА, а

также технологий электронной подписи удовлетворяют критериям использования для установления личности пользователей ММПЛ, однако они не могут быть использованы для всех категорий пользователей в связи с необходимостью предварительного получения записи и ключа.

Таким образом, возникает необходимость создания дополнительного способа, который бы наравне с указанными обеспечивал возможность верификации личности и при этом удовлетворял выдвинутым требованиям:

- 1) высокая сложность фальсификации данных злоумышленником;
- 2) возможность варьирования степени достоверности верификации в соответствии с требуемым уровнем защищенности объекта;
- 3) возможность удаленного взаимодействия и использование лицами, не имеющими гражданства РФ.

#### Методика верификации субъекта доступа

Автором предлагается в подсистеме регистрации СКУД использовать подход, основанный на механизме доверенных лиц. Он основан на подтверждении личности пользователя другими пользователями, которые лично удостоверились в правомерности совершения запрашиваемой операции и одновременно с этим наделены соответствующими привилегиями.

Одной из первых аутентификацию с использованием подобного механизма предложила исследо-

вательская группа Джона Брэйнарда [6]. Исследователями была реализована и испытана система, использующая в своем составе социальную аутентификацию, в процессе которой личность пользователя удостоверяется другими людьми.

Успешным примером внедрения подобного механизма является действующая по настоящее время система восстановления доступа к аккаунту «Trusted Contacts», используемая в социальной сети Facebook с 2013 года [7]. У пользователя сети есть возможность указать несколько друзей, которые могли бы подтвердить его личность с помощью специального ключа в случае блокировки аккаунта. Предполагается, что указанные пользователем лица имеют возможность позвонить или встретиться с ним лично, чтобы подтвердить легитимность запроса на восстановление доступа. По мнению администрации социальной сети, такой механизм является наиболее надежным и безопасным для восстановления доступа.

Позднее в своей диссертации [8] А.А. Малков предложил алгоритм работы автоматизированной системы восстановления доступа к учетной записи, основанный на технологии социальной аутентификации с помощью доверенных лиц. Согласно данной технологии решение о восстановлении доступа принимается на основании оценок так называемых поручителей. При этом А.А. Малков предложил дополнить механизм доверенных лиц проверкой доверенных каналов связи на этапе формирования списка поручителей и анализом активности пользователя за период времени, предшествующий обращению к системе, путем вычисления времени премодерации.

Как в случае с сетью Facebook, так и в технологии Малкова, механизм доверенных лиц применяется в задачах восстановления доступа к уже существующим учетным записям. Автором же рассматривается задача верификации личности до момента создания учетной записи. Для этого предлагается провести адаптацию технологии социальной аутентификации для решения задачи верификации субъекта доступа при регистрации в СКУД ММПЛ.

При оценке возможности использования подхода, основанного на применении доверенных лиц, для решения поставленной задачи автор исходил из следующих положений. Во-первых, данный механизм обеспечивает возможность удаленной верификации, что позволяет провести весь процесс регистрации субъекта доступа без предварительного посещения объекта. Во-вторых, наличие контактов между посетителями и поручителями (доверенными лицами) по альтернативным каналам связи позволяет регулировать данный процесс для достижения требуемого уровня конкретизации и проверки достоверности данных.

В литературе на сегодняшний день не представлено методическое обеспечение, которое бы затрагивало вопросы применения данного механизма в различных случаях. Также отсутствует методическое обеспечение, регламентирующее процесс верифика-

ции личности при удаленной регистрации пользователей в СКУД.

В связи с этим автор предпринял попытку разработать методику верификации личности субъектов доступа СКУД ММПЛ. В ходе проводимого исследования были сформулированы основные потребности потенциальных пользователей такой методики – должностных лиц, ответственных за организацию пропускного режима в ММПЛ. Используемый механизм верификации должен обеспечивать:

1) возможность полностью удаленного применения без необходимости предварительного посещения объекта;

2) возможность субъектам доступа самостоятельно передавать в СКУД свои идентификационные данные в момент регистрации;

3) возможность самостоятельно задавать степень достоверности верификации в соответствии с требуемым уровнем защищенности объекта;

4) соответствие современному развитию СКУД и возможность интеграции в них.

Ниже представлены основные шаги предлагаемой методики.

Шаг 1. В системе *VS* размещается заявка на посещение ММПЛ некоторым субъектом доступа *Subject*. В составе заявки содержатся идентификационные данные *Subject\_identity*. Заявка может быть подана как самим субъектом доступа *Subject*, так и некоторым доверенным лицом, обладающим в системе *VS* статусом *Voucher*.

Шаг 2. Если заявка подана зарегистрированным пользователем, обладающим статусом *Voucher*, то перейти к шагу 3. Иначе субъект доступа *Subject* предоставляет список доверенных лиц, обладающих статусом *Voucher*, которые готовы подтвердить личность *Subject*.

Шаг 3. Система *VS* генерирует одноразовый верификационный ключ *Verification\_code* и передает его субъекту доступа по основному каналу передачи данных *Channel*.

Шаг 4. Субъект доступа *Subject* по дополнительному каналу *Second channel* подтверждает получение верификационного ключа *Verification\_code*.

Шаг 5. Если заявка была подана зарегистрированным пользователем, обладающим статусом *Voucher*, то перейти к шагу 6. Иначе необходимо организовать верификацию субъекта доступа *Subject* посредством указанных на шаге 2 доверенных лиц, обладающих статусом *Voucher*:

5.1. *VS* отправляет каждому доверенному лицу *Voucher*, указанному на шаге 2, уведомление о необходимости верифицировать субъекта доступа *Subject*.

5.2. Доверенные лица, обладающие статусом *Voucher*, подтверждают личность субъекта доступа путем заполнения опросника в системе *VS*.

5.3. *VS* рассчитывает интегральную оценку  $r_k$  результатов [9] заполнения опросника доверенными лицами по формуле (1):

$$r_k = \frac{\sum_{i=1}^n y_{ki}}{\sum_{i=1}^n \max_j (\delta_{ij})}, \quad (1)$$

где  $y_{ki}$  – оценка, соответствующая ответу  $k$ -го доверенного лица  $Voucher_k$  на вопрос  $q_i \in Q$ ;  $\delta_{ij}$  – нормированная в диапазоне  $[0; 1]$  оценка  $j$ -го варианта ответа на  $i$ -й вопрос  $q_i \in Q$ , причем выполняется (2):

$$\sum_{j=1}^{k_i} \delta_{ij} = 1; \quad (2)$$

$Q = \{q_1, q_2, \dots, q_n\}$  – множество вопросов, на которые должно ответить доверенное лицо  $Voucher$  для верификации субъекта доступа  $Subject$ ;  $|Q| = n$ .

5.4.  $VS$  принимает решение по результатам процедуры верификации субъекта  $Subject$  согласно функции  $Ver$ , рассчитанной согласно (3):

$$Ver(R_{pos}, Pc) = \begin{cases} \text{ИСТИНА, если } |R_{pos}| \geq Pc \\ \text{ЛОЖЬ, иначе.} \end{cases}, \quad (3)$$

причем  $R_{pos}$  – множество интегральных оценок результатов ответов доверенных лиц, превышающих пороговое значение оценки  $Pg$ .  $R_{pos} = \{r_k \mid r_k \geq Pg\}$ ,  $R_{pos} \subset R$ ;  $Pg$  – пороговое значение оценки  $r_k \in R$ ;  $Pc$  – минимально допустимое количество доверенных лиц  $Voucher$ , подтвердивших личность субъекта доступа  $Subject$ .

В случае если функция  $Ver$  принимает значение *ИСТИНА*, считается, что пользователь  $Subject$  верифицирован (предоставляется инструментарий для получения идентификатора). Иначе субъект доступа формирует новый список доверенных лиц, после чего осуществляется переход к шагу 5.1.

*Указания к методике:*

1. В качестве подтверждающих доверенных лиц должно быть не менее 3 человек (согласно исследованию С. Шехтера, С. Игельмана и П.Б. Ридера от 2009 г.).

2. Для получения статуса  $Voucher$  субъект доступа должен пройти дополнительную процедуру верификации. Ее смысл заключается в ознакомлении субъекта доступа с правилами и нормами ответственности за приобретаемые им права по верификации личности других субъектов, а также в подтверждении своего согласия. Примеры вариантов прохождения дополнительной процедуры верификации в зависимости от типов ММПЛ:

- письменное согласие (при посещении ММПЛ);
- подписание согласия средствами квалифицированной электронной подписи;
- подписание согласия в эл. виде с использованием «подтвержденной учетной записи» ЕСИА.

#### **Область применения методики**

Множество рассматриваемых объектов доступа следует разделить на 2 класса:

1-й класс – объекты, в которых любое посещение должно быть инициировано некоторым заинтересованным представителем ММПЛ. То есть подразумевается, что каждый посетитель может попасть в ММПЛ только по приглашению принимающей стороны. Например, если в качестве ММПЛ выступает

офисный центр, помещения которого сдаются в аренду, то в качестве инициатора может выступать представитель арендатора.

2-й класс – объекты, в которых представителям ММПЛ невозможно организовать приглашения субъектов доступа. Бизнес-процессы подобных объектов построены таким образом, что представителям ММПЛ заведомо неизвестно – кто и когда решит их посетить. Примером выступают торговые центры, театры и кинотеатры и т.д.

#### **Апробация методики**

Для сравнения предложенной методики с приведенными способами установления личности пользователя была проведена их апробация. Апробация предполагала необходимость зарегистрироваться и пройти верификацию для посещения некоторого мероприятия с помощью одного из предложенных пользователю способов. В качестве пользователей выступали члены трех трудовых коллективов общей численностью 112 человек, которые получили рассылку с приглашением на одно и то же мероприятие с необходимостью получения идентификатора. Среди участников присутствовали лица в возрасте от 24 до 56 лет.

Для сравнения способов были выделены следующие количественные показатели:

- 1) количество человек, воспользовавшихся способом (посчитавших его наиболее удобным для процедуры);
- 2) среднее время, потребовавшееся для регистрации пользователя;
- 3) среднее время, потребовавшееся для верификации пользователя;
- 4) доля выявленных ошибочных верификаций от общего количества верифицированных данным способом.

Из 112 участников 9 (по 3 в каждой организации) являлись администраторами системы, то есть были зарегистрированы, верифицированы и имели идентификаторы (для функционирования механизма доверенных лиц). 103 человека должны были получить идентификаторы самостоятельно, при этом не проводилось какое-либо анонсирование и отрыв членов коллектива от рабочего процесса. Таким образом, была предпринята попытка смоделировать ситуацию, когда более 50 человек желают посетить одно мероприятие и получить соответствующий идентификатор для этого. Число людей (в данном случае – 103 посетителя) делает невозможным их регистрацию непосредственно при посещении ММПЛ при учете того факта, что посетители не приходят на мероприятие ранее чем за 30 мин, а на регистрацию 1 посетителя соответствующему персоналу требуется не менее 30 с.

По итогам проведения процедуры не оказалось участников, не справившихся с получением идентификатора. Численные результаты апробации по выделенным показателям приведены в табл. 2.

Приведенные результаты иллюстрируют тот факт, что длительность процедуры верификации с

использованием механизма доверенных лиц значительно (в несколько) раз превышает соответствующие значения для двух других способов.

Таблица 2  
Количественные показатели апробации процедуры верификации в ММПЛ

Способ верификации	Учетная запись ФГИС ЕСИА	Использование средств ЭП	Механизм доверенных лиц
Количество человек, воспользовавшихся способом	21	4	78
Среднее время регистрации, мин	7,18	11,10	33,24
Среднее время верификации, мин	1,21	1,48	24,57
Доля выявленных ошибок верификации, %	0	0	0

Однако следует отметить, что в рамках решения поставленной перед пользователями задачи – регистрации на общее мероприятие – средний показатель, равный 33,24 мин является удовлетворительным и не превышает разумно допустимого временного интервала для использования на практике. Вместе с тем количество пользователей, выбравших способ верификации с помощью механизма доверенных лиц, превышает в 3,7 раза количество использовавших для этого учетную запись ФГИС ЕСИА, а количество использовавших ЭП – в 19,5 раза.

#### Заключение

На основании проведенной апробации можно заключить, что верификация с использованием механизма доверенных лиц дополняет способы верификации посредством «подтвержденной» учетной записи ФГИС ЕСИА, а также верификации с использованием ЭП. Другими словами, данный механизм позволяет пользователям пройти процедуру регистрации удаленно, не имея при этом дополнительных учетных записей и ключей. Нахождение регистрации с помощью подтверждения личности доверенными лицами уходит в среднем в 4–5 раз больше времени, однако средний показатель для данного способа не превышает разумно допустимого, который можно исчислять количеством суток.

Следует отметить, что время процедуры зависит от количества доверенных лиц, выполняющих верификацию, а также особенностей ММПЛ. Предусмотренная методикой возможность наделения уже верифицированных пользователей статусом *Voucher* позволит сократить затрачиваемое время, оптимизировав при этом процедуру регистрации. Результаты, полученные в ходе апробации методики, подтверждают возможность ее использования для удаленной регистрации посетителей ММПЛ на практике.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках мероприятия 1.3 федеральной целевой программы «Исследования и разработки по

приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы» (соглашение о предоставлении субсидии № 14.577.21.0172 от 27 октября 2015 г., идентификатор RFMEFI57715X0172).

#### Литература

1. О противодействии терроризму: Федеральный закон РФ от 26.03.2003 г. № 35-ФЗ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_58840/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_58840/), свободный (дата обращения: 10.08.2016).
2. Зыков В. Интернет-СМИ освободят от ответственности за комментарии читателей [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://izvestia.ru/news/612511>, свободный (дата обращения: 15.07.2016).
3. Об утверждении требований к антитеррористической защищенности мест массового пребывания людей и объектов (территорий), подлежащих обязательной охране полицией, и форм паспортов безопасности таких мест и объектов (территорий): Постановление Правительства РФ от 25 марта 2015 г. № 272 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&nd=102370057>, свободный (дата обращения: 20.07.2016).
4. Технология усиленной аутентификации пользователей информационных процессов / И.А. Ходашинский, М.В. Савчук, И.В. Горбунов, Р.В. Мещеряков // Доклады ТУСУРа. – 2011. – № 2(24), ч. 3. – С. 236–248.
5. DRAFT NIST Special Publication 800-63-3 Digital Authentication Guideline [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://pages.nist.gov/800-63-3/sp800-63-3.html>, свободный (дата обращения: 10.08.2016).
6. Reeder R.W. When the Password Doesn't Work, Secondary Authentication for Websites / R.W. Reeder, S. Schechter // IEEE Security & Privacy. – 2011. – № 9(2). – P. 43–49.
7. Introducing Trusted Contacts [Electronic resource]. – URL: <https://www.facebook.com/notes/facebook-security/introducing-trusted-contacts/10151362774980766/> (access date: 15.07.2016).
8. Малков А.А. Технология аутентификации с помощью доверенных лиц : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.13.19. – Уфа, 2013. – 18 с.
9. Евсютин О.О. Приложения клеточных автоматов в области информационной безопасности и обработки данных / О.О. Евсютин, А.А. Шелупанов // Доклады ТУСУРа. – 2012. – № 1(25), ч 2. – С. 119–125.

---

#### Исхаков Андрей Юнусович

Аспирант ТУСУРа

Тел.: +7-923-421-58-28

Эл. почта: [iay@security.tomsk.ru](mailto:iay@security.tomsk.ru)

Iskhakov A.Yu.

#### Subject verification method based on the trustees mechanism for remote registration

Identity verification for remote user registration in access control systems is the main problem described in this article. Modern verification methods and their main problems in application in the chosen subject area were analyzed. The authors propose to apply the mechanism of trustees as a verification tool for remote user registration.

**Keywords:** crowded place, access control system, verification, trustees.

УДК 004.072.7

А.О. Исхакова

## Модель процесса формирования инвариантов классов текстов

Предложена модель процесса формирования инвариантов классов текстов, основанная на использовании качественных и уточняющих их количественных характеристик текста, при этом формирование перечня характеристик основывается на лингвистических особенностях исследуемых классов текстов. Модель применялась на примере формирования инвариантов для двух классов: естественных и искусственных текстов. Результатом является перечень характеристик, обладающих различительной способностью при классификации таких текстов, а также инварианты указанных классов. Представленные данные могут быть использованы для автоматического определения происхождения текста на основе обученной нейронной сети или оценке статистических параметров указанных характеристик текстов.

**Ключевые слова:** текст, инвариант класса текстов, характеристика текста, модель, искусственный текст, естественный текст.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2016-19-3-76-80

Для современного общества сеть Интернет – это основа многих социальных и деловых взаимодействий, уникальная совокупность локальных, региональных, национальных и общемировых компьютерных сетей. Важнейшим символом глобальной сети является технология мгновенного обмена данными между миллионами пользователей.

Объем распространяемой в Интернете информации увеличивается с каждым годом, вместе с ним усиливается конкурентная борьба за внимание пользователя. Для повышения позиций ресурса в поисковых системах и, как следствие, популярности веб-сайтов используются различные методы оптимизаций. Часто для этого используются методы автоматического порождения текстов, которые позволяют создавать множество уникальных версий некоторого исходного экземпляра [1]. Уникальность достигается благодаря использованию специальных алгоритмов, связанных с изменением текстообразующих элементов.

Массово порожденные тексты используются:

– для привлечения читателя к веб-ресурсу (для этого генерируются «копии» текстового контента, освещающего популярные темы);

– для распространения в сети контента определенной направленности (для этого «копии» текста распространяются по различным информационным ресурсам).

Такие интернет-ресурсы как социальные сети или информационные порталы являются для многих пользователей основным источником сведений о событиях, изменениях в мире, аналогом средств массовой информации. При таком положении массовое порождение текстов можно рассматривать как инструмент для формирования общественного мнения через интернет-СМИ и социальные сети различного уровня. Такой инструмент может быть использован для пропаганды определенных идей, в том числе преступных, а также введения в заблуждение населения или парализации работы электронных ресурсов [2].

Множество исследовательских работ посвящено выявлению отличительных свойств искусственно

созданных текстов, представляющих собой поисковый спам и направленных на обман алгоритмов работы поисковых систем [3–5]. Данные тексты имеют ряд особенностей: обилие ключевых слов, определенным образом выстроенные ссылки, наличие скрытого текста и др. [6]. Поисковый спам практически не несет смысловой нагрузки и предназначен для манипулирования работой поисковых алгоритмов.

Автоматические генераторы также используются для создания контента, предназначенного для прочтения пользователем. Такой класс текстов изучен в меньшей степени. В частности на сегодняшний день не выделены отличительные свойства, которые бы позволили определять их происхождение. В связи с этим задача исследования характеристик автоматически сгенерированных текстов, которые представляют собой информационный контент, является актуальной.

### Модель процесса формирования инвариантов классов текстов

В рамках решаемой задачи выделим 2 класса текстов: естественные и искусственные. Под первыми понимаются тексты, созданные человеком, под вторыми – созданные автоматически с помощью специального программного алгоритма. Для отнесения входного текста к одному из указанных классов необходимо сформировать соответствующие инварианты.

В классической задаче атрибуции – установлении авторства – инвариант, на основе которого идентифицируется автор, представляет собой набор значений характеристик текста определенного лица [7]. Для создания такого набора существует несколько подходов. В случае с идентификацией искусственных текстовых произведений инвариантом является набор значений характеристик текста, с помощью которых может быть установлена причастность данного генератора к происхождению входного текста [8].

Многими учеными предпринимались попытки смоделировать подход к формированию набора характеристик текста, составляющих инвариант. В ранних работах, посвященных обработке и классификации текстовых произведений, в основе выбора

характеристик лежал либо интуитивный подход, либо случайный перебор [9]. Исследователями в области обработки текста сформированы наборы характеристик, которые чаще всего используются для расчета инварианта. На использовании таких наборов основываются модели создания инвариантов текстов при решении задач классификации.

В работе А.С. Романова [10], посвященной определению авторства текстов, приводится методика, в которую включена модель процесса создания инвариантов. Процесс описан следующим образом: на вход подаются доступные признаки текста, которые пользователь формирует в некоторую группу признаков текстов, данная группа используется для формирования модели авторского стиля, то есть инварианта. Модель процесса основана на использовании известных наборов характеристик вне зависимости от особенностей решаемой прикладной задачи. При таком подходе значительно возрастает вычислительная сложность расчетов, так как количество всевозможных характеристик может составлять несколько тысяч, а также приводит к риску упущения каких-либо характеристик текста, которые отсутствуют в стандартных наборах, но в конкретном случае могут обладать различительной способностью. Особенность формирования инвариантов должна состоять в том, что наборы исследуемых

характеристик зависят, в первую очередь, от непосредственно решаемой задачи, а процесс формирования набора отталкивается от задачи классификации.

Автором была предложена модель процесса формирования инвариантов классов текстов (рис. 1), основанная на использовании качественных и уточняющих их количественных характеристик текста. Таким образом, при формировании набора исследователь основывается на лингвистических особенностях рассматриваемых классов текстов.

На вход модели подаются классы текстов и наборы текстов данных классов. На 1-м этапе с учетом лингвистических особенностей языка формируется перечень характерных для исследуемых классов качественных признаков. Ими могут выступать эмоциональная окраска, соответствие стилю и времени, связность текста и т.п. Далее пошагово происходит уточнение выделенных признаков до формирования набора количественных характеристик: уточняются текстовые свойства, которые определяют проявление выделенных качественных признаков. Затем для каждого свойства формируется набор текстовых характеристик, позволяющих оценить проявление этих свойств в тексте. На дальнейших шагах происходит проверка выделенных характеристик на различительную способность и взаимную зависимость.

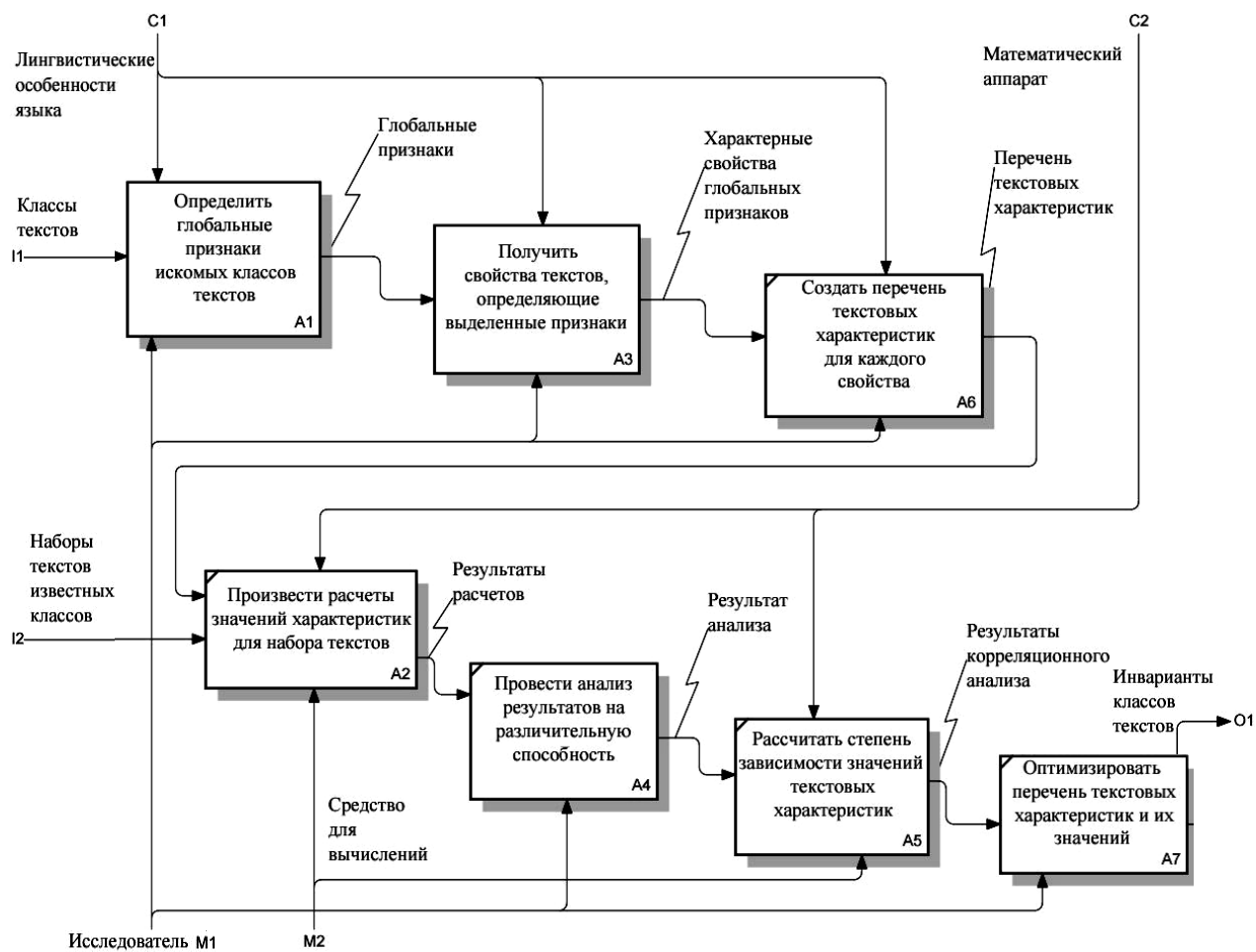


Рис. 1. Модель процесса формирования инвариантов классов текстов

### Формирование инварианта искусственных и естественных текстов

*Входные данные.* Для формирования инвариантов естественных и искусственных текстов были исследованы 3210 текстов и созданные на их основе автоматические сгенерированные экземпляры. Данные тексты представляли собой публицистические статьи информационного характера длиной от 1000 до 5700 символов. В качестве генератора был использован синонимизатор со словарем, содержащим синонимы к 700 000 словам. В общей сложности при оценке численных значений характеристик текстов двух классов были использованы 3210 естественных текстов общим объемом 10,7 млн символов и 3210 искусственных текстов (12,3 млн символов). Указанные объемы считаются достаточными для обучения в соответствии с опытом формирования инвариантов при анализе текстов различных авторов, приведенных в [11].

### Формирование перечня исследуемых характеристик текстов

Согласно предложенной модели на основе лингвистических особенностей языка были определены качественные (глобальные) характеристики, определяющие важнейшее различие между указанными классами текстов. Отличием естественных текстов от искусственных является их связность в рамках межфразовых единств, а также цельность, то есть наличие глобальной связи компонентов текста на содержательном уровне [12, 13]. Таким образом, связность и цельность являются неперенными лингвистическими признаками текста, которые проявляются в целесообразно построенном человеком тексте и отличают его от массово порожденных экземпляров.

Далее на основе работ по теории лингвистики [12] были определены свойства текста, обеспечивающие его связность и цельность:

- символьные (связанные с наличием символов и их сочетаний);
- лексические (связанные с наличием слов и словосочетаний);
- синтаксические (связанные с конструкциями предложений);
- семантические (связанные с оценкой мер семантического сходства и связанности);
- тематические (связанные с соответствием используемых средств тематике текста).

Также сформирован перечень количественных характеристик для каждого из свойств:

- средняя длина слов;
- среднее количество знаков пунктуации в предложении;
- частота 100 популярных биграмм букв;
- частота служебных слов;
- частота неопределенных местоимений;
- частота коротких слов (менее 4 символов);
- частота длинных слов (более 7 символов);
- количество уникальных слов;

- среднее число слов в предложении;
- количество грамматических ошибок;
- количество предложений в тексте;
- количество сложноподчиненных предложений;
- доля сложноподчиненных предложений;
- количество вопросительных предложений;
- количество восклицательных предложений;
- доля эмотизированных предложений;
- частота 100 популярных слов;
- частота 100 популярных 2-грамм слов;
- частота 100 популярных 3-грамм слов;
- количество слов в семантическом ядре;
- наличие единства тематики в разных частях текста;

- наличие единства жанра в разных частях текста.

### Анализ результатов на различительную способность характеристик текста

По предложенной модели на следующем шаге необходимо оценить различительную способность выделенных характеристик, прежде произведя расчеты значений для текстовых выборок. Условием различительной способности текстовой характеристики по [14] была выбрана мера, определяющая превосходство разности математических ожиданий для двух классов над суммой их среднеквадратических отклонений:

$$|M_1 - M_2| > \sigma_1 + \sigma_2,$$

где  $M_1$ ,  $M_2$  – математические ожидания величины значения текстовой характеристики для двух выборок текстов;  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  – среднеквадратические отклонения величины значения текстовой характеристики для двух выборок текстов (индексы совпадают).

В соответствии с проведенными вычислениями был сделан вывод, что для исследуемых классов текстов различительной способностью не обладают следующие характеристики, которые были удалены из набора:

- средняя длина слова;
- частота длинных слов;
- доля сложноподчиненных предложений;
- доля восклицательных и вопросительных предложений.

### Оценка корреляции значений

Оценка корреляции рассчитанных значений позволяет выделить закономерно изменяющиеся характеристики внутри одной выборки. Пары, имеющие сильную корреляционную зависимость, должны быть разбиты, одна из характеристик удалена из набора. Это позволит снизить вычислительные затраты для расчета значений и классификации, а также увеличить различительную способность инварианта в целом.

Оценка корреляции значений текстовых характеристик внутри каждой выборки осуществлялась с помощью метода Пирсона (метод квадратов):

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^k (d_{x_i} \cdot d_{y_i})}{\sqrt{\sum_{i=1}^k d_{x_i}^2 \cdot \sum_{i=1}^k d_{y_i}^2}},$$



где  $d_{xi}$ ,  $d_{yi}$  – отклонение  $i$ -го числового значения от среднего значения своего вариационного ряда;  $k$  – количество элементов вариационных рядов (количество текстов в наборе).

По итогам расчета коэффициента корреляции была обнаружена сильная корреляция ( $|r_{xy}| \geq 0,7$ ) у ряда пар характеристик. Из набора были исключены следующие из них:

- частота неопределенных местоимений;
- частота 100 популярных 3-грамм слов;
- количество коротких слов;
- количество восклицательных предложений.

#### Инварианты классов текстов

В результате были сформированы два инварианта: для естественных текстов, то есть созданных человеком, и для искусственных – созданных с помощью синонимизации. Инвариант  $a_i$  представляет собой вектор значений характеристик. Размерность таких векторов соответствует количеству отображенных характеристик текста:

$$a_i = (a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{im}),$$

где  $a_{ij}$  – усредненное информативное значение  $j$ -й текстовой характеристики  $i$ -го инварианта,  $i = 1 \dots n$ ,  $j = 1 \dots m$ ;  $n$  – количество инвариантов (соответствует количеству классов текстов);  $m$  – количество используемых характеристик текста в инварианте.

Характеристики текста, составившие инварианты текстов, разделенных на классы по своему происхождению:

- среднее количество знаков пунктуации в предложении;
- частота 100 популярных биграмм букв;
- частота служебных слов;
- количество уникальных слов;
- среднее число слов в предложении;
- количество грамматических ошибок;
- количество предложений;
- количество сложноподчиненных предложений;
- количество вопросительных предложений;
- частота 100 популярных слов;
- частота 100 популярных 2-грамм слов;
- количество слов в семантическом ядре;
- наличие единства тематики в разных частях текста.

Ниже приведены полученные векторы численных значений характеристик текста ( $a_1$  – инвариант класса естественных текстов;  $a_2$  – инвариант класса искусственных текстов, сгенерированных с помощью синонимизации):

$$a_1 = (31,742; 201,269; 34,691; 64,804; 9,113; 0,01; 109,812; 68,655; 1,414; 49,001; 9,1; 66,025; 1,7);$$

$$a_2 = (29,035; 112,562; 25,702; 101,659; 9,987; 6,215; 100,2; 62,082; 1,358; 32,882; 3,554; 95,645; 0,6).$$

Таким образом, с помощью предложенной модели был получен набор характеристик текстов, обладающих различительной способностью в решении задачи идентификации происхождения текста, а именно – определения, написан ли текст человеком

или создан автоматически с помощью программного генератора. На основе проведенных расчетов средних были сформированы инварианты исследуемых классов текстов.

#### Заключение

Предложенная модель процесса формирования инвариантов классов текстов была применена для создания инвариантов естественных и искусственных текстов. Данная модель основывается на классических вариантах представления этого процесса, однако в выборе характеристик текста предлагается основываться на лингвистических особенностях текста, что позволяет поэтапно сформировать перечень количественных характеристик. Такой подход в моделировании процесса позволяет снизить вычислительные затраты на проведение расчетов, а также выделить все необходимые характеристики, в том числе если их нет в стандартных наборах.

Задачи, связанные с атрибуцией текста, носят междисциплинарный характер, поэтому исследования в области лингвистики при создании набора характеристик для инварианта являются основополагающими. Учитывая данный факт, можно заключить, что предложенная модель универсальна и может быть использована в решении любой задачи, связанной с классификацией текстовых произведений.

#### Литература

1. SEO-копирайтинг: как приручить поисковик [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://onedesign.pro/upload/books/11\\_Kak\\_priruchit.pdf](http://onedesign.pro/upload/books/11_Kak_priruchit.pdf), свободный (дата обращения: 06.08.2016).
2. Управление ООН по наркотикам и преступности. Использование Интернета в террористических целях [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.unodc.org/documents/terrorism/Publications/Use\\_of\\_Internet\\_for\\_Terrorist\\_Purposes/Use\\_of\\_the\\_internet\\_for\\_terrorist\\_purposes\\_Russian.pdf](https://www.unodc.org/documents/terrorism/Publications/Use_of_Internet_for_Terrorist_Purposes/Use_of_the_internet_for_terrorist_purposes_Russian.pdf), свободный (дата обращения: 24.08.2016).
3. Павлов А.С. Методы обнаружения поискового спама, порожденного с помощью цепей Маркова / А.С. Павлов, Б.В. Добров // Тр. XI Всерос. науч. конф. «Электронные библиотеки: перспективные методы и технологии, электронные коллекции». – Петрозаводск: Изд-во Карельского научного центра РАН, 2009. – Т. 1. – С. 311–317.
4. Поиск неестественных текстов / Е.А. Гречников, Г.Г. Гусев, А.А. Кустарев, А.М. Райгородский // Труды XI Всерос. конф. «Цифровые библиотеки: продвинутые методы и технологии, цифровые коллекции» – RCDL'2009, Петрозаводск. – Петрозаводск: Изд-во Карельского научного центра РАН, 2009. – С. 306–308.
5. A reference collection for web spam / C. Castillo, D. Donato, L. Becchetti, P. Boldi, S. Leonardi, M. Santini, S. Vigna // ACM Sigir Forum 2006. – 2006. – Vol. 40, Issue 2. – P. 11–24.
6. Романов А.С. Обобщенная методика идентификации автора неизвестного текста / А.С. Романов, А.А. Шелупанов, С.С. Бондарчук // Доклады ТУСУРа. – 2010. – № 1(21), ч. 1. – С. 108–112.
7. Зайцева А.А. Метод оценки качества текстов в задачах аналитического мониторинга информационных ресурсов / А.А. Зайцева, С.В. Кулешов, С.Н. Михайлов // Труды СПИИРАН. – 2014. – Вып. 37. – С. 144–155.

8. Шумская А.О. Выбор параметров для идентификации искусственно созданных текстов // Доклады ТУСУРа. – 2013. – № 2(28). – С. 126–128.

9. Батура Т.В. Формальные методы определения авторства текстов // Вестник НГУ. Сер.: Информационные технологии. – 2012. – Т. 10, вып. 4. – С. 81–94.

10. Романов А.С. Разработка и исследование математических моделей, методик и программных средств информационных процессов при идентификации автора текста / А.С. Романов, А.А. Шелупанов, Р.В. Мешеряков. – Томск: В-Спектр, 2011. – 188 с.

11. Романов А.С. Методика идентификации автора текста на основе аппарата опорных векторов // Доклады Том. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники. – 2009. – № 1(19), ч. 2. – С. 36–42.

12. Валгина Н.С. Теория текста. – М.: Логос, 2003. – 191 с.

13. Николина Н.А. Филологический анализ текста: учеб. пособие. – М.: Изд. центр «Академия», 2003. – 256 с.

14. Загоруйко Н.Г. Прикладные методы анализа данных и знаний. – Новосибирск: ИМ СО РАН, 1999. – 270 с.

**Исхакова Анастасия Олеговна**

Аспирантка каф. комплексной информационной безопасности электронно-вычислительных систем ТУСУРа

Тел.: +7-913-814-28-24

Эл. почта: shumskaya.ao@gmail.com

Iskhakova A.O.

#### **Model to set up the texts class invariants**

The paper proposes a model to form the texts class invariants based on the use of qualitative and quantitative characteristics. The setting up the characteristics list is based on the texts linguistic features. The model was used on the example of the generating invariants for two classes: original and artificial texts. The result is a list of features, distinguished in the classification of such texts, as well as the invariants of these classes. The presented data can be used to identify automatically generated texts based on taught neural network or to evaluate statistical text characteristics.

**Keywords:** text, texts class invariant, text characteristic, model, artificial text, original text.

УДК 621.396.41

С.С. Харченко

**Модель образования псевдоголоса в процессе фонации пищеводной речи**

Рассматривается разработанная математическая модель образования псевдоголоса в процессе формирования пищеводной речи у пациентов, потерявших гортань вследствие болезни. Разработанная модель учитывает биомеханические свойства мышечных тканей, участвующих в голосообразовании.

**Ключевые слова:** модель масс, псевдоголос, пищеводная речь, пищевод, рак гортани.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2016-19-3-81-84

Одним из наиболее распространённых онкологических заболеваний в Российской Федерации является рак гортани. На сегодняшнем этапе развития науки и техники абсолютно оправданными представляются стремления ученых совокупно находить решение проблемы качества жизни пациентов, перенесших онкологические заболевания области рта и ротоглотки, которое не в последнюю очередь зависит от качества реабилитационных мероприятий по выработке псевдоголоса. Ввиду этого вопросы изучения образования пищеводной речи и псевдоголоса являются достаточно актуальными на сегодняшний день [1]. Анализ литературы по тематике данной работы не выявил моделей, описывающих образование псевдоголоса, учитывающих все особенности голосообразования. Как правило, в случае необходимости синтеза пищеводной речи на этапе генерации псевдоголоса используют классические для обычной речи модели масс, заменяя или подбирая параметры модели.

**Механизм голосообразования пищеводной речи**

Механизм голосообразования пищеводной речи возможен за счет сокращения псевдоголосовой щели, образованной в первом пищеводном сужении на уровне пятого цервикального позвонка ( $C_5$ ) и глоточных мышц. На рентгеновских снимках пациентов, у которых наблюдалось устойчивое владение псевдоголосом (рис. 1), во время произношения тренировочных фраз на этапе голосовой реабилитации хорошо видна псевдоголосовая щель на уровне пятого–шестого цервикальных позвонков ( $C_5$ – $vi$ ) [2]. Изучение снимков показало, что длина псевдоголосовой щели изменяется в пределах от 2,5 до 3,5 см. Также на рентгеновских снимках и снимках магнитно-резонансной томографии можно наблюдать, что в процессе голосообразования участвуют первое физиологическое сужение пищевода, наружные мышцы гортани, гипофаринкс – дополнительный объем в глотке, глоточные мышцы. Известно, что в процессе фонации также участвуют возвратные нервы центральной нервной системы (ЦНС), причем ЦНС играет ведущую роль. Псевдоголосовая щель представляет собой складки слизистой оболочки верхнего пищевода и крикофарингеального сфинктера.

Традиционно считается, что для фонации пищеводной речью необходимо выполнение двух условий:

- наличие потока воздуха из воздушного пузыря в верхнем пищеводе;

- озвучивание воздушного потока посредством псевдоголосовой щели.



Рис. 1. Рентгенограмма больного во время фонации пищеводным голосом

Однако стоит отметить, что у пациентов, успешно прошедших голосовую реабилитацию, хорошо заметны мышечные сокращения глоточных мышц при генерации голоса, осуществляемые в области мышц верхнего сужения пищевода. В связи с чем процесс образования псевдоголоса может рассматриваться как процесс взаимодействия мышц глотки с мышцами и крикофарингеального сфинктера.

Анализ рентгенограмм больных, овладевших пищеводным голосом, во время фонации, а также изучение литературных источников позволяет свести акустическую схему фонации к совокупности взаимодействующих объемов и отрезков труб постоянного или переменного сечения [3–6].

Таким образом, акустическая схема голосообразования у пациентов с удаленной гортанью (рис. 2) представляется как совокупность следующих элементов:

- пищевод;
- сформированный в объеме пищевода воздушный пузырь, создающий избыточное давление;
- образованная в физиологическом пищеводном сужении псевдоголосовая щель;
- глоточные мышцы и внешние мышцы гортани;
- речеобразующий тракт.

В предложенной акустической схеме образования пищеводной речи приняты следующие условные обозначения:  $V_{\Pi}$  – объем пищевода,  $V_{ВП}$  – объем воздушного пузыря в верхнем пищеводе,  $h_{\text{птщ}}$  –

высота псевдоголосовой щели,  $h_{гд}$  – высота глоточных мышц, участвующих в голосообразовании,  $h_{рот}$  – высота излучателя речеобразующего тракта,  $l_{рот}$  – длина речеобразующего тракта.

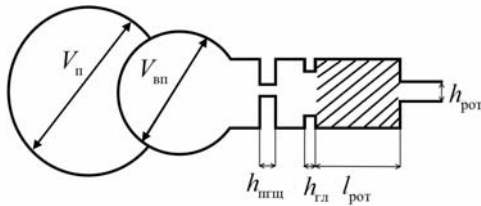


Рис. 2. Акустическая схема образования речи у пациентов после удаления гортани

### Механические особенности мышечных тканей

Пищеводная ткань целиком и полностью состоит из гладких мышц, следовательно, модели описывающие сокращения гладких мышц [23] при их адекватности, в полной мере могут описать механические свойства псевдоголосовой щели. Глотка же в отличие от пищевода сужения образована из поперечнополосатых мышц, и при описании процессов голосообразования у больных после удаления гортани в зоне гортани следует использовать соответствующие модели. Поперечнополосатые мышцы более возбудимы, чем гладкие: их пороги раздражения ниже, а хронаксия короче. Потенциалы действия волокон поперечнополосатых мышц имеют большую амплитуду, около 120 мВ по сравнению с 60 мВ у волокон гладких мышц. Продолжительность сокращений у поперечнополосатых мышц не достигает 0,5 с, а у гладких варьируется в пределах 1–3 с.

Для описания механических свойств гладких мышц, как правило, используется модель Максвелла, в которой мышечные волокна представляются последовательным соединением пружины и демпфера (рис. 3, а).

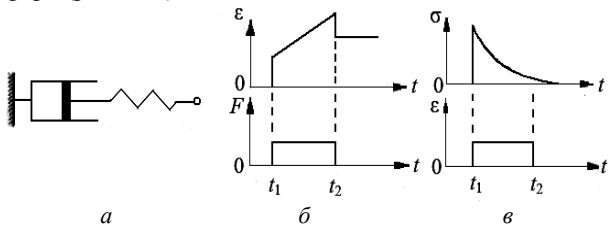


Рис. 3. Модель Максвелла

В режиме постоянного тонуса мышц (см. рис. 3, б) упругий элемент моментально растягивается (момент времени  $t_1$ ) до значения, определяемого законом Гука, а плунжер демпфера движется с постоянной скоростью до того момента, пока не перестанет действовать внешняя сила. В момент времени  $t_2$  после снятия нагрузки – пружина моментально сокращается, а положение плунжера остается прежним. В режиме постоянной длины мышечного волокна (рис. 3, в) упругий элемент после растяжения начнет сокращаться, возвращая плунжер в исходное начальное положение. В любой момент времени для относительного удлинения выполняется условие

$$\varepsilon_{\text{общ}} = \varepsilon_{\text{упр}} + \varepsilon_{\text{вяз}}. \quad (1)$$

Таким образом, скорость изменения относительного удлинения в любой момент времени определяется следующим соотношением:

$$\frac{d\varepsilon_{\text{общ}}}{dt} = \frac{d\varepsilon_{\text{упр}}}{dt} + \frac{d\varepsilon_{\text{вяз}}}{dt}. \quad (2)$$

Моделью упругого тела является пружина, подчиняющаяся закону Гука:

$$\sigma = E\varepsilon, \quad (3)$$

где  $\sigma$  – напряжённость ткани;  $E$  – модуль Юнга ткани;  $\varepsilon$  – относительное удлинение (деформация).

В качестве модели вязкого элемента рассматривается плунжер с отверстиями,двигающийся в демпфере с вязкой жидкостью. Связь между скоростью перемещения плунжера в демпфере и напряжением представляется следующим соотношением:

$$\sigma = \eta^* \left( \frac{d\varepsilon}{dt} \right), \quad \sigma = \frac{F}{S}, \quad (4)$$

где  $\eta$  – коэффициент вязкости жидкой среды;  $S$  – площадь демпфера.

Используя формулы (4) для вязкого элемента и формулу (3) для упругого элемента в (2) получаем выражение для скорости общей деформации гладкой мышцы:

$$\frac{d\varepsilon_{\text{общ}}}{dt} = \frac{1}{E} \frac{d\sigma}{dt} + \frac{\sigma}{\eta}. \quad (5)$$

Для описания механических свойств поперечнополосатых мышц используется модель Кельвина–Фогта – параллельное соединение упругого и вязкого элементов (рис. 4, а).  $t_1$

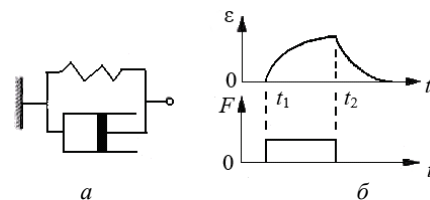


Рис. 4. Модель Кельвина–Фогта

При постоянно действующей силе деформация экспоненциально возрастает со временем. После снятия нагрузки деформация экспоненциально убывает, и система возвращается в исходное состояние ( $\varepsilon = 0$ ) (рис. 4, б).

При воздействии внешней силы общее напряжение равно сумме напряжений на каждом элементе:

$$\sigma_{\text{общ}} = \sigma_{\text{упр}} + \sigma_{\text{вяз}}. \quad (6)$$

Подставляя выражения для каждого элемента, получаем следующее выражение:

$$\sigma_{\text{общ}} = E\varepsilon + \eta \frac{d\varepsilon}{dt}. \quad (7)$$

Переходя к скорости общей деформации получаем

$$\frac{d\varepsilon_{\text{общ}}}{dt} = \frac{\sigma - E\varepsilon}{\eta}. \quad (8)$$

Согласно справочным материалам модуль Юнга для поперечнополосатой мышцы составляет  $9 \times 10^5$  Па.

**Механическая модель пищеводного голоса**

Свободные колебания любого осциллятора затухают и прекращаются с течением времени. Поэтому, как правило, для их описания рассматривают затухающие колебания. Амплитуда колебаний осциллятора представляется убывающей функцией. Как правило, затухания происходят под действием сил сопротивления среды, в случае рассмотренных выше моделей, силы сопротивления пружины и демпфера. Силы сопротивления выражаются линейной зависимостью от скорости колебаний или квадрата скорости. В результате затухания колебаний уровень сигнала снижается до полной его неслышимости, если речь идет об акустике.

Рассмотрим модели Максвелла и Кельвина–Фогта с точки зрения классической механики. Модель Кельвина–Фогта – пусть имеется система, состоящая из упругого элемента – пружины (подчиняющейся закону Гука) и вязкого элемента – демпфера, один конец которой закреплен, а к другому концу прикреплено тело массой  $m$  (эмулирующая массу псевдоголосовой щели). Тогда свободные колебания совершаются в среде, где сила сопротивления пропорциональна скорости с коэффициентом  $c$  (в нашем случае это характеристика демпфера) (см. рис. 4, а).

Тогда второй закон Ньютона для рассматриваемой системы запишется как

$$m\vec{a} = \vec{F}_c + \vec{F}_{упр}, \tag{9}$$

где  $\vec{F}_c$  – сила сопротивления;  $\vec{F}_{упр}$  – сила упругости, причем

$$F_c = -cv, \tag{10}$$

$$F_{упр} = -kx, \tag{10 а}$$

$$v = \frac{dx}{dt}, \quad a = \frac{d^2x}{dt^2},$$

тогда  $ma = -cv - kx$ , или

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{c}{m} \frac{dx}{dt} + \frac{k}{m} x = 0, \tag{11}$$

где  $k$  – коэффициент упругости (коэффициент жесткости пружины);  $c$  – коэффициент определяющий соотношение между силой сопротивления среды вязкого элемента и скоростью движения массы.

Для удобства  $\frac{c}{m}$  обозначим как  $\delta$  (определяет затухание колебаний), а  $\sqrt{\frac{k}{m}}$  как  $\omega_0$  (собственная круговая частота колебаний внешних глоточных мышц, которые, как было отмечено выше учувствуют в процессе образования псевдоголоса). Значение коэффициента  $k$  составляет примерно 25 Н/м. Таким образом, движение внешних глоточных мышц описывается формулой движения механического осциллятора (параллельное соединение пружины и демпфера):

$$F(t) = \frac{d^2x}{dt^2} + \delta \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x. \tag{11 а}$$

*Модель Максвелла.* В случае рассмотрения модели Максвелла мы имеем такую же систему, как в модели Кельвина–Фогта, за одним лишь исключением, что упругий элемент (пружина) и вязкий элемент (демпер) соединены не параллельно, а последовательно (см. рис. 3, а). В случае последовательного соединения пружины и демпфера, образующих модель Максвелла, связь между входным кинематическим воздействием и выходной реакцией описывается дифференциальным уравнением движения

$$F(t) = \frac{d^2x}{dt^2} + \frac{k}{c} \frac{dx}{dt} + \frac{k}{m} x. \tag{12}$$

Учитывая, что  $\delta = \frac{c}{m}$  и  $\omega_0 = \sqrt{k/m}$ , получаем

окончательное выражение, описывающее сокращения псевдоголосового сужения в виде формулы движения механического осциллятора для последовательно соединённых элементов:

$$F(t) = \frac{d^2x}{dt^2} + \frac{\omega_0^2}{\delta} \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x. \tag{13}$$

Таким образом рассматривая акустическую схему голосообразования пищеводной речи (см. рис. 2) и учитывая биомеханические свойства мышечных тканей, участвующих в голосообразовании, можем перейти к масс-модели образования псевдоголоса (рис. 5).

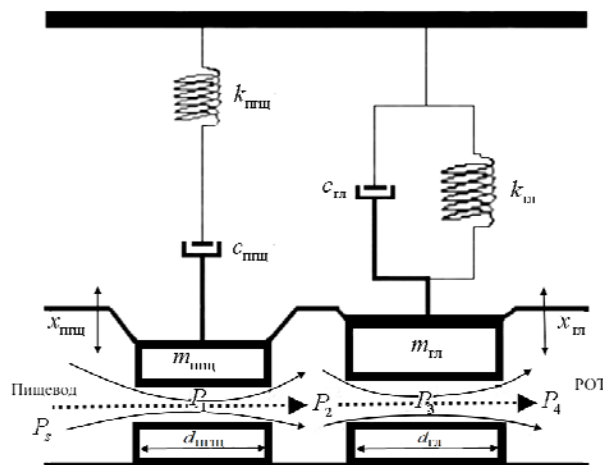


Рис. 5. Модель образования псевдоголоса

В модели приняты следующие ранее не встречающиеся обозначения  $P_3$  – давление в воздушном пузыре пищевода;  $P_2$  – давление после пищеводного сужения;  $A_1$  – медиальная поверхность пищеводного сужения;  $A_2$  – медиальная поверхность глоточных мышц.

$$\begin{cases} F_1(t) = \frac{d^2x_{пгщ}}{dt^2} + \frac{\omega_0^2_{пгщ}}{\delta_{пгщ}} \frac{dx_{пгщ}}{dt} + \omega_0^2_{пгщ} x_{пгщ} = P_3 A_1, \\ F_2(t) = \frac{d^2x_{гл}}{dt^2} + \delta_{гл} \frac{dx_{гл}}{dt} + \omega_0^2_{гл} x_{гл} = P_2 A_2. \end{cases} \tag{14}$$

**Заключение**

Предложенная математическая модель позволяет в дальнейшем изучить процессы образования псевдоголосо во время фонации пищеводной речи. Модель отличается от ранее известных моделей тем, что учитываются биомеханические особенности мышечной ткани пищевода, а также участие глоточных мышц в процессе фонации.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 16-15-00038).

*Литература*

1. Программный комплекс речевой реабилитации онкологических больных после резекции гортани / С.С. Харченко, Р.В. Мещеряков, Д.А. Вольф и др. // Медицинская техника. – 2016. – № 2. – С. 51–55.

2. Балацкая Л.Н. Речевая реабилитация и качество жизни после хирургического лечения больных раком гортани // Сибирский онкологический журнал. – 2003. – № 2. – С. 54–57.

3. Чойнзонов Е.Л. Реабилитация больных опухолями головы и шеи / Е.Л. Чойнзонов, Л.Н. Балацкая, З.Д. Кицманюк и др. – Томск: Изд-во НТЛ, 2003. – 296 с.

4. Бондаренко В.П. Медико-технический комплекс для исследования речевого сигнала при нарушениях голосообразования / В.П. Бондаренко, Е.Ц. Чойнзонов, Л.Н. Балацкая и др. // Медицинская техника. – 2007. – № 4. – С. 11–13.

5. Коренбаум В.И. Акустические эффекты в системе дыхания человека при форсированном вдохе / В.И. Коренбаум, Ю.В. Кулаков, А.А. Тагильцев // Акустический журнал. – 1997. – Т. 43, № 1. – С. 78–86.

6. Ремизов А.Н. Медицинская и биологическая физика. – М.: Наука, 2004. – С. 87–112.

7. Златоустова Л.В. Общая и прикладная фонетика: учеб. пособие / Л.В. Златоустова, Р.К. Потапова, В.В. Потапов, В.Н. Трунин-Донской. – М.: Изд-во МГУ, 1997. – 416 с.

8. Бондаренко В.П. Программные средства комплекса исследования речевого сигнала при злокачественных заболеваниях гортани / В.П. Бондаренко, Е.Л. Чойнзонов, Л.Н. Балацкая и др. // Медицинская техника. – 2009. – № 4. – С. 33–38.

**Харченко Сергей Сергеевич**

Мл. науч. сотрудник каф. комплексной информационной безопасности электронно-вычислительных систем ТУСУРа  
Тел.: +7-983-233-66-44  
Эл. почта: ss.kharchenko@gmail.com

Kharchenko S.S.

**Model of esophageal voice in the process of phonation for esophageal speech**

This article describes the development of mathematical model for esophageal voice generation in case when the patients have lost their larynx after disease. The developed model considers biomechanical properties of the muscle tissues involved in the phonation.

**Keywords:** mass model, esophageal voice, esophageal speech, esophagus, larynx cancer.

УДК 004.932

Д.Н. Ушарова

## Метод сопровождения объектов группой видеокамер с автоматической коррекцией значений матрицы проективного преобразования

Приводится описание метода сопровождения объектов группой неоткалиброванных видеокамер, позволяющего сопоставлять представления одного и того же объекта на изображениях разных камер в условиях частичных перекрытий. Метод выполняет автоматическую калибровку системы видеонаблюдения по четырем точкам с известными координатами и объекту, перемещающемуся из поля зрения одной камеры в поле зрения другой. Метод основан на коррекции значений матрицы проективного преобразования, которое вычисляется в момент нахождения объекта в пересечении полей зрения двух камер. Приведены результаты моделирования разработанного метода и получены зависимости расстояния между фактическим и прогнозируемым положением точки от площади пересечения полей зрения видеокамер.

**Ключевые слова:** трекинг, сопровождение объектов, видеонаблюдение, калибровка видеокамер, проективное преобразование.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2016-19-3-85-89

Одной из центральных задач обработки видеoinформации является обнаружение движущегося объекта, оценка его траектории и сопоставление всех представлений одного и того же объекта с разных видеокамер. Методы сопровождения нескольких объектов несколькими видеокамерами редко рассматриваются как целостная система, большинство современных методов не используют никакой дополнительной информации от остальных видеокамер и основаны на алгоритмах сопровождения объектов одной видеокамерой. В алгоритмах сопровождения объектов одной видеокамерой задача сопровождения сводится к решению проблемы поиска соответствия объектов от одного кадра к другому. В алгоритмах сопровождения объектов несколькими видеокамерами основной задачей является решение проблемы соответствия между траекториями объектов, видимых с разных видеокамер в один момент времени.

Подходы к сопровождению объектов несколькими видеокамерами можно разделить на три основные категории: сопоставление особенностей объектов, использование информации о наблюдаемой сцене и восстановление геометрических преобразований между камерами. К первой категории относится подход, описанный в работе [1], где используют сопоставление цвета объектов. Вторая категория методов требует наличия информации о наблюдаемой сцене и точной калибровки всех камер системы [2–4]. Поиск всех представлений объекта вычисляется путем проецирования местоположения каждого объекта в мировой системе координат на карту наблюдаемой сцены. Этот подход используется в [5]. Такой метод подходит для управляемых условий, например футбольные стадионы, для которых система видеосопровождения разрабатывается специально, специально калибруются камеры и составляются точные карты наблюдаемой сцены. К третьей категории относится подход, описанный в [6], где перебирают все траектории со всех камер, сопостав-

ляют друг с другом, для каждой пары вычисляют матрицу гомографии и выполняют статистическим методом уточнение значений матрицы гомографии. С точки зрения вычислительной сложности этот метод является чрезвычайно затратным, но за большое количество итераций позволяет вычислить правильное положение объекта.

Большую популярность приобретают гибридные методы, основанные на использовании одновременно двух подходов [7]. Как правило, они включают в себя либо предварительную калибровку видеокамер, либо автоматическую в процессе сопровождения объектов, например калибровка по одному перемещающемуся по сцене объекту [8].

### Постановка задачи

Недостатками вышеизложенных подходов являются: высокие требования к месту и способу установки камер, высокие требования к качеству получаемого изображения, большая вычислительная сложность, а также активное вовлечение оператора в процесс работы системы сопровождения. Целью данной работы является снижение требований к внутренним параметрам видеокамер, минимизация участия оператора и повышение быстродействия в системах видеослежения до уровня, пригодного к практическому применению.

Одной из самых требовательных к участию оператора и быстродействию процедур в задачах видеослежения является калибровка видеокамер. Обычно требуется для каждой видеокамеры указать набор точек сцены, их координаты, а также соответствующие им точки на изображениях камер. В данной работе представлен алгоритм сопровождения объектов, реализующий метод калибровки всей системы видеокамер по четырем точкам из области пересечения полей зрения двух любых из них, координаты которых задает оператор. Для всех остальных камер системы калибровка выполняется автоматически. Обязательным условием для автоматической калибровки камер является наличие пересечений



полей зрения с уже откалиброванными камерами. В случаях, когда система видеонаблюдения представляет собой группы камер, не имеющих пересечения полей зрения с другими камерами, калибровку с участием оператора необходимо выполнять для каждой группы. В таком случае задача сопоставления представления одного и того же объекта в видеокameraх из разных групп должна решаться другими методами (например, учитывать время перехода между группами, наиболее вероятный маршрут движения, характеристики объекта и т.п.).

Для сопровождения объектов группой видеокamera должен быть предварительно реализован детектор объектов одной камерой (любым методом). Все ошибки детектора объектов отразятся на работе алгоритма многокамерного сопровождения объектов, но в процессе работы алгоритма влияние этих ошибок сведется к минимуму за счет использования дополнительной информации из других камер (например, если в одной камере наблюдается перекрытие сопровождаемого объекта, он может быть виден в других камерах).

#### Описание предлагаемого метода калибровки

Предположим, что система состоит из множества  $C = \{C_1, C_2, \dots, C_n\}$  из  $n$  камер, где каждая камера  $C_i$  имеет пересечение полей зрения хотя бы с одной камерой  $C_j$ . Для предварительной калибровки группы видеокamera предлагается использовать 4 контрольные точки с известными координатами, расположенные по сторонам прямоугольника, который находится на плоскости земли в пересечении полей зрения двух видеокamera, как изображено на рис. 1.

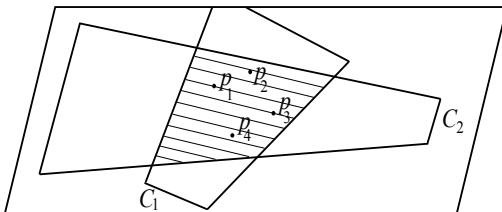


Рис. 1. Выбор контрольных точек для калибровки камер

Камеры с пересекающимися полями зрения выбираются произвольным образом, однако если прямоугольник, образуемый контрольными точками, будет занимать не менее 25% площади их изображений и располагаться ближе к центру изображений, процедура предварительной калибровки выполняется значительно точнее и быстрее. В результате ручной калибровки имеется три набора четырех точек с известными координатами:

$$P = \{P_1, P_2, P_3, P_4\},$$

$$P^1 = \{P_1^1, P_2^1, P_3^1, P_4^1\},$$

$$P^2 = \{P_1^2, P_2^2, P_3^2, P_4^2\}.$$

По ним можно найти матрицы гомографии  $H_{gsc}^1$  – из координат камеры  $C_1$  в систему мировых

координат и  $H_{gsc}^2$  – из координат камеры  $C_2$  в систему мировых координат.

Для этого для каждой пары соответствующих точек составляется система уравнений:

$$(u_{pk}, v_{pk}, 1)^T = H(x_{pk}, y_{pk}, 1)^T,$$

где  $u_{pk}, v_{pk}$  – координаты по оси  $x$  и  $y$  точки  $p_k$  в системе координат камеры;  $x_{pk}, y_{pk}$  – координаты по оси  $x$  и  $y$  точки  $p_k$  в системе мировых координат;  $k = 1, 2, 3, 4$ .

Так как известна матрица гомографии  $H_{gsc}^2$  из координат камеры  $C_2$  в систему мировых координат, выбрав из пересечения полей зрения камер  $C_2$  и  $C_3$  четыре точки (где каждые 3 из которых не лежат на одной прямой), можно вычислить матрицы гомографии  $H_{gsc}^2$  и  $H_{gsc}^3$ . Выполняя аналогичную процедуру, можно построить матрицы гомографии для всех камер, имеющих пересечение полей зрения, как показано на рис. 2.

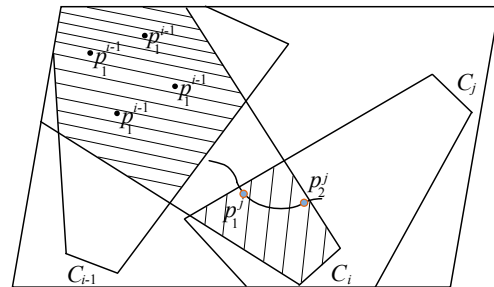


Рис. 2. Выбор точек в области пересечения полей зрения

Для того чтобы найти точки, по которым будет происходить автоматическая калибровка камер, необходимо определить границы пересечений полей зрения камер. Для вычисления пересечений полей зрения один человек свободно перемещается по сцене. Допустим, матрица гомографии  $H_{gsc}^i$  известна, камеры  $C_i$  и  $C_j$  имеют пересечение полей зрения, объект находится в поле зрения камеры  $C_i$ . Ниже представлен алгоритм поиска опорных точек для вычисления матрицы гомографии  $H_{gsc}^j$ .

*Шаг 1.* Как только объект вошел в зону пересечения полей зрения, детектор движения камеры  $C_j$  сообщает координаты его местонахождения в системе координат камеры  $C_j$ :

$$p_1^j = (u_{p1}^j, v_{p1}^j).$$

По известной матрице гомографии  $H_{gsc}^i$  и известным координатам точки  $p_1^i = (u_{p1}^i, v_{p1}^i)$  вычисляются координаты точки  $p_1$  в мировой системе координат.

Как только объект покидает зону пересечения полей зрения, детектор движения камеры  $C_i$  сообщает координаты его местоположения в системе координат камеры  $C_i$ :

$$p_2^i = (u_{p2}^i, v_{p2}^i).$$



По известной матрице гомографии  $\mathbf{H}_{gsc}^i$  и известным координатам точки  $p_2^i = (u_{p2}^i, v_{p2}^i)$  вычисляются координаты точки  $p_2$  в мировой системе координат.

*Шаг 2.* Подождать до тех пор, пока объект войдет в зону пересечения полей зрения второй раз. Аналогичным образом вычислить координаты точек  $p_3$  и  $p_4$ .

*Шаг 3.* Проверить, выполняется ли условие, что любые три точки из  $p_1, p_2, p_3, p_4$  не лежат на одной прямой (с помощью уравнения прямой, проходящей через две точки). Если условие выполняется, перейти на Шаг 4, иначе повторить Шаг 2.

*Шаг 4.* Вычислить матрицы гомографии  $\mathbf{H}_{gsc}^j$  и  $\mathbf{H}_j^i$  по точкам  $p_1, p_2, p_3, p_4$ .

**Уточнение проективного преобразования**

После того как процедура калибровки выполнена, координаты сопровождаемого одной камерой объекта вычисляются по известной матрице гомографии и сохраняются в карте перемещений.

Как только объект попадает в область пересечения полей зрения двух камер, необходимо вычислить точки  $m_i$  и  $m_j$  в общих мировых координатах, соответствующие положению объекта на изображениях камер  $C_i$  и  $C_j$ . В общем случае  $m_i \neq m_j$  (из-за погрешностей определения местоположения объекта детектором движения и погрешностей вычисления матриц гомографии).

До тех пор, пока не накопится 5 пар точек  $m$ , для уточнения значений элементов матрицы гомографии используется пять точек  $m, q_1, q_2, q_3, q_4$ . Чтобы вычислить проективное преобразование по пяти точкам, преобразуем СЛАУ к стандартной форме записи:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \sum x_i^2 & \sum x_i y_i & \sum u_i & 0 & 0 & 0 & -\sum u_i^2 x_i & -\sum u_i v_i x_i \\ \sum x_i y_i & \sum y_i^2 & \sum v_i & 0 & 0 & 0 & -\sum u_i v_i x_i & -\sum v_i^2 x_i \\ \sum x_i & \sum y_i & m & 0 & 0 & 0 & -\sum u_i x_i & -\sum v_i x_i \\ 0 & 0 & 0 & \sum u_i^2 & \sum u_i v_i & \sum u_i & -\sum u_i^2 y_i & -\sum u_i v_i y_i \\ 0 & 0 & 0 & \sum u_i v_i & \sum v_i^2 & \sum v_i & -\sum u_i v_i y_i & -\sum v_i^2 y_i \\ 0 & 0 & 0 & \sum u_i & \sum v_i & m & -\sum u_i y_i & -\sum v_i y_i \\ -\sum x_i^2 x'_i & -\sum x_i y_i x'_i & -\sum u_i x_i & -\sum u_i^2 y_i & -\sum u_i v_i y_i & -\sum u_i y_i & -\sum (x_i^2 + y_i^2) u_i^2 & -\sum (x_i^2 + y_i^2) u_i v_i \\ -\sum x_i y_i x'_i & -\sum y_i^2 x'_i & -\sum v_i x_i & -\sum u_i v_i y_i & -\sum v_i^2 y_i & -\sum v_i y_i & -\sum (x_i^2 + y_i^2) u_i v_i & -\sum (x_i^2 + y_i^2) v_i^2 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \sum u_i x_i \\ \sum v_i x_i \\ \sum x_i \\ \sum u_i y_i \\ \sum v_i y_i \\ \sum y_i \\ -\sum (x_i^2 + y_i^2) u_i^2 \\ -\sum (x_i^2 + y_i^2) v_i^2 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{G}_H = \mathbf{B}, \tag{1}$$

где  $\mathbf{A}$  – основная матрица системы;  $\mathbf{G}_H = (h_{11}, h_{12}, h_{13}, h_{21}, h_{22}, h_{23}, h_{31}, h_{32})^T$  – неизвестные элементы матрицы гомографии;  $\mathbf{B} = (u_1, u_2, u_3, u_4, v_1, v_2, v_3, v_4)^T$  – вектор-столбец координат ключевых точек на первом изображении.

Основная матрица системы имеет следующий вид:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & -u_1 x_1 & -u_1 y_1 \\ x_2 & y_2 & 1 & 0 & 0 & 0 & -u_2 x_2 & -u_2 y_2 \\ x_3 & y_3 & 1 & 0 & 0 & 0 & -u_3 x_3 & -u_3 y_3 \\ x_4 & y_4 & 1 & 0 & 0 & 0 & -u_4 x_4 & -u_4 y_4 \\ 0 & 0 & 0 & x_1 & y_1 & 1 & -v_1 x_1 & -v_1 y_1 \\ 0 & 0 & 0 & x_2 & y_2 & 1 & -v_2 x_2 & -v_2 y_2 \\ 0 & 0 & 0 & x_3 & y_3 & 1 & -v_3 x_3 & -v_3 y_3 \\ 0 & 0 & 0 & x_4 & y_4 & 1 & -v_4 x_4 & -v_4 y_4 \end{bmatrix}.$$

Перейдем к нормальной СЛАУ с помощью умножения слева обеих частей выражения (1) на матрицу  $\mathbf{A}^T$ :

$$(\mathbf{A}^T \cdot \mathbf{A}) \cdot \mathbf{G}_H = \mathbf{A}^T \cdot \mathbf{B}.$$

Для решения СЛАУ по 5 точкам добавим условие: преобразование  $\mathbf{H}$  минимизирует евклидово расстояние между точкой  $\mathbf{H} \cdot \mathbf{x}$  и соответствующей ей точкой  $\mathbf{u}$ :

$$\frac{\partial F(\mathbf{G}_H)}{\partial \mathbf{G}_H} = 0,$$

где

$$\begin{aligned} \partial F(\mathbf{G}_H) = \sum_{i=1}^k & \left( (u_i - (x_i h_{11} + y_i h_{12} + h_{13} - u_i x_i h_{31} - u_i y_i h_{32}))^2 + \right. \\ & \left. + (v_i - (h_{21} x_i + h_{22} y_i + h_{23} - h_{31} v_i x_i - h_{32} v_i y_i))^2 \right). \end{aligned}$$

Тогда элементы матрицы гомографии находятся из (1), как:

$$\mathbf{G}_H = (h_{11}, h_{12}, h_{13}, h_{21}, h_{22}, h_{23}, h_{31}, h_{32})^T.$$

Используя вновь найденную матрицу  $\mathbf{H}_{gsc}^j$ , необходимо пересчитать координаты точки  $m_j$ , соответствующей положению объекта на изображении камеры  $C_j$ .

Уточнение матрицы  $\mathbf{H}_{gsc}^j$  необходимо проводить до тех пор, пока евклидово расстояние  $D$  между точками  $m_i$  и  $m_j$  в общих мировых координатах вида сверху, соответствующие положению объекта

на изображениях камер  $C_i$  и  $C_j$ , не станет менее или равным требуемой погрешности оценки положения объекта.

### Результаты моделирования

Для проверки разработанного метода было проведено исследование зависимости точности определения координат по матрице гомографии от площади пересечения полей зрения камер.

В ходе эксперимента поля зрения камер менялись, для того чтобы произвести вычисление матрицы гомографии с различными значениями площади пересечения полей зрения. На рис. 3 приведены примеры изображений с камер  $C_1, C_2, C_3, C_4$  соответственно, а также наблюдаемая сцена.

Для выполнения эксперимента было сгенерировано 32 изображения (по 8 на каждую камеру) и 10 траекторий в координатах сцены. По двум траекториям и 4 точкам сцены с известными координатами выполнялась калибровка системы из 2 видеокамер предложенным методом и методом RANSAC [9,10]. Так как важным критерием работы представленных алгоритмов является быстрдействие, количество запусков методов RANSAC и процедуры уточнения проективного преобразования было ограничено до 10. Далее для каждой точки из 8 оставшихся траекторий производилось вычисление прогнозируемого положения точки на сцене по ее координатам в изображении камеры и сравнение с фактическим положением на сцене.

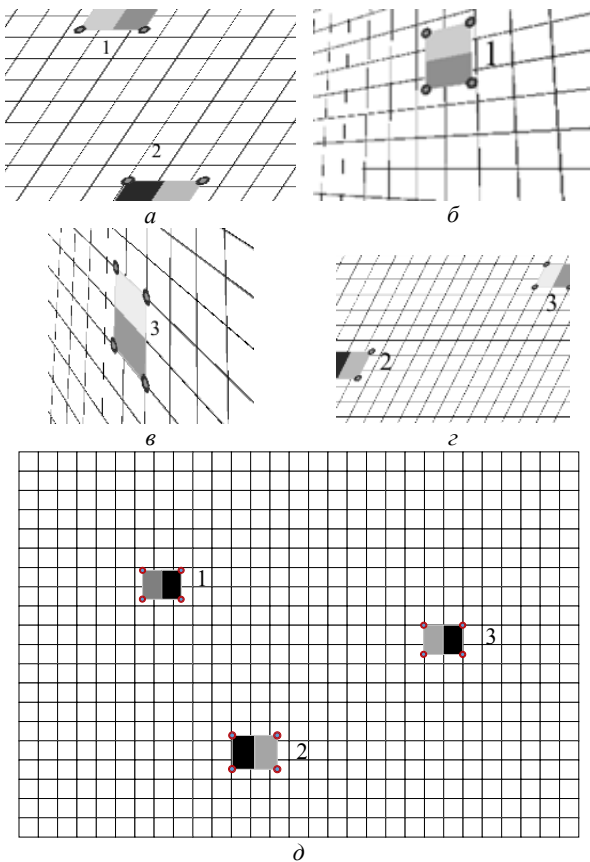


Рис. 3. Изображения: а – с камеры  $C_1$ ; б – с камеры  $C_2$ ; в – с камеры  $C_3$ ; г – с камеры  $C_4$ ; д – наблюдаемая сцена

На рис. 4 и 5 приведена зависимость среднеквадратического отклонения между фактическим и прогнозируемым положением точки от площади пересечения полей зрения видеокамер, для случая вычисления проективного преобразования по 4 точкам сцены с известными координатами.

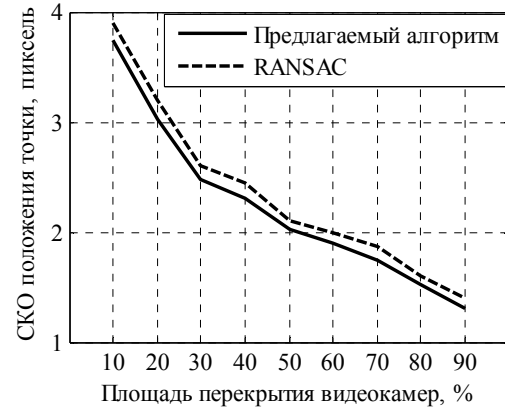


Рис. 4. SKO между фактическим и прогнозируемым положением точки для камеры  $C_1$

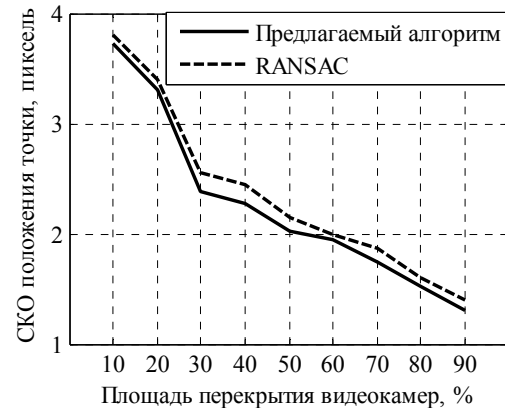


Рис. 5. SKO между фактическим и прогнозируемым положением точки для камеры  $C_2$

Далее для калибровки камеры  $C_3$  использовалась вычисленная на предыдущем этапе матрица гомографии  $H_{gsc}^2$ , из пересечения полей зрения камер  $C_2$  и  $C_3$  находились четыре точки, по которым вычислялась матрица гомографии  $H_{gsc}^3$ . По матрице  $H_{gsc}^3$  и двум траекториям выполнялась калибровка камер (до 10 запусков). Аналогичным способом выполнялась калибровка камеры  $C_4$ . На рис. 6 и 7 приведена зависимость среднеквадратического отклонения между фактическим и прогнозируемым положением точки от площади пересечения полей зрения видеокамер  $C_3$  и  $C_4$ .

Анализируя представленные зависимости, можно отметить, что предлагаемый метод калибровки выигрывает в точности вычисления проективного преобразования по сравнению с методом RANSAC при одинаковых условиях. В связи с тем, что в RANSAC случайным образом выбираются четверки опорных точек для вычисления проективного преобразования, более высока вероятность выбора не-

удачных пар точек [10]. Несмотря на то, что за большое количество итераций RANSAC позволяет вычислить правильное положение точки на сцене, для практического применения он не подходит.

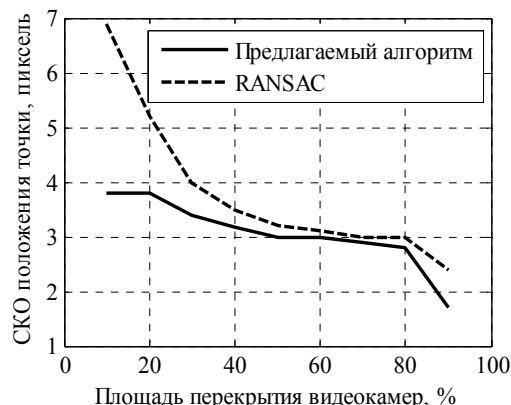


Рис. 6. СКО между фактическим и прогнозируемым положением точки для камеры  $C_3$

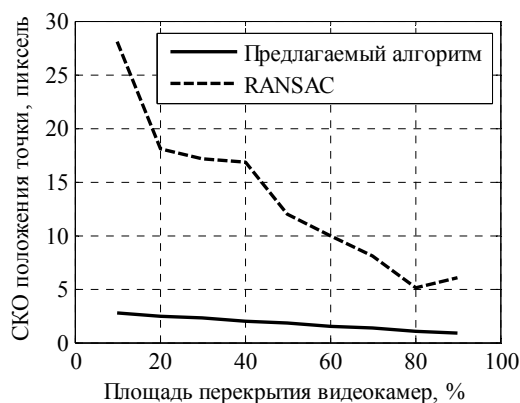


Рис. 7. СКО между фактическим и прогнозируемым положением точки для камеры  $C_4$

### Заключение

В работе приведено описание подхода к сопровождению нескольких объектов группой видеокамер. Полученные результаты свидетельствуют о возможности практического использования алгоритма в условиях с частичными или полными перекрытиями объектов. Предложенный метод калибровки видеокамер минимизирует участие оператора в работе системы, обладает необходимой точностью для распознавания всех представлений одного и того же объекта и может работать в режиме реального времени.

### Литература

1. Utsumi A. Multiple-camera-based human tracking using non-synchronous observations / A. Utsumi, J. Ohya // Proc. Asian Conf. Computer Vision. – 2000. – P. 1034–1039.
2. Liebowitz D. Metric rectification for perspective images of planes / D. Liebowitz, A. Zisserman // Computer Vision and Pattern Recognition, 1998. Proceedings. 1998 IEEE

Computer Society Conference on. – IEEE, 1998. – P. 482–488.

3. Hemayed E. E. A survey of camera self-calibration // Advanced Video and Signal Based Surveillance, 2003. Proceedings. IEEE Conference on. – IEEE, 2003. – P. 351–357.

4. Kahl F. Critical motions for auto-calibration when some intrinsic parameters can vary / F. Kahl, B. Triggs, K. Åström // Journal of Mathematical Imaging and Vision. – 2000. – Vol. 13, No. 2. – P. 131–146.

5. An architecture for multiple perspective interactive video / P. Kelly, A. Katkere, D. Kuramura, S. Moezzi, S. Chatterjee, R. Jain // Proceedings of the third ACM international conference on Multimedia. – ACM, 1995. – P. 201–212.

6. Lee L. Monitoring activities from multiple video streams: Establishing a common coordinate frame / L. Lee, R. Romano, G. Stein // IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence. – 2000. – Vol. 22, No. 8. – P. 758–767.

7. Tracking many objects with many sensors / H. Pasula, S. Russell, M. Ostland, Ya. Ritov // IJCAI. – 1999. – Vol. 99. – P. 1160–1171.

8. Hartley R.I. An algorithm for self calibration from several views // CVPR. – 1994. – Vol. 94. – P. 908–912.

9. Fischler M.A. Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography / M.A. Fischler, R.C. Bolles // Communications of the ACM. – 1981. – Vol. 24, No. 6. – P. 381–395.

10. Liu Z. A New Efficient Calibration Method for Binocular Camera / Z. Liu, J. Fang, B. Zhou // International Journal of Signal Processing, Image Processing and Pattern Recognition. – 2016. – Vol. 9. – No. 2. – P. 445–456.

### Ушарова Дарья Николаевна

Аспирантка каф. телекоммуникаций и основ радиотехники (ТОР) Томского университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)  
Тел.: +7-913-111-66-30  
Эл. почта: udn@csp.tusur.ru

Usharova D.N.

### Method for objects tracking using a group of cameras with automatic correction of a projective transformation matrix

A description of a method for tracking objects by a group of uncalibrated cameras, allowing to compare the representations of the same object in the images of different cameras in partial overlap is described. The method automatically calibrates the video surveillance system on four points with known coordinates of the object and moving out from the field of view of one camera to field of view of another. The method is based on the correction of the projective transformation matrix, which is calculated at the moment when the object appear in the fields of view of the two cameras. The results of simulation are presented and distance relations of actual and predicted positions to the surface of intersection of camera views are obtained.

**Keywords:** tracking, object tracking, video surveillance, cameras calibration, projective transformation.

УДК 59.01.85

С.М. Алфёров, А.М. Кориков

## Модели прессового задатчика давления АСУТП регулировки манометров с учетом утечки давления

Разработано математическое описание процессов, протекающих в задатчиках давления (ЗД) на основе пресса с шаговым двигателем для автоматизированного стенда настройки манометров. В модели ЗД учтено явление утечки давления, обоснована адекватность структуры модели и предложен способ параметрической идентификации ЗД.

**Ключевые слова:** идентификация, манометр, автоматизированный стенд, прессовый задатчик давления, математическая модель, утечка.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2016-19-3-90-93

### Актуальность исследования

Автоматизация процесса сборки и регулировки манометрических приборов усложняется тем, что данный технологический процесс (ТП) является нестационарным и нелинейным объектом управления (ОУ). Известно, что общей теории управления подобными ОУ не существует, поэтому разрабатываются частные теории управления различными классами объектов, обладающих нестационарностью, типовыми нелинейностями и работающими в обстановке помех и возмущений. ТП сборки и регулировки манометров как объект управления имеет отмеченные выше особенности, поэтому к настоящему времени известны только частные решения проблемы автоматизации данного ТП. Некоторые частные решения этой проблемы представлены в наших работах [1–3].

Важнейшей компонентой автоматизированной системы управления ТП (АСУТП) сборки и регулировки манометров с трубкой Бурдона является задатчик давления (ЗД). В работе [2] представлено математическое описание процессов, протекающих в ЗД клапанного типа АСУТП настройки манометров, обоснована линеаризация уравнений, описывающих эти процессы, и получено их решение. В работе [2] представлено также экспериментальное исследование клапанного ЗД, питаемого аккумуляторной станцией через редукционный клапан (дроссель), и отмечено, что различие результатов эксперимента и моделирования обусловлены допущениями, сделанными при построении математической модели клапанного ЗД, поэтому необходимо создать специальное устройство управления (СУУ) для обеспечения равномерного роста давления при настройке манометров. Очевидно, что введение СУУ в состав АСУТП усложняет её функционирование, поэтому на ОАО «Манотомь» заменили клапанные ЗД на ЗД, использующий пресс с шаговым двигателем. Производственные испытания подтвердили эффективность применения в составе АСУТП прессового ЗД с шаговым двигателем. В процессе этих испытаний установлено, что на эффективность применения данного типа ЗД влияют утечки давления и необходимо исследовать каналы утечки давления и разработать рекомендации по их учету. В этой связи

математическое моделирование процессов, протекающих в ЗД на основе пресса с шаговым двигателем, представляет не только теоретическое, но и практическое значение.

### Постановка задач исследования

В процессах сборки и градуировки манометров важнейшей составляющей является процесс управления давлением. Точностные характеристики этого процесса определяют класс точности манометрических приборов. Эксперименты показывают наличие утечки давления на стендах градуировки манометров среднего номинала (от 6 до 60 кгс/см<sup>2</sup>), что существенно затрудняет заданную точность процесса управления давлением. Для повышения точности и скорости управления давлением необходимо решить следующие задачи:

- Построить математическую модель прессового ЗД с учетом утечки давления.
- Разработать и реализовать алгоритм параметрической идентификации модели.
- Разработать и реализовать алгоритм управления давлением.

### Прессовый ЗД как объект идентификации

Упрощенная схема ЗД с возможными утечками представлена на рис. 1.

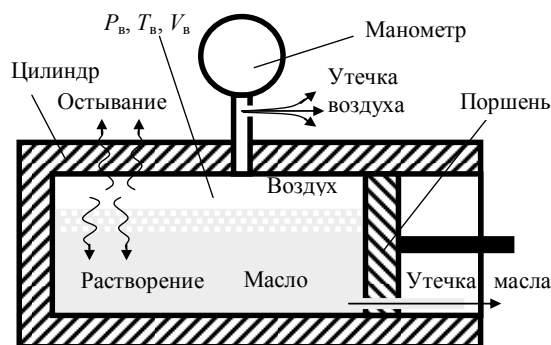


Рис. 1. Упрощенная схема ЗД с утечками

Возможны следующие каналы утечки давления:

1. Утечка воздуха, например в местах соединения манометров и пресса ЗД.
2. Утечка масла, например в месте контакта поршня и поршневой камеры.
3. Остывание воздуха в прессе, находящегося под давлением.

4. Растворение воздуха, находящегося под давлением, в масле прессового ЗД.

Рассмотрим прессовый ЗД с утечками как объект идентификации (ОИ). Для разработки математической модели данного ОИ был проведен эксперимент: поршень пресса был передвинут до состояния, при котором давление достигло примерно  $40 \text{ кгс/см}^2$  ( $2/3$  от максимально допустимого на экспериментальном стенде АСУТП), затем поршень был остановлен и проведены измерения давления в зависимости от времени в течение примерно 800 с (точнее, 784 с). В результате эксперимента получен числовой массив из 9625 отсчетов  $P_i$  и  $t_i$ . График падения давления при неподвижном поршне пресса приведен на рис. 2. На графике за начало отсчета времени  $t$  принят момент остановки поршня.

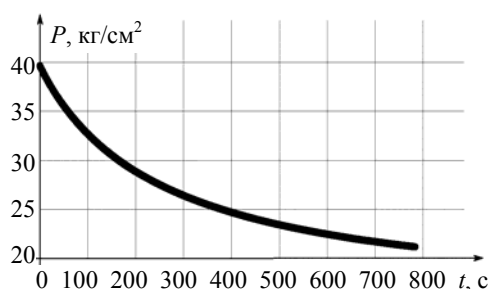


Рис. 2. Зависимость падения давления в ЗД от времени

Данный график и соответствующий ему числовой массив из 9625 отсчетов  $P_i$  и  $t_i$  с математической точки зрения является временным рядом [4], анализ которого на основе методов теории эксперимента [5] позволит определить причинные механизмы, обуславливающие появление этого ряда. Итак, на основе полученных экспериментальных данных необходимо построить математическую модель прессового ЗД с учетом наблюдаемых утечек.

#### Исследование прессового ЗД с учетом утечки воздуха

В качестве математической модели ЗД с учетом утечки воздуха используем следующее уравнение:

$$Q_A = k_{LA} \cdot P, \quad (1)$$

где  $Q_A$  — поток утечки воздуха;  $k_{LA}$  — коэффициент проводимости канала утечки воздуха;  $P$  — текущее давление в прессе.

С учетом модели утечки (1), математическая модель пресса будет иметь следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} (P + P_{\text{atm}}) \cdot V &= (P_0 + P_{\text{atm}}) \cdot V_0 - \int_0^t Q_A(\tau) d\tau, \\ Q_A &= k_{LA} \cdot P, \\ V &= V_0 - S \cdot x, \\ x &= k \cdot F, \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

где  $V$  — текущий объем воздуха;  $P_{\text{atm}}$  — атмосферное давление;  $P_0$ ,  $V_0$  — давление и объем перед началом движения поршня пресса;  $S$  — площадь поршня;  $x$  — текущее положение поршня от начального состояния или расстояние, пройденное поршнем;  $k$  — коэффициент зависимости между количеством им-

пульсов управления и расстоянием, пройденным поршнем;  $F$  — количество выработанных импульсов управления.

Для определения модели падения давления рассмотрим поведение давления в ЗД после остановки поршня, при этом  $x = \text{const}$  и  $V = \text{const}$ , согласно третьему уравнению из системы уравнений (2). Продифференцировав по времени первое уравнение системы уравнений (2), с учетом условия  $V = \text{const}$  получим:

$$\dot{P} \cdot V = -Q_{LA}$$

или с учетом второго уравнения

$$\dot{P} \cdot V = -k_{LA} \cdot P, \quad (3)$$

решение дифференциального уравнения (3) запишем в следующем виде:

$$P = P_{\text{max}} \cdot \exp\left(-\frac{k_{LA}}{V} \cdot t\right), \quad (4)$$

где  $P_{\text{max}}$  — давление в прессе в начале падения, после остановки поршня ( $t = 0$ , см. рис. 2). После логарифмирования уравнения (4) получим линейную зависимость  $\ln(P)$  от  $t$ :

$$\ln(P) = \ln(P_{\text{max}}) + \left(-\frac{k_{LA}}{V} \cdot t\right). \quad (5)$$

На рис. 3 показана зависимость  $\ln(P)$  от времени  $t$ , здесь  $P$  и  $t$  взяты из экспериментальных данных  $P_i$  и  $t_i$ , представленных на рис. 2.

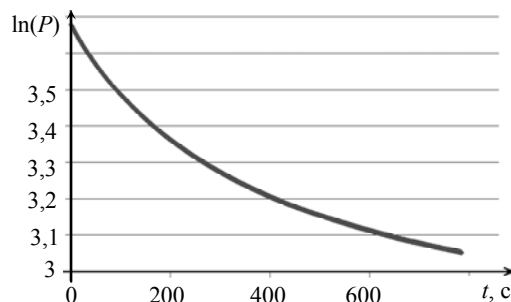


Рис. 3. Проверка структуры модели утечки воздуха

Из графика на рис. 3 видно, что зависимость на этом рисунке не совпадает с линейной зависимостью (5). Коэффициент корреляции  $R$  между величинами  $\ln(P_i)$  и  $t_i$  равен  $-0,96239$ . При расчете коэффициента корреляции  $R$  использовали известные формулы корреляционного анализа [4]. Обозначим для удобства  $\ln(P_i)$  через  $Y_i$ , а  $t_i$  —  $X_i$ , тогда  $R$  между величинами  $Y_i$  и  $X_i$  определится по формуле

$$R = \frac{\text{Cov}(X, Y)}{\sigma_x \sigma_y}, \quad (1)$$

где  $\text{Cov}(X, Y) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - M(X))(Y_i - M(Y))$  — ковариация;

$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - M(X))^2}$  — дисперсия;

$M(X) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$  — математическое ожидание.

Если принять предложенную модель утечки воздуха, то можно вычислить интегральный параметр  $p_I$  как коэффициент наклона прямой, проведенной через точки  $t_i, \ln(P_i)$ , с помощью метода наименьших квадратов (МНК):

$$p_I = -\frac{k_{LA}}{V}.$$

Параметр  $V$  можно вычислить, подсчитав количество импульсов  $F$  и используя уравнения 3 и 4 системы уравнений (2). Вычисление параметров  $V_0$  и  $k$  будет рассмотрено далее при выводе формул (13) и (14). Параметр  $S$  – площадь поршня известен из проектной документации на ЗД.

Вычисляя интегральный параметр модели  $p_I$  из данных  $t_i, \ln(P_i)$  с помощью МНК и  $V$  с использованием системы уравнений (2) и формул (13) и (14), определим параметр утечки воздуха по формуле:

$$k_{LA} = -p_I \cdot V.$$

### Исследование прессового ЗД с учетом утечки масла

В качестве математической модели утечки масла используем следующее уравнение:

$$Q = k_L \cdot P, \quad (6)$$

где  $Q$  – поток утечки масла;  $k_L$  – коэффициент проводимости канала утечки масла;  $P$  – давление в прессе.

С учетом модели (6) математическая модель прессы будет следующей:

$$\left. \begin{aligned} (P + P_{\text{atm}}) \cdot V &= (P_0 + P_{\text{atm}}) \cdot V_0, \\ Q &= k_L \cdot P, \\ V &= V_0 - S \cdot x + \int_0^t Q(\tau) d\tau, \\ x &= k \cdot F. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Рассмотрим поведение системы по модели (7) после остановки поршня. Из эксперимента нам известно поведение параметра  $P$ , поэтому исключим остальные параметры из (7), которые меняются во времени. Для этого сначала исключим  $Q$ , подставив второе уравнение в третье, затем исключим  $V$ , подставив третье уравнение в первое, получим:

$$\left. \begin{aligned} (P + P_{\text{atm}}) \cdot \left( V_0 - S \cdot x + \int_0^t k_L \cdot P d\tau \right) &= (P_0 + P_{\text{atm}}) \cdot V_0, \\ x &= k \cdot F. \end{aligned} \right\}$$

Преобразуем первое уравнение полученной системы уравнений:

$$\int_0^t k_L \cdot P d\tau = \frac{(P_0 + P_{\text{atm}}) \cdot V_0}{(P + P_{\text{atm}})} + S \cdot x - V_0.$$

Так как поршень неподвижен, то  $x = \text{const}$ , учитывая это, про дифференцируем левую и правую части полученного уравнения по времени  $t$ :

$$k_L P = -\frac{(P_0 + P_{\text{atm}}) \cdot V_0 \cdot \dot{P}}{(P + P_{\text{atm}})^2}$$

или

$$P(P + P_{\text{atm}})^2 = -\frac{(P_0 + P_{\text{atm}}) \cdot V_0 \cdot \dot{P}}{k_L}.$$

Если давление измеряется в кгс/см<sup>2</sup>, то  $P_{\text{atm}} = 1$  кгс/см<sup>2</sup>, тогда:

$$P(P+1)^2 = -\frac{(P_0+1) \cdot V_0 \cdot \dot{P}}{k_L}. \quad (8)$$

Решив уравнение (8), получим:

$$t = -\frac{(P_0+1) \cdot V_0}{k_L} \cdot \left( \ln\left(\frac{P}{P+1}\right) + \frac{1}{P+1} + C \right), \quad (9)$$

где  $C$  – постоянный коэффициент, полученный после интегрирования, учитывая, что при  $t = 0$  [т.е. после остановки поршня (см. рис. 2)] давление было равно  $P_{\text{max}}$ , получим:

$$C = -\ln\left(\frac{P_{\text{max}}}{P_{\text{max}}+1}\right) - \frac{1}{P_{\text{max}}+1}.$$

Введем функцию

$$Y(P) = A \ln(P) + B \ln(P+1) - \frac{C}{P+1}, \quad (10)$$

где  $A = 1$  см<sup>4</sup>/кгс<sup>2</sup>,  $B = -1$  см<sup>4</sup>/кгс<sup>2</sup>,  $C = -1$  см<sup>2</sup>/кгс. При проверке размерности в формуле (10) следует помнить, что выше в формуле (9) через 1 обозначено  $P_{\text{atm}} = 1$  кгс/см<sup>2</sup>.

Из уравнения (9) следует, что между функцией  $Y(P)$ , введенной соотношением (10), и временем  $t$  имеется линейная зависимость, так как параметры  $C, P_0, V_0$  и  $k_L$  не меняются в процессе падения давления. По экспериментальным данным  $P_i$  можно рассчитать значения функции (10), получив значения  $Y_i = Y(P_i)$ . Построив график зависимости  $Y_i$  от  $t$  (рис. 4), можно увидеть зависимость, близкую к линейной, что подтверждает адекватность структуры математической модели утечки масла.

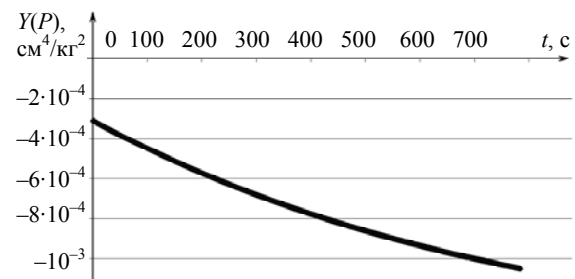


Рис. 4. Проверка структуры модели утечки масла

Коэффициент корреляции  $R$  между величинами  $Y_i$  и  $t_i$  равен  $-0,99166$ . Расчет коэффициента корреляции  $R$  выполнен по известным формулам корреляционного анализа [4].

По данным  $Y_i$  и  $t_i$  получено значение интегрального параметра уравнений (8) и (9):

$$p_I = \frac{(P_0+1) \cdot V_0}{k_L} = 1058670.$$

Процесс градуировки предполагает следующее: параметр  $P_0$  измеряется перед началом движения поршня, т.е. известен и зависит от номинала. Параметр  $V_0$  может изменяться в зависимости от количества установленных манометрических приборов на стенд АСУТП регулировки манометров и количества воздуха в их пружинах, поэтому его необходимо определять для каждого процесса управления давле-

нием при градуировке. Параметр  $k_L$  можно считать неизменным, так как он характеризует задатчик давления.

Параметр  $V_0$  можно оценить в процессе набора давления при съеме характеристики манометра, допустив, что при небольших давлениях утечка незначительна. Для этого необходимо измерить давление в двух состояниях поршня  $x_0$  (перед началом движения поршня) и  $x_1$ . Модель без учета утечек:

$$\left. \begin{aligned} (P + P_{\text{atm}}) \cdot V &= (P_0 + P_{\text{atm}}) \cdot V_0, \\ V &= V_0 - S \cdot x, \\ x &= k \cdot F. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Начальному положению поршня  $x = 0$  соответствует давление  $P_0$  и объем  $V_0$ , положению поршня  $x_1$  соответствует давление  $P_1$  и объем  $V_1$ . Подставив соответствующие значения в систему уравнений (11) получим:

$$\left. \begin{aligned} (P_1 + P_{\text{atm}}) \cdot V_1 &= (P_0 + P_{\text{atm}}) \cdot V_0, \\ V_1 &= V_0 - S \cdot x_1, \\ x_1 &= k \cdot F_1, \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

где  $F_1$  – количество импульсов управления, совершенных до достижения давления  $P_1$ . Параметр  $F_1$  подсчитывается программой управления. Напомним также, что параметр  $S$  – площадь поршня – известен из проектной документации на ЗД. Из систем уравнений (11) и (12) следует:

$$V_0 = S \cdot k \cdot F \frac{P_1 + P_{\text{atm}}}{P_1 - P_0}, \quad (13)$$

$$k = \frac{V_0 - V_1}{S \cdot F} \quad \text{или} \quad k = \frac{\Delta V_k}{S \cdot F_k}, \quad (14)$$

где  $\Delta V_k$  – объем камеры пресса;  $F_k$  – количество импульсов управления, требующихся для перемещения поршня от начального до конечного положения. Параметр  $k$  не меняется и может быть вычислен заранее.

Если параметр  $V_0$  оценить при наборе давления в процессе получения данных  $P_i$  и  $t_i$  (см. рис. 1), то после вычисления интегрального параметра  $p_I$  можно определить коэффициент утечки  $k_L$ :

$$k_L = \frac{(P_0 + 1) \cdot V_0}{p_I}.$$

### Заключение

Рассмотрены две модели ЗД: с утечкой воздуха и утечкой масла. Предложены способы параметрической идентификации ЗД для каждой модели утечки, при этом предполагается, что при малых давлениях утечка незначительна. Корреляционный анализ [4, 5] предложенных двух моделей ЗД показал, что утечка масла является основной причиной падения давления в ЗД, представленного экспериментальными данными на рис. 2. Наш теоретический

вывод совпадает с экспертным заключением разработчика исследуемого ЗД, суть которого заключается в том, что наибольший вклад в падение давления вносит утечка масла. Определена структура математической модели прессового ЗД с учетом утечки масла и доказана адекватность предложенной модели ЗД. Разработанный и реализованный алгоритм параметрической идентификации модели прессового ЗД с учетом утечки масла является основой для следующего важнейшего этапа исследования: разработки и реализации алгоритма управления давлением, обеспечивающего равномерный рост давления при настройке манометров.

### Литература

1. Алфёров С.М. Автоматизация процессов сборки и настройки манометров / С.М. Алфёров, А.М. Кориков // Доклады Том. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники. – 2011. – № 2(24), ч. 3. – С. 121–128.
2. Алфёров С.М. Моделирование задатчика давления для настройки манометров / С.М. Алфёров, А.М. Кориков // Доклады Том. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники. – 2012. – № 2(26), ч. 1. – С. 193–198.
3. Алфёров С.М. Автоматизация процесса градуировки шкал манометров / С.М. Алфёров, А.М. Кориков // Автоматика и программная инженерия. – 2014. – № 1(7). – С. 82–92.
4. Кендалл М. Многомерный статистический анализ и временные ряды / М. Кендалл, А. Стьюарт. – М.: Наука, 1976. – 736 с.
5. Кориков А.М. Эксперимент в научном исследовании // Доклады Том. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники. – 2015. – № 2(36). – С. 148–154.

### Алфёров Сергей Михайлович

Канд. техн. наук, ассистент каф. автоматизированных систем управления (АСУ) ТУСУРа  
Тел.: +7 (382-2) 41-42-79  
Эл. почта: alferov.sm@asu.tusur.ru

### Кориков Анатолий Михайлович

Д-р техн. наук, проф., зав. каф. АСУ,  
профессор Национального исследовательского  
Томского политехнического университета  
Тел.: +7 (382-2) 41-42-79  
Эл. почта: korikov@asu.tusur.ru

Alferov S.M., Korikov A.M.

### Model of a press-based pressure controller for settings automated manometers in view of pressure leakage

The paper presents the mathematical models of the processes that take place in pressure controllers based on the press with the stepper motor for automatically adjusting manometers.

**Keywords:** identification, pressure gauge, automated stand, pressure control, mathematical model, leak.

УДК 62.002(063)

Я.Е. Мещеряков, А.М. Кориков

## Автоматизация контроля положения платформы карьерного бурового станка

В современных горнодобывающих разрезах применяются крупные буровые станки, эффективность работы которых во многом определяется точностью позиционирования рабочих платформ, а также их исполнительных органов. Актуальной задачей для развития угольной индустрии нашей страны является создание современных устройств для контроля положения рабочей платформы буровой машины. Спроектирована система автоматического управления для контроля положения платформ буровых станков и их функциональных элементов.

**Ключевые слова:** автоматизация, буровой станок, позиционирование платформы, точность позиционирования, система автоматического управления.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2016-19-3-94-97

### Актуальность исследования

В развитии угольной отрасли страны главным приоритетом является применение безопасных технологий путём увеличения доли добычи угля на угольных разрезах открытым способом. Качество проведения буровых и открытых горных работ определяется точностью позиционирования платформ буровых станков, а также их исполнительных органов [1–4]. Постоянный мониторинг положения бурового инструмента при бурении позволит откорректировать точность выхода инструмента в завершающей фазе бурения. Система автоматического управления (САУ) подскажет машинисту буровой машины оптимальное решение и передаст данные технологического процесса (ТП) на сервер автоматизированной системы управления ТП (АСУТП).

Существующие отечественные механические системы контроля положения платформ буровых станков не позволяют качественно выполнять мониторинг угловой ориентации функциональных элементов буровых машин, регистрировать и анализировать полученную информацию. Известные импортные устройства мониторинга являются дорогостоящими (более 1 млн руб.), сложны в эксплуатации, имеют многоуровневый интерфейс, требуют тщательной отладки и продолжительного обучения оператора-машиниста.

Целью нашего исследования является создание системы автоматического управления для контроля положения в пространстве платформ буровых станков, работающих на угольных разрезах, а также их функциональных элементов. Это позволит повысить надёжность работы горной техники и качество выполняемых работ, обеспечить энерго- и ресурсосбережение. Оригинальность разработки САУ управления буровым станком и их функциональных элементов состоит в том, что САУ создается на основе отечественной элементной базы, т.е. решается проблема зависимости от иностранных производителей, и обеспечивается превосходство САУ по следующим характеристикам: высокая точность показаний датчиков, простота конструкции и монтажа системы, модульная архитектура, низкая себестоимость.

### Буровой станок как объект управления и задачи САУ

В качестве бурового станка как объекта управления рассмотрим буровой станок типа СБШ-250. Подобные буровые станки имеют огромную массу (масса станка 90 т, для сравнения танк Т-90 весит 46,5 т). Общий вид бурового станка данного типа представлен на рис. 1.



Рис. 1. Буровой станок вертикального бурения СБШ-250МНА

Отклонение платформы бурового станка СБШ-250 от горизонта в процессе его работы более чем на 5 градусов является основной причиной поломки бурового станка. Этот факт усиливает актуальность нашего исследования по созданию САУ для контроля положения платформы буровых станков. На рис. 2 представлена гидравлическая система управления домкратами бурового станка.



Рассмотрим основные режимы работы разрабатываемой САУ с буровым станком как объектом управления.

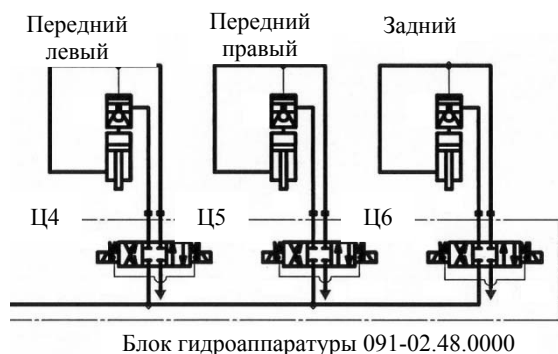


Рис. 2. Гидравлическая система управления домкратами

### Режим горизонтирования платформы

САУ, анализируя данные угла наклона платформы бурового станка, полученные из пересчитанных показаний акселерометра, регулирует подачу масла из гидросистемы к домкратам посредством дискретных гидроклапанов, управляемых магнитом. Регулируя подачу масла к домкратам, микроконтроллер САУ устанавливает платформу бурового станка в требуемое положение. Существующие дискретные гидроклапаны позволяют подстраивать положение платформы бурового станка лишь «рывками» ввиду строго определённого режима работы: накачка масла (клапан открыт), удержание (клапан закрыт), слив масла (реверс клапана).

### Режим стабилизации процесса бурения

Во время бурения скважины возникают паразитные явления, которые нарушают горизонтальность платформы бурового станка. К таким явлениям относятся: вибрация и просадка грунта по причине огромной массы бурового станка. САУ, анализируя амплитуду, фазу и направление вибрации, корректирует домкратами ориентацию платформы до установленного значения. Вышеупомянутые дискретные гидравлические клапаны позволяют осуществлять «грубую» регулировку и при этом, как правило, с перерегулированием.

С позиции теории управления [5] структуру системы управления буровым станком можно представить рис. 3.

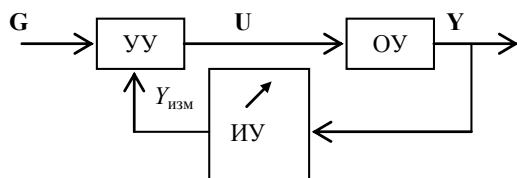


Рис. 3. Структура системы управления

На этом рисунке через объект управления (ОУ) обозначен буровой станок (для нашей задачи это – платформа бурового станка и гидравлическая система управления домкратами бурового станка). С точки зрения теории управления ОУ является задан-

ной (неизменяемой) частью САУ, а проектируемой (изменяемой) частью САУ являются датчики (измерительные устройства (ИУ)) и управляющие (в том числе, вычислительные) устройства (УУ). На рис. 3 через  $G$  обозначен вектор параметров, характеризующий заданное (желаемое) положение платформы бурового станка, через  $U$  обозначен вектор управляющих параметров – сигналов управления, обеспечивающих управление домкратами бурового станка, а через  $Y$  – вектор параметров, характеризующий действительное положение платформы бурового станка.

Итак, задачей проектируемой САУ является поддержание следующего равенства:

$$Y = G. \quad (1)$$

Проектирование САУ заключается в разработке проектируемой (изменяемой) части САУ, включающей датчики (измерительные устройства) и управляющие устройства, которая обеспечивает равенство (1) с точностью, необходимой буровому инструменту при бурении.

Проектируемая часть САУ строится на основе микроэлектромеханических систем (MEMS) – акселерометров. Микроконтроллер (МК), периодически опрашивая датчик ускорения, анализирует ориентацию платформы бурового станка в пространстве и параметры вибраций для корректировки процесса бурения. Проектируемая часть САУ разрабатывается для двух основных рассмотренных выше режимов работы: горизонтирования и стабилизации процесса бурения.

Для решения проблемы «грубого» регулирования, возникающего при стабилизации процесса бурения, планируется установить пропорциональный электрогидравлический сервоклапан серии DXJ3 фирмы Diplomatic Oleodinamica или сервоклапан РМ400-400 производства Павловского машиностроительного завода. Установка сервоклапанов позволит плавно корректировать положение буровой платформы с минимальным перерегулированием.

Разрабатываемая САУ построена по модульному принципу, согласно которому каждый унифицированный блок легко взаимозаменяется на другой. В качестве вычислителя используется МК pic30f3013, который в дальнейшем будет заменен на K1986BE92Q1. В настоящий момент полностью реализована функция супервайзера за технологическим процессом.

САУ осуществляет:

- отображение угла наклона;
- контроль нахождения в заданном интервале;
- оценку основных параметров вибрации;
- коррекцию при ручной установке платформы домкратами.

На рис. 4 представлен тестируемый экземпляр САУ, функционирующей в режиме наблюдения.

### Тестирование САУ

Функция стабилизации успешно осуществляется на основе современных микроэлектромеханических систем (МЭМС) – гироскопов и акселерометров-инклинометров.

Для определения угла наклона объекта можно использовать акселерометр-инклинометр, по показаниям которого определяется момент покоя объекта или вносятся дополнительные корректировки.



Рис. 4. Тестовый экземпляр САУ, функционирующей в режиме наблюдения

Для тестирования алгоритмов цифровой обработки сигналов и алгоритмов работы САУ был спроектирован испытательный макет двухосевой системы стабилизации, позволяющий задавать угол наклона  $\pm 15$  град по осям  $X$  и  $Y$  с шагом не менее  $0,1$  град. Макет предназначен для апробации алгоритмов управления, проектирования новых электронных устройств, программирования микроконтроллеров (МК) и имитации возмущающего воздействия (рис. 5).

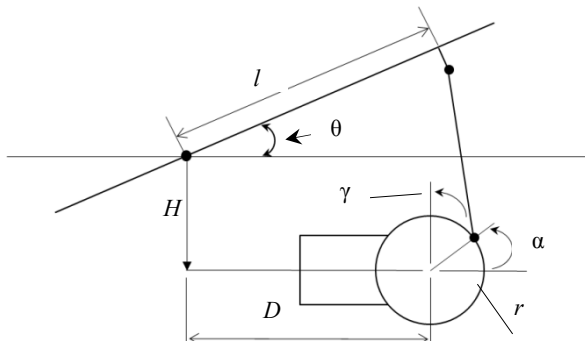


Рис. 5. Расчетная схема испытательного макета

На этом рисунке, а также в (2) введены следующие обозначения:  $H$  – вертикальная проекция расстояния от оси вращения сервопривода до центра вращения подвижной платформы;  $D$  – горизонтальная проекция расстояния от оси вращения сервопривода до центра вращения подвижной платформы;  $r$  – радиус вращения кривошипа закреплённого на оси сервопривода;  $h$  – длина крепежного уголка подвижной платформы;  $b$  – длина шатуна;  $l$  – расстояние от точки вращения пластины до уголка.

Платформа макета представляет собой две пластины, соединенные между собой шпилькой M5 посредством карданного вала. Наклон верхней плоскости осуществляется при помощи сервоприводов, к плечам которых присоединены поводки, закреплённые к верхней плоскости.

Зависимость наклона верхней пластины  $\theta$  в зависимости от угла поворота плеча сервопривода (кривошипа)  $r$  может быть описана следующим выражением:

$$\theta = \frac{A + 2(r(h-H)\zeta - Hh - lD + r(D-l)\eta)}{2(r\zeta + hD + rh\eta - lH)}. \quad (2)$$

Здесь использованы следующие обозначения:

$$A = H^2 + D^2 + r^2 + h^2 + l^2 - b^2, \quad \zeta = a \cos \alpha_0 + \sin \alpha_0, \\ \eta = \cos \alpha_0 - a \sin \alpha_0.$$

Вывод формулы (2) иллюстрирует рис. 5.

#### Модуль акселерометра

Этот модуль является первичным преобразователем сигнала положения и спроектирован для использования с Breadboard платами, а также целевыми устройствами. Он содержит акселерометр SCA3100, предназначенный для формирования обратной связи для отслеживания положения платформы.

Акселерометр-инклинометр показывает проекцию ускорения на свои оси, по которой определяется положение статической платформы в пространстве. Отличие между инклинометром и акселерометром заключается в форме выдаваемого сигнала. Если акселерометр выдает значение ускорения, которое преобразуется в углы наклона по осям  $X$ ,  $Y$  и  $Z$ , то инклинометр выдает непосредственное значение углов наклона.

SCA3100T – это высокоточный цифровой акселерометр для ответственного применения, способный производить измерения по осям с точностью  $0,05$  град. Датчик выдает 11-разрядные значения углов по осям  $X$ ,  $Y$  и  $Z$  (до 5000 выборок/с), а также 8-разрядное значение температуры для введения поправок. При выполнении равенства (1) ось  $Y$  совпадает с продольной осью платформы бурового станка, а ось  $X$  – с поперечной осью платформы.

Модуль датчиков конструктивно выполнен на одностороннем куске фольгированного стеклотекстолита с габаритами  $25 \times 45 \times 3$  мм.

#### Анализ данных акселерометра и выбор цифрового фильтра

Анализ полученных данных показал высокую зашумленность полезного сигнала, которая обусловлена природой датчика и используемой технологией. На рис. 6 приведён фрагмент данных по углам наклона платформы бурового станка по осям  $X$  и  $Y$  до их обработки цифровым фильтром Баттерворта с бесконечной импульсной характеристикой (БИХ) 5-го порядка и после их обработки этим цифровым фильтром. При проведении и обработке результатов эксперимента использовались рекомендации [6].

На рис. 6 римской цифрой I обозначен исходный сигнал по оси  $X$ ; цифрой II – обработанные данные по оси  $X$ ; цифрой III – исходный сигнал по оси  $Y$ ; цифрой IV – обработанные данные по оси  $Y$ . По оси абсцисс показано время в секундах, а по оси ординат – угол наклона платформы в градусах. Выбор БИХ фильтра обусловлен скоростью работы

вычислительного узла, в данном случае – микроконтроллера (МК). Разработанная программа БИХ фильтра требует меньшего количества операции умножения с накоплением, что важно в условиях низкой вычислительной мощности отечественных микроконтроллеров для цифровой обработки сигналов.

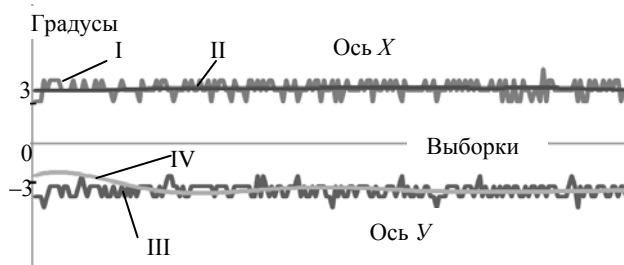


Рис. 6. Фрагмент данных углов наклона платформы бурового станка

Применение фильтра Баттерворта, не имеющего нулей частотной характеристики (также называемого фильтром с максимально плоской характеристикой), не создает пульсаций (неравномерности) в полосе пропускания, т.е. обладает монотонной характеристикой в обеих полосах. Фильтр Баттерворта вносит нелинейную задержку. Для учета нелинейного эффекта задержки применяют корректирующие звенья, которые задерживают одни частотные компоненты меньше, чем другие, но при этом вносят в результирующий сигнал добавочную задержку [7].

#### Закключение

Таким образом, результаты проведённых испытаний аппаратно-программного комплекса в лабораторных и реальных производственных условиях подтверждают возможность его применения для дистанционного мониторинга горизонтальности платформы бурового станка и автоматизированного учёта рабочих циклов буровых станков за фиксированный промежуток времени.

#### Литература

1. Мещеряков Я.Е. Мониторинг точности позиционирования основных функциональных узлов технологических машин / Я.Е. Мещеряков, А.М. Кориков // Актуальные проблемы современного машиностроения: сб. трудов междунар. конф. / Юргинский технологический ин-т. – Томск: Изд-во Том. политехн. ун-та, 2014. – С. 38–42.
2. Мещеряков Я.Е. Автоматизированный мониторинг работы экскаватора в условиях угольного разреза // Вестник КузГТУ. – 2015. – № 4. – С. 121–125.
3. Mescheryakov Ya. Monitoring Positioning Accuracy of the Basic Functional Units of Technological Machines /

Y.E. Mescheryakov, A.M. Korikov // Applied Mechanics and Materials. 2015. – Vol 770. Trans Tech Publications, Switzerland. – P. 612–616.

4. Мещеряков Я.Е. Аппаратно-программный комплекс для мониторинга рабочих циклов шагающих экскаваторов на угольных разрезах Кузбасса / Я.Е. Мещеряков, А.М. Кориков, Н.П. Курышкин // Системы автоматизации в образовании, науке и производстве: Труды X Всерос. науч.-практ. конф. / Сиб. гос. индустр. ун-т; под общ. ред. С.М. Кулакова, Л.П. Мышляева. – Новокузнецк: Изд. центр СибГИУ, 2015. – С. 265–269.

5. Кориков А.М. Основы теории управления: учеб. пособие. – 2-е изд. – Томск: Изд-во НТЛ, 2002. – 392 с.

6. Кориков А.М. Эксперимент в научном исследовании // Доклады Том. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники. – 2015. – № 2(36). – С. 148–154.

7. Кестер У. Проектирование систем цифровой и смешанной обработки сигналов: пер. с англ. / Уолт Кестер – М.: Техносфера, 2010. – 52 с.

#### Мещеряков Ярослав Евгеньевич

Аспирант ТУСУРа, ассистент  
Кузбасского государственного технического университета  
им. Т.Ф. Горбачёва, г. Кемерово  
Тел.: +7-906-937-22-09  
Эл. почта: M.YarosLove@yandex.ru

#### Кориков Анатолий Михайлович

Д-р техн. наук, проф.,  
зав. каф. автоматизированных систем управления ТУСУРа,  
профессор Национального исследовательского  
Томского политехнического университета  
Тел.: +7 (382-2) 41-42-79  
Эл. почта: korikov@asu.tusur.ru

Meshcheryakov Y.E., Korikov A.M.

#### Automation of platform position control for quarry drilling rig

In modern mining cuts are used large drilling rigs with overall performance in many respects, defined by the accuracy of positioning of working platforms, as well as their executive bodies. An urgent challenge for the development of the coal industry in Russia is creation of modern devices to control provision of a working platform of a drilling machine. The automated control system is developed to control provision of platforms of drilling rigs and their functional elements.

**Keywords:** automation, drilling rig, positioning of a platform, positioning accuracy, system of automatic control.

УДК 519.688:622.276

В.Л. Сергеев, К.Д. Ву

## К оптимизации адаптивных алгоритмов идентификации и интерпретации гидродинамических исследований с учетом влияния ствола скважины

Решается задача оптимизации адаптивных алгоритмов обработки результатов гидродинамических исследований скважин на неустановившихся режимах фильтрации на основе интегрированных моделей забойного давления с переменными параметрами с учетом дополнительной априорной информации и влияния ствола скважины, зависящими от времени. Приводятся результаты анализа качества адаптивных алгоритмов с решением оптимизационных задач при идентификации модели кривой восстановления давления и определения управляющих параметров с учетом априорной информации о пластовом давлении.

**Ключевые слова:** адаптация, идентификация, оптимизация, кривая восстановления давления, гидродинамические исследования скважин, интегрированная система моделей, нефтяные месторождения, априорная информация.

doi: 10.21293/1818-0442-2016-19-3-98-102

Нестационарные гидродинамические исследования (ГДИ) скважин по кривой восстановления давления (КВД) представляют собой наиболее информативный и востребованный метод определения параметров пластов нефтяных и газовых месторождений в связи с широким внедрением в практику нефтегазодобычи стационарных информационно-измерительных телеметрических систем [1].

Перспективным направлением разработки систем идентификации и диагностики нефтяных пластов являются современные адаптивные технологии ГДИС, позволяющие определять фильтрационные параметры и энергетическое состояние нефтяных и газовых залежей в процессе проведения гидродинамических исследований, которые не планируют заранее время завершения исследований [2–6]. Адаптивные технологии ГДИС существенно сокращают время простоя скважин и расширяют возможности традиционных графоаналитических методов интерпретации, которые часто требуют проведения достаточно длительных исследований с участием соответствующих квалифицированных специалистов [7–11].

Актуальными задачами при использовании адаптивных технологий в автоматизированных системах обработки результатов ГДИС являются проблема учета влияния ствола скважины в условиях априорной неопределенности модели начального участка забойного давления и задача оптимизации алгоритмов идентификации и интерпретации, связанная с решением экстремальных задач при идентификации модели КВД и определения управляющих параметров.

Следует отметить, что решение проблемы учета влияния ствола скважины при интерпретации КВД значительно усложняет решение соответствующих оптимизационных задач [6]. В этой связи в данной работе рассматривается способ разбиения сложной оптимизационной задачи при идентификации модели КВД скважин нефтяных месторождений и определения управляющих параметров на последова-

тельность более простых экстремальных задач. Для решения задачи идентификации рассмотрена новая интегрированная система моделей забойного давления с управляемыми параметрами корректировки дополнительных априорных данных и экспертных оценок.

### Модели и алгоритмы адаптивной идентификации и оптимизации

Основа алгоритмов интерпретации результатов гидродинамических исследований по кривой восстановления давления с учетом влияния ствола скважины представляет собой интегрированную систему моделей забойного давления с переменными параметрами с учетом дополнительной априорной информации, которые зависят от времени вида

$$\begin{cases} P_{3,n}^* = P_{3,n} + \xi_n = f_3(t_n, f_c(a_n, t_n), b_n) + \xi_n, n = \overline{1, n_k} \\ k_{j,n} \bar{v}_{j,n} = v_{j,n} + \eta_n = f_{a,j}(t_n, a_n, b_n) + \eta_{j,n}, j = \overline{1, l}, \end{cases} \quad (1)$$

где переменные параметры  $a_n = (\alpha_j(t_n), j = \overline{1, m})$  в модели влияния ствола скважины  $f_c(a_n, t_n)$  и параметры  $b_n = (b_k(t_n), k = \overline{1, p})$  в модели забойного давления – неизвестные однозначные функции  $a_j(t_n)$ ,  $b_k(t_n)$  дискретного времени  $t_n$ ;  $\bar{P}_{3,n}, P_{3,n}$  – фактические и вычисленные на основе модели  $f_3(t_n, q_n(a_n, t_n), b_n)$  значения забойного давления, полученные в разные моменты  $t_n \in [t_0, t_k]$ ;  $t_0$  – время начала исследований и  $t_k$  – время завершения исследований;  $\bar{v}_{j,n}, v_{j,n}$  – известные и вычисленные на основе модели  $f_{a,j}(t_n, a_n, b_n)$  в момент времени дополнительные априорные данные о параметрах нефтяного пласта;  $k_{j,n}$  – управляемые параметры корректировки дополнительных априорных сведений;  $\xi_n, \eta_{j,n}$  – случайные величины, представляющие погрешность измерений забойного давления, ошиб-

ка экспертных оценок и дополнительных данных, неточность модели и т.п.

Особенность интегрированной системы (1) заключается в том, что переменные параметры  $a_n$  влияния ствола скважины  $f_c(a_n, t_n)$  являются неизвестными однозначными функциями времени и подлежат определению наряду с параметрами нефтяного пласта  $b_n$ , коэффициентами корректировки  $k_{j,n}$  и временем завершения исследований  $t_k$ . Примером (1) является интегрированная система моделей забойного давления неограниченного нефтяного пласта с учетом дополнительной априорной информации о пластовом давлении  $\bar{p}_{пл,n}$  вида

$$\begin{cases} P_{3,n}^* = P_{3,n} + \xi_n = P(t_0) + (q_0 - f_c(a_n, t_n)) \times \\ \times \left( \frac{1}{4\pi\sigma_n} \lg(2,25\chi_{k,n}t_n) \right) + \xi_n, \\ k_n \cdot \bar{p}_{пл,n} = \int_{t_0}^{t_{пл}} \left( \frac{dP_{3,t}(b_n, \sigma_n, \chi_{k,n}, t_n)}{dt} \right) dt + \eta_{1,n}, n = \overline{1, n_k}, \end{cases} \quad (2)$$

где  $f_c(a_n, t_n) \rightarrow 0$  при  $t_n \rightarrow \infty$ ;  $\chi_{k,n} = \frac{\chi_n}{r_{n,пр}^2}$  – ком-

плексный параметр;  $\chi_n$  – пьезопроводность пласта;  $r_{n,пр}$  – приведенный радиус скважины;  $k_n$  – параметр корректировки;  $t_{пл}$  – время восстановления забойного давления до пластового.

Для интегрированной системы моделей забойного давления (1), согласно методу адаптивной интерпретации с учетом дополнительной априорной информации [1, 3, 12–14], оптимальные оценки параметров  $(\alpha_n^*(\beta_n^*)) = (a_n^*(\beta_n^*), b_n^*(\beta_n^*))$  и вектора управляющих параметров  $\beta_n^*$  определяются путем решения следующей оптимизационной задачи:

$$\alpha_n^*(\beta_n) = \arg \min_{\alpha_n} \Phi(\alpha_n, \beta_n), \quad (3)$$

$$\beta_n^* = \arg \min_{\beta_n} J_0(\alpha_n^*(\beta_n)), \quad (4)$$

где  $\arg \min_x f(x)$  – точка минимума функции  $f(x)$  ( $f(x^*) = \min_x f(x)$ );

$\Phi(\alpha_n, \beta_n) = \Phi(J_0(\alpha_n, h_{3,n}), J_{a,j}(\alpha_n, \beta_n) j = \overline{1, m})$  означает комбинированный показатель качества, где

$$J_0(\alpha_n, h_n) = \sum_{i=1}^{n-1} w((t_n - t_{n-i}) / h_{3,n}) \Psi_0(\xi_i(\alpha_n)),$$

$$J_{a,j}(\alpha_n, \beta_{j,n}) = \beta_{j,n} \Psi_{a,j}(\eta_{j,n}(\alpha_n)), \quad (5)$$

частные критерии качества моделей КВД и дополнительных априорных данных  $f_{a,j}(t_n, a_n, b_n)$ , известных к моменту времени  $t_n$ ;  $w((t_n - t_{n-i}) / h_{3,n})$  – значения весовой функции  $w((t - \tau) / h_n)$  с параметром

забывания  $h_{3,n}$  для обеспечения процесса адаптивной идентификации и интерпретации;  $\Psi_0, \Psi_{a,j}$  – известные функции;  $(\alpha_n^*(\beta_n^*)) = (a_n^*(\beta_n^*), b_n^*(\beta_n^*))$  – оптимальные оценки параметров модели забойного давления;  $\beta_n^* = (h_{r,j,n}^*, h_{3,n}^*, k_{j,n}^*)$  – оптимальные оценки объединенного вектора управляющих параметров, в котором  $h_{r,j,n}^*$  – оценки параметров регуляризации,  $h_{3,n}^*$  – оценка параметра забывания,  $k_{j,n}^*$  – оценки параметров корректировки дополнительных априорных сведений и экспертных оценок.

Решение оптимизационной задачи (3) в силу невысокой размерности вектора параметров не вызывает больших проблем. Так, например, при применении метода Гаусса–Ньютона оптимизационная задача (3) переходит в последовательное решение систем линейных алгебраических уравнений [7, 8]. Значительные трудности вызывает решение сложной многоэкстремальной задачи (4) по оптимизации оценок управляющих параметров. В этой связи целесообразно разбить оптимизационную задачу (4) на последовательность более простых экстремальных задач [15]. В данном случае алгоритм идентификации с оптимизацией оценок параметров КВД (3), (4) можно представить в виде следующей последовательности решения экстремальных задач:

1. На первом этапе решается задача определения оптимальных оценок параметров модели КВД без учета дополнительных априорных данных ( $k_j = 0, \forall j = \overline{1, l}$ ) и выбора наилучших значений параметра регуляризации ( $h_{r,j,n} = h_{r,n} \forall j = \overline{1, l}$ ) при известных значениях параметра забывания  $\bar{h}_{3,n}$ :

$$\alpha_n^*(h_{r,n}) = \arg \min_{\alpha_n} \Phi(\alpha_n, h_{r,n}, k_j = 0, \bar{h}_3), \quad (6)$$

$$h_{r,n}^* = \arg \min_{h_{r,n}} J_0(\alpha_n^*(h_{r,n}), k_j = 0, \bar{h}_3). \quad (7)$$

2. На втором этапе решается задача определения оптимальных оценок параметров модели КВД с учетом дополнительных априорных данных при  $\bar{v}_{j,n} = f_{a,j}(t_n, \alpha_n^*(h_{r,n}^*))$  и определения наилучших значений параметров корректировки при известных значениях параметра забывания  $\bar{h}_3$ :

$$\alpha_n^*(h_{r,n}^*, k_{j,n}) = \arg \min_{\alpha_n} \Phi(\alpha_n(h_{r,n}^*, k_j, \bar{h}_3)), \quad (8)$$

$$k_{j,n}^* = \arg \min_{k_{j,n}} J_0(\alpha_n^*(h_{r,n}^*, k_j, \bar{h}_3)). \quad (9)$$

3. На третьем этапе решается задача определения наилучших значений параметра забывания:

$$h_{3,n}^* = \arg \min_{h_{3,n}} J_0(\alpha_n^*(h_{r,n}^*, h_{3,n})), \quad (10)$$

$$h_{3,n}^* = \arg \min_{h_{3,n}} J_0(\alpha_n^*(h_{r,n}^*, k_j^*, h_{3,n})) \quad (11)$$

при оптимальных значениях параметров модели КВД, полученных путем решения оптимизационных задач (6) либо (8).

**Результаты решения задач интерпретации с оптимизацией оценок параметров КВД**

Результаты исследований моделей и алгоритмов адаптивной идентификации и интерпретации результатов ГДИС с учетом влияния ствола скважин №1, №2 с оптимизацией оценок параметров КВД (6)–(11) Харампурского нефтяного месторождения представлены на рис. 1–5 и в табл. 2 и 3.

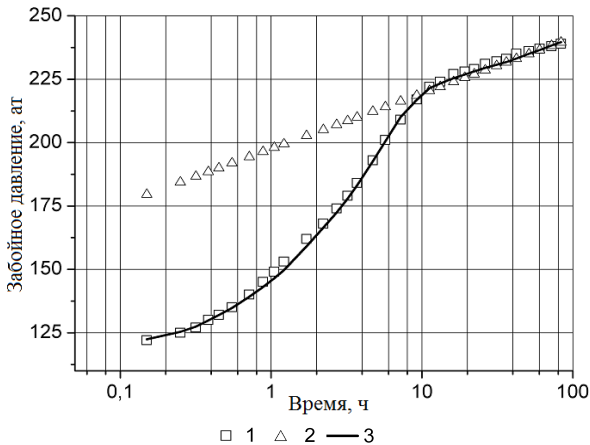


Рис. 1. Фактические и восстановленные значения забойного давления скважины №1

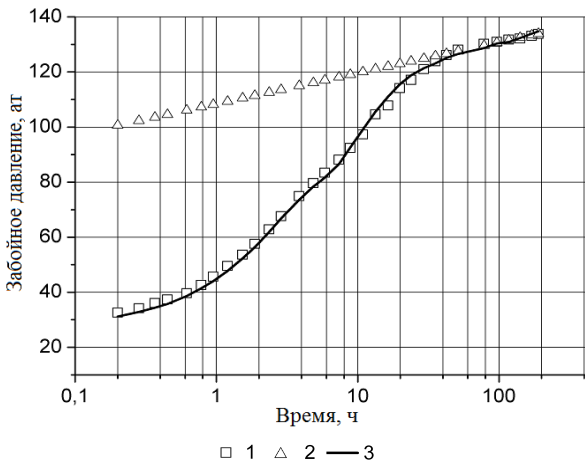


Рис. 2. Фактические и восстановленные значения забойного давления скважины №2

На рис. 1 и 2 для скважин №1 и №2, соответственно показаны фактические и восстановленные значения забойного давления (линии 1–3). Восстановленные значения забойного давления  $\hat{P}_{3,n}$  с учетом и дополнительной априорной информации о пластовом давлении без учета влияния ствола скважины изображены линией 2

$$\hat{P}_{3,n} = P(t_0) + q_0 \cdot (\alpha_{1,n}^* (u_n^*) \lg(2,25 \cdot \alpha_{2,n}^* (u_n^*) \cdot t_n)) \quad (12)$$

и с учетом влияния ствола скважины (линия 3)

$$\hat{P}_{3,n} = P(t_0) + q_0 (1 - \exp(-\alpha_{1,n}^* (u_n^*) \cdot t_n)) \times (\alpha_{2,n}^* (u_n^*) \lg(2,25 \cdot \alpha_{3,n}^* (u_n^*) \cdot t_n)), \quad (13)$$

где оценки параметров  $\alpha_{j,n}^* (u_n^*), j=1,3$  модели КВД (2) и управляющих параметров  $u_n^* = (h_{r,n}^*, k_n^*, h_3^*)$  получены путем решения последовательности оптимизационных задач (6)–(11). Решение задач по определению параметров модели КВД (6), (8) проводилось с использованием метода Гаусса–Ньютона согласно [12–14]. Для решения оптимизационных задач (7), (9), (11) использовался метод золотого сечения [16].

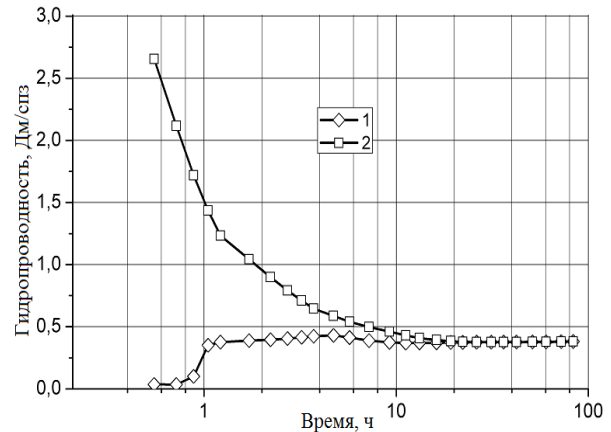


Рис. 3. Оценки гидропроводности пласта скважин №1 с учетом влияния ствола (линия 1) и без учета (линия 2)

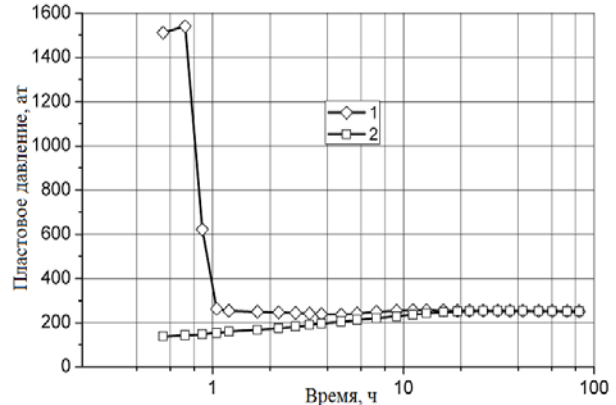


Рис. 4. Оценки пластового давления скважин №1 с учетом влияния ствола (линия 1) и без учета (линия 2)

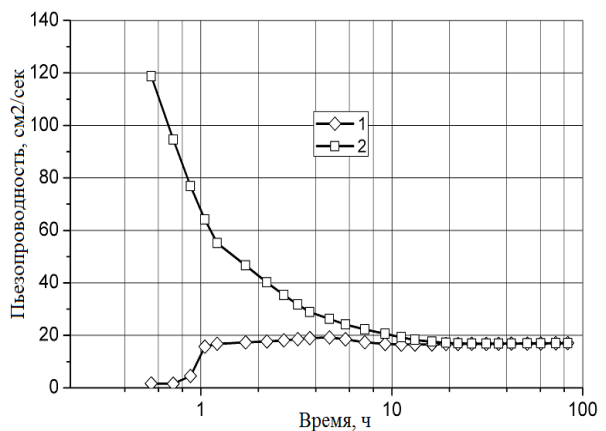


Рис. 5. Оценки пьезопроводности пласта скважин №1 с учетом влияния ствола (линия 1) и без учета (линия 2)

На рис. 3, 4 для скважины №1 приведены значения оценок гидропроводности  $\sigma_n^*$ , пластового

давления  $P_{пл,n}^*$  и пьезопроводности  $\chi_n^*$ , полученные с учетом учета влияния ствола скважины и без учета:

$$\sigma_n^* = 1 / (4\pi\alpha_{2,n}^*(u_n^*)), \quad P_{пл,n}^* = \hat{P}_{3,n}(\bar{t}_{пл});$$

$$\chi_n^* = 1 / [4\pi b_{1,n}^*(\beta_n^*, h_n^*) \cdot h \cdot \mu(m\beta_{ж} + \beta_c)],$$

где  $\hat{P}_{3,n}(\bar{t}_{пл})$  – восстановленные значения забойного давления (12), (13), полученные при экспертной оценке времени восстановления, приведенной в табл. 1.

Таблица 1  
Исходные данные и дополнительные априорные сведения

Исходные данные, дополнительные априорные сведения и экспертные оценки пласта и скважины		Скважины	
		№ 1	№ 2
Радиус, м	контура питания скважины	450	450
	скважины	0,108	0,108
Коэффициент сжимаемости нефти при пластовых условиях		$5,3 \cdot 10^{-5}$	$4,27 \cdot 10^{-5}$
Коэффициент сжимаемости системы		$1,85 \cdot 10^{-4}$	$2,35 \cdot 10^{-4}$
Пористость, %		19	22
Эффективная мощность, м		5,9	1,18
Динамическая вязкость, спз		0,9	1,14
Дебит скважин до ее остановки, тыс. м <sup>3</sup> /сут		51	17,36
Экспертные оценки	пластового давления, ат	260	150
	времени восстановления забойного давления, ч	200	100

Таблица 2  
Результаты интерпретации ГДИ скважины № 1

Методы	Время исследования, ч	Гидропроводность, Дм/спз	Пьезопроводность, см <sup>2</sup> /с	Пластовое давление, ат	Время завершения исследований t×k, ч
Saphir	1,22	1,05	37,62	415,01	83,47
	9,22	1,69	75,62	365,39	
	26,22	7,93	354,6	257,01	
	83,47	0,38	16,90	251,9	
Адаптивная интерпретация с учетом влияния ствола скважины	1,22	0,38	16,80	251,39	3,22
	9,22	0,37	16,74	251,67	
	26,22	0,38	16,79	251,14	
	83,47	0,38	17,05	249,90	
Адаптивная интерпретация без учета влияния ствола скважины	1,22	0,98	55,13	166,29	19,22
	9,22	0,43	20,57	226,46	
	19,22	0,37	16,57	252,22	
	60,26	0,37	16,65	251,58	
Адаптивная интерпретация методом наилучшего совмещения	1,72	0,33	14,59	208,18	26,22
	9,22	0,22	10,01	258,21	
	26,22	0,38	16,90	251,96	
	60,26	0,39	17,37	250,20	

В табл. 1 приведены используемые при интерпретации исходные данные и дополнительные априорные сведения для скважин №1, №2. В табл. 2, 3

приведены оценки параметров нефтяного пласта: гидропроводности, пьезопроводности и пластового давления, полученные по результатам интерпретации скважин №1и №2 за разное время проведения исследований с использованием априорной информации о пластовом давлении с учетом и без учета влияния ствола скважины, программы Saphir и с использованием традиционного метода наилучшего совмещения (без учета априорной информации и влияния ствола скважины [9]).

Из рис. 1–5 и табл. 2, 3 видно, что рассмотренный метод адаптивной интерпретации с учетом влияния ствола скважины и оптимизацией управляющих параметров по предложенной схеме решения экстремальных задач (6)–(11) позволяет без потери точности обрабатывать короткие недовосстановленные КВД, полученные в пределах 5–10 ч гидродинамических исследований, что повышает информативность гидродинамических исследований и существенно сокращает время простоя скважин.

Таблица 3  
Результаты интерпретации ГДИ скважины № 2

Методы	Время исследования, ч	Гидропроводность, Дм/спз	Пьезопроводность, см <sup>2</sup> /с	Пластовое давление, ат	Время завершения исследований t×k, ч
Saphir	1,53	1,15	7,98	190,31	190,32
	29,37	1,44	12,91	170,7	
	78,42	2,58	23,23	152,5	
	190,32	2,03	18,25	149,4	
Адаптивная интерпретация с учетом влияния ствола скважины	1,53	2,03	18,23	151,5	3,85
	29,37	2,06	18,56	148,9	
	78,42	2,01	18,02	151,8	
	190,32	2,04	18,34	150,0	
Адаптивная интерпретация без учета влияния ствола скважины	1,53	5,77	51,79	69,76	35,40
	29,37	2,13	19,12	146,42	
	78,42	2,07	18,62	149,71	
	190,32	2,08	18,65	150,39	
Адаптивная интерпретация методом наилучшего совмещения	1,53	3,79	34,03	78,33	42,40
	29,37	1,96	17,74	145,21	
	78,42	2,08	18,68	151,66	
	190,32	2,07	18,61	149,61	

**Выводы**

Для решения задачи оптимизации адаптивных алгоритмов обработки результатов гидродинамических исследований скважин нефтяных месторождений предложен способ разбиения сложной оптимизационной задачи по определению параметров модели КВД и управляющих параметров на последовательность более простых экстремальных задач.

На примере интерпретации результатов гидродинамических исследований скважин Харампурского нефтяного месторождения Тюменской области показано, что адаптивный метод обработки резуль-

татов гидродинамических исследований с учетом влияния ствола скважины, позволяет обрабатывать короткие, в пределах 5–10 ч, кривые восстановления давления, что значительно сокращает время простоя скважин.

### Литература

1. Ипатов А.И. Современные технологии гидродинамических исследований скважин и их возрастающая роль в разработке месторождений углеводородов / А.И. Ипатов, М.И. Кременецкий, Д.Н. Гуляев // Нефтяное хозяйство. – 2009. – № 1. – С. 52–55.
2. Сергеев В.Л. Метод адаптивной идентификации гидродинамических исследований скважин с учетом априорной информации / В.Л. Сергеев, А.С. Аниканов // Изв. Том. политех. ун-та. – 2010. – Т. 317, № 5. – С. 50–52.
3. Кориков А.М. Технология проектирования адаптивной системы идентификации и прогноза производственных процессов в условиях неопределенности / А.М. Кориков, В.Л. Сергеев, Д.В. Севостьянов и др. // Доклады ТУСУРа. – 2011. – № 2(24), ч. 2. – С. 189–194.
4. Гаврилов К.С. Адаптивная интерпретация нестационарных гидродинамических исследований скважин в системе «пласт–скважина» методом интегрированных моделей / К.С. Гаврилов, В.Л. Сергеев // Изв. Том. политех. ун-та. – 2012. – Т. 321, № 5. – С. 72–75.
5. Романова Е.В. Адаптивная интерпретация кривой восстановления давления горизонтальных скважин с диагностикой потоков / Е.В. Романова, В.Л. Сергеев // Изв. Том. политех. ун-та. – 2013. – Т. 323, № 5. – С. 20–25.
6. Сергеев В.Л. Адаптивная интерпретация газодинамических исследований скважин с идентификацией начального участка кривой восстановления давления / В.Л. Сергеев, Е.В. Романова // Изв. Том. политех. ун-та. – 2015. – Т. 326, № 1. – С. 111–117.
7. Хисамов Р.С. Гидродинамические исследования скважин и методы обработки результатов измерений / Р.С. Хисамов, Э.И. Сулейманов, Р.Г. Фархуллин. – М.: ОАО «ВНИИОЭНГ», 2000. – 228 с.
8. Бузинов С.Н. Исследование нефтяных и газовых скважин и пластов / С.Н. Бузинов, И.Д. Умрихин. – М.: Недра, 1984. – 269 с.
9. Horne R.N. Modern well test analysis / A computer-aided approach. – Palo Alto, California: Petroway, inc., 2000. – 257 p.
10. Bourdet D. Use of pressure derivative in well test interpretation / D. Bourdet, J.A. Ayoub, Y.M. Pirard // SPE. – 1984. – № 12777. – P. 293–302.
11. Гидродинамические исследования скважин / П.В. Мангазеев, М.В. Панков, К.Е. Кулагина и др. – Томск: Изд-во ТПУ, 2004. – 340 с.
12. Сергеев В.Л. Интегрированные системы идентификации. – Томск: Изд-во Том. политех. ун-та, 2011. – 198 с.
13. Сергеев В.Л. Адаптивная идентификация эволюционных процессов нефтегазодобычи на основе интегрированных систем феноменологических моделей /

В.Л. Сергеев, А.Г. Наймушин, К.Х. Нгуен // Изв. Том. политех. ун-та. – 2014. – Т. 323., № 1. – С. 177–183.

14. Polishchuk V.I. Adaptive Identification Method of a Signal from Stray Magnetic Field Sensor for Turbogenerator Diagnostics / V.I. Polishchuk, V.L. Sergeev // Journal of Siberian Federal University. Mathematics & Physics. – 2015. – Vol. 8(2). – P. 201–207.

15. Кориков А.М. Интеллектуальное управление в технических системах // Научный вестник НГТУ. – 2014. – № 1(54). – С. 18–26.

16. Демиденко Е.З. Линейная и нелинейная регрессии. – М.: Финансы и статистика, 1981. – 300 с.

17. Пантелеев А.В. Методы оптимизации в примерах и задачах / А.В. Пантелеев, Т.А. Летова. – М.: Высшая школа, 2002. – 544 с.

### Сергеев Виктор Леонидович

Д-р техн. наук, профессор каф. автоматизированных систем управления ТУСУРа,  
 профессор каф. геологии и разработки нефтяных месторождений института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета (НИТПУ)  
 Тел.: +8-905-992-92-31  
 Эл. почта: SergeevVL@ignd.tpu.ru.

### Ву Куанг Дык

Магистр каф. геологии и разработки нефтяных месторождений Института природных ресурсов НИТПУ  
 Тел.: 8-913-864-59-47  
 Эл. почта: vuquangducv2@gmail.com.

Sergeev V.L., Vu Q.D.

### Optimization of adaptive algorithms for identification and interpretation of hydrodynamics research considering wellbore storage

The article presents the optimization solution for adaptive algorithms aimed to process results of well tests and based on the integrated model of system pressure recovery curve with the variables and time-dependent parameters in transient mode filtering. The system allows taking into account additional a priori information and the effects of wellbore storage. The paper introduces the results of the quality of algorithms for adaptive identification and interpretation with the decisions in optimization problems which allows determining the parameters of the model of pressure recovery curve and the control parameters considering a priori information about the reservoir pressure.

**Keywords:** adaptation, identification, optimization, pressure build-up curve, well test, integrated system models, oil fields, a priori information.



УДК 629.7.05.07

П.В. Мулин, А.В. Березуев, П.С. Кудрявцев

## Способ автоматического управления тягой корабельного самолета при заходе на посадку

Рассматривается способ автоматического управления тягой корабельного самолета при заходе на посадку, позволяющий устранить ошибку стабилизации заданного посадочного значения угла атаки в установившемся режиме и обеспечить качество переходных процессов, близких к автоматам скорости, в условиях действия ветровых возмущений.

**Ключевые слова:** автоматическое управление тягой, угол атаки, корабельный самолет.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2016-19-3-103-106

Традиционно автоматы тяги (АТ) при заходе на посадку стабилизируют заданную приборную скорость полета самолета, так как в их законах управления в качестве основной информации используется сигнал ошибки выдерживания заданной скорости и поэтому их иногда называют автоматами скорости. При этом высокие требования к точности автоматического управления тягой на режиме захода на посадку обуславливают применение астатических автоматов скорости. Особенности палубной посадки накладывают дополнительные требования на точность выдерживания заданного посадочного значения угла атаки в установившемся режиме [1]. Вместе с тем для расчета посадочной скорости по заданному посадочному углу атаки необходимо знать полетную массу самолета, плотность воздуха, коэффициент подъемной силы и т.д. [2]. Однако эти данные не всегда точны. Поэтому логично формирование закона автоматического управления тягой двигателя по отклонению угла атаки от его посадочного значения. По аналогии с автоматом скорости такой АТ можно назвать автоматом угла атаки.

В настоящей работе исследовался способ автоматического управления тягой самолета при заходе на посадку, позволяющий устранить ошибку стабилизации заданного посадочного значения угла атаки в установившемся режиме и обеспечить качество процессов близких к автоматам скорости в условиях действия ветровых возмущений.

### Постановка задачи

Упрощенные уравнения возмущенного продольного движения самолета относительно программной траектории с двумя каналами управления можно записать в виде [3]

$$\dot{\omega}_z = -c_1 \omega_z - e_3 \Delta V - c_5 \Delta \dot{\alpha} - c_2 \Delta \alpha - c_3 \Delta \delta_B - r_3 \Delta P; \quad (1)$$

$$\Delta \dot{V} = -e_1 \Delta V - c_8 \Delta \alpha - c_7 \Delta \theta + r_1 \Delta P; \quad (2)$$

$$\Delta \dot{\alpha} = -e_2 \Delta V - c_4 \Delta \alpha + \omega_z - c_9 \Delta \delta_B - r_2 \Delta P; \quad (3)$$

$$\Delta \theta = \Delta \vartheta - \Delta \alpha; \quad (4)$$

$$\Delta \dot{\vartheta} = \omega_z, \quad (5)$$

где  $\Delta \delta_B$  – угол отклонения руля высоты от балансирующего значения;  $\Delta P$  – приращение силы тяги двигателя;  $\Delta$  – знак приращения;  $V$  – скорость по-

лета;  $\alpha$  – угол атаки;  $\theta$  – угол наклона траектории;  $\vartheta$  – угол тангажа;  $e_i$ ,  $r_i$  и  $c_i$  – динамические коэффициенты [3, 4].

Уравнения движения самолета (1)–(3) допускают дальнейшие упрощения. Продольное движение самолета представляют в виде изолированных короткопериодического и длиннопериодического движений [4]. Физически такое разделение определяется тем, что в процессе возмущенного движения нарушенные равновесия моментов, действующих вокруг поперечной оси самолета, и продольных, нормальных сил восстанавливаются во времени различно. Быстрее при устойчивом короткопериодическом движении восстанавливается равновесие моментов, связанное в основном с изменениями угла атаки и угловой скорости  $\omega_z$ , и гораздо медленнее – равновесие сил, связанное в основном с изменением скорости полета самолета  $V$ . Устойчивое короткопериодическое движение заканчивается за время, за которое скорость полета самолета практически не изменяется. Поэтому при исследовании динамики управления самолетом по скорости используют уравнения возмущенного длиннопериодического движения самолета относительно программной траектории, которые получают из (1)–(5), полагая мгновенную балансировку самолета по моменту тангажа [4]

$$0 = -e_3 \Delta V - c_2 \Delta \alpha - c_3 \Delta \delta_B - r_3 \Delta P,$$

$$\Delta \dot{V} = -e_1 \Delta V - (c_8 - c_7) \Delta \alpha - c_7 \Delta \vartheta + r_1 \Delta P; \quad (6)$$

$$\Delta \dot{\alpha} = -e_2 \Delta V - c_4 \Delta \alpha + \Delta \dot{\vartheta} - c_9 \Delta \delta_B - r_2 \Delta P. \quad (7)$$

АТ используется совместно с системой автоматической стабилизации траектории движения самолета, либо при совмещенном управлении: ручное управление продольным и боковым движением самолета и автоматическое управление тягой. Как в ручном режиме управления траектории, так и в автоматическом режиме изменения угла тангажа можно считать малыми ( $\Delta \vartheta \approx 0$ ). В этом случае уравнения (6)–(7) принимают вид

$$\Delta \dot{V} = -e_1 \Delta V - (c_8 - c_7) \Delta \alpha + r_1 \Delta P; \quad (8)$$

$$\Delta \dot{\alpha} = -e_2 \Delta V - c_4 \Delta \alpha - c_9 \Delta \delta_B - r_2 \Delta P. \quad (9)$$

Из уравнений (8)–(9) получим передаточную функцию (ПФ) самолета по углу атаки и скорости на изменение тяги

$$\frac{\Delta\alpha(s)}{\Delta P(s)} = \frac{-r_2(s+e_1) - \eta e_2}{s^2 + (c_4 + e_1)s + e_1 c_4 - e_2(c_8 - c_7)}; \quad (10)$$

$$\frac{\Delta V(s)}{\Delta P(s)} = \frac{r_2(c_8 - c_7) + \eta(s + c_4)}{s^2 + (c_4 + e_1)s + e_1 c_4 - e_2(c_8 - c_7)}, \quad (11)$$

где  $s$  – комплексный параметр.

Обычно значением  $r_2$  можно пренебречь. Тогда из соотношения ПФ (10), (11) находим связь между изменениями скорости и угла атаки, вызванными действием тяги:

$$\frac{\Delta V(s)}{\Delta\alpha(s)} = -\frac{s + c_4}{e_2}. \quad (12)$$

Из анализа (12) следует, что изменение скорости полета (как реакция на перемещение рычагов управления двигателями) опережает изменение угла атаки. В результате система с обратной связью по отклонению угла атаки имеет меньшие запасы устойчивости.

Возникает задача скорректировать динамические характеристики контура управления тягой по углу атаки, сделать их аналогичными управлению по отклонению скорости полета.

#### Формирование закона управления автомата угла атаки

В автомате угла атаки в качестве основной информации в законе управления должен использоваться сигнал ошибки выдерживания угла атаки от его посадочного значения. Однако с точки зрения обеспечения наилучших показателей качества переходных процессов в контуре управления тягой предпочтительней является закон управления по отклонению скорости (12). Из уравнения (7) находим связь между отклонениями скорости и угла атаки от балансировочных значений

$$\Delta V = -\frac{c_4}{e_2} \Delta\alpha - \frac{c_9}{e_2} \Delta\delta_v - \frac{r_2}{e_2} \Delta P + \frac{1}{e_2} (\Delta\dot{\vartheta} - \Delta\dot{\alpha}) \quad (13)$$

или с учетом соотношения для нормальной составляющей перегрузки  $n_y$  [2]

$$\Delta n_y = \frac{c_6}{g} (\Delta\dot{\vartheta} - \Delta\dot{\alpha}); \quad \Delta n_y = n_y - 1,$$

выражение (13) примет вид

$$\Delta V = -\frac{c_4}{e_2} \Delta\alpha - \frac{c_9}{e_2} \Delta\delta_v - \frac{r_2}{e_2} \Delta P + \frac{1}{c_6 e_2} g \Delta n_y. \quad (14)$$

Пренебрегая подъемной силой руля высоты (при малых значениях  $c_9$ ) и составляющей  $\frac{r_2}{e_2} \Delta P$  в (14), получим оценку изменения скорости полета

$$\Delta\hat{V} = -\frac{c_4}{e_2} \Delta\alpha + \frac{1}{c_6 e_2} g \Delta n_y. \quad (15)$$

Тогда закон управления автомата угла атаки можно получить с использованием штатного вычислителя

автомата скорости, используя в нем вместо сигнала отклонения скорости сигнал ее оценки (15). Данное решение позволяет, с одной стороны, обеспечить динамические характеристики контура управления тягой по углу атаки аналогичными контуру управления по скорости, а с другой стороны, при интегральном законе в вычислителе автомата скорости обеспечить в установившемся режиме на глиссаде планирования ( $\Delta n_y = 0$ ) равенство угла атаки его посадочному значению.

До сих пор мы рассматривали длиннопериодическое движение и полет в спокойной атмосфере. В короткопериодическом движении и в условиях действия ветровых возмущений появляется быстрая составляющая изменения угла атаки и нормальной перегрузки в сигнале оценки (15). Она зашумляет полезную (длиннопериодическую) составляющую, так как канал управления тягой сильно инерционный и полоса пропускания контура управления тягой существенно уже спектра частот этих составляющих сигналов. Вместе с тем введение низкочастотного фильтра для подавления высокочастотной составляющей изменения сигнала приводит к запаздыванию самого сигнала.

Решение проблемы искалось на пути комплексирования сигналов отклонения скорости полета и отклонения угла атаки без запаздывания в тракте управления. Для этого сигнал оценки скорости (15) пропускается через фильтр с ПФ

$$\frac{1}{T s + 1}, \quad (16)$$

который фильтрует высокочастотную часть сигнала (10), и дополнительно вводится сигнал отклонения скорости полета, пропущенный через фильтр с ПФ:

$$\frac{T s}{T s + 1}. \quad (17)$$

Таким образом, оценка изменения скорости полета примет вид

$$\Delta\hat{V}' = \frac{1}{T s + 1} \Delta\hat{V} + \frac{T s}{T s + 1} \Delta V. \quad (18)$$

При выполнении условия  $\Delta\hat{V} = \Delta V$  после окончания переходного процесса на фильтрах (16) и (17) имеем

$$\frac{T s + 1}{T s + 1} \Delta V = \Delta V.$$

Подставляя (15) в (18), получим

$$\Delta\hat{V}' = \frac{1}{T s + 1} \left( -\frac{c_4}{e_2} \Delta\alpha + \frac{1}{c_6 e_2} g \Delta n_y \right) + \frac{T s}{T s + 1} \Delta V. \quad (19)$$

Таким образом, в установившемся режиме управление производится по сигналу отклонения угла атаки, а в переходном режиме – по сигналу отклонения скорости. Поскольку сигнал отклонения скорости в (18) пропускается через изодромный фильтр с ПФ (17), то в нем достаточно использовать приближенное значение посадочной скорости. На рис. 1 представлена структурная схема формирования сигнала (19).

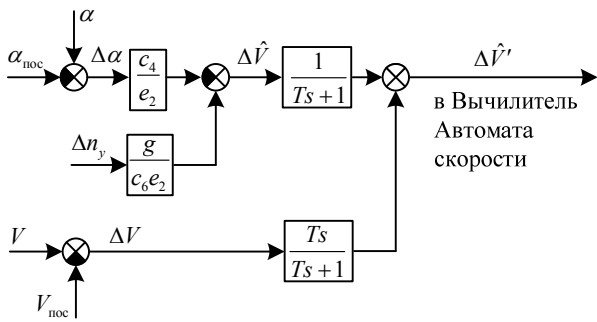


Рис. 1. Структурная схема формирования сигнала оценки отклонения скорости полета:  $\alpha_{\text{пос}}$  – заданное посадочное значение угла атаки;  $V_{\text{пос}}$  – приближенное значение посадочной скорости, соответствующее  $\alpha_{\text{пос}}$

Значение постоянной времени  $T$  в (19) выбирается исходя из допустимого времени переходного процесса на фильтрах с ПФ (16), (17), интенсивности ветровых возмущений, характеристик самолета с системой дистанционного управления (в ручном режиме) или системы стабилизации самолета на глиссаде.

**Результаты моделирования**

Для исследования характеристик АТ в режиме стабилизации была использована имитационная модель автоматического управления тягой самолета с системой дистанционного управления (СДУ). При моделировании учитывалась подъемная сила руля высоты ( $c_9 \neq 0$ ). Закон управления вычислителя автомата скорости брался в виде [5]

$$\sigma(s) = [K_{V_i} \Delta \hat{V} - K_V (1 - K_0) \dot{V}] \frac{1}{s} - K_V K_0 \frac{1}{T_{\Phi} s + 1} \Delta \hat{V} - \frac{K_{\dot{V}} T_{\Phi} s + K_{\dot{V}} + T_{\Phi} K_V K_0}{T_{\Phi} s + 1} \dot{V};$$

$\dot{V} = g(n_x + (1 - n_y)\alpha - \vartheta)$ , где  $\sigma$  – сигнал на входе исполнительного механизма АТ;  $n_x$  – продольная составляющая перегрузки;  $K_{V_i}$ ,  $K_V$  и  $K_0$  – передаточные числа;  $T_{\Phi}$  – постоянная времени фильтра.

При моделировании динамики автомата скорости предполагалось знание точного значения посадочной скорости  $V_{\text{пос}}$ , соответствующего заданному  $\alpha_{\text{пос}}$ . По результатам имитационного моделирования значение  $T$  принималось равным 0,5 с. На рис. 2 приведены характерные графики переходных процессов на встречный порыв ветра  $W_x = 1$  м/с для обоих автоматов тяги: по скорости и углу атаки.

По результатам моделирования отмечено: свойства автоматов скорости и угла атаки на горизонтальный порыв ветра отличаются незначительно. Отличие во временных характеристиках переходных процессов на вертикальный порыв ветра не превышает 10%. Ухудшение реакции у автомата атаки вызвано использованием для оценки изменения скорости полета (19) упрощенного выражения (15) вместо

(14). Вертикальный порыв ветра мгновенно изменяет угол атаки и нормальную перегрузку самолета. СДУ (система стабилизации перегрузки) отклоняет руль высоты, чтобы сохранить в короткопериодическом движении угол атаки (нормальную перегрузку), возникает подъемная сила на руле высоты, которая не учитывается в выражении (15). Как следствие, реакция по тяге в первый момент запаздывает (см. рис. 3), что и приводит к несколько большему выбросу по изменению скорости.

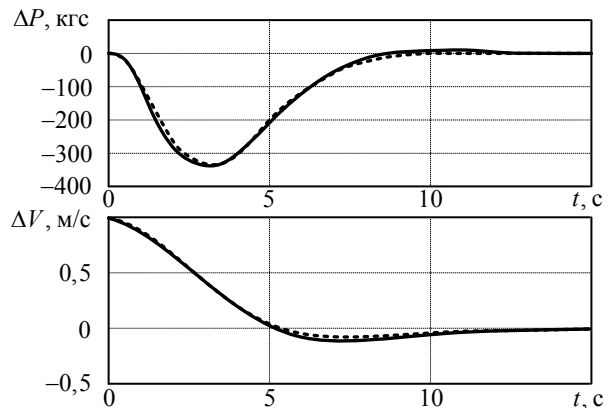


Рис. 2. Графики переходных процессов на встречный порыв ветра: - - - - автомат скорости; — — — — автомат угла атаки

На рис. 3 приведены графики переходных функций при действии вертикального порыва ветра  $W_y = 1$  м/с.

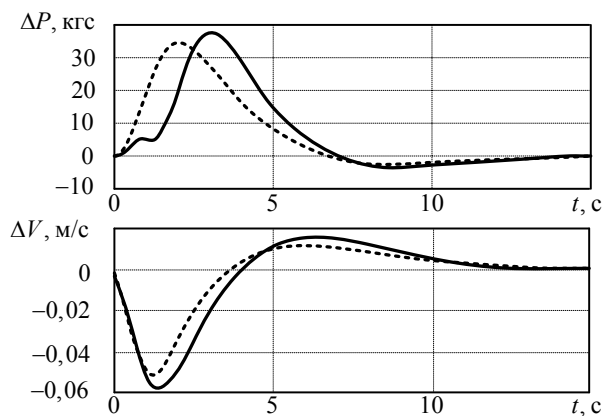


Рис. 3. Графики переходных процессов при действии вертикального порыва ветра: - - - - автомат скорости; — — — — автомат угла атаки

Коррекцией значений постоянной времени  $T$  в (19) и передаточных чисел в вычислителе АТ можно добиться еще лучшего совпадения характеристик обоих типов АТ.

**Заключение**

Предложен способ автоматического управления тягой самолета при заходе на посадку, позволяющий устранить ошибку стабилизации заданного посадочного значения угла атаки в установившемся режиме

и обеспечить качество переходных процессов близких к автомату скорости. Предлагаемый подход позволяет использовать штатные вычислители автоматов скорости.

#### *Литература*

1. Review of the carrier approach criteria for carrier-based aircraft – Phase I. Department of the navy naval air warfare center aircraft division patuxent river, Maryland, 2002. – 220 p.
2. Остославский И.В. Динамика полета. Траектории летательных аппаратов / И.В. Остославский, И.В. Стражева. – М.: Машиностроение, 1969. – 501 с.
3. Способ совместного управления вектором тяги и рулем высоты для повышения точности автоматического управления траекторным движением самолета при посадке / П.В. Мулин, А.В. Березуев, Д.М. Кушнир // Доклады ТУСУРа. – 2016. – Т. 19, № 2. – С. 61–66.
4. Михалев И.А. Системы автоматического управления самолетом / И.А. Михалев, Б.Н. Окоемов, М.С. Чикулаев. – М.: Машиностроение, 1987. – 240 с.
5. Мулин П.В. Системы автоматического управления продольным движением центра масс самолета: учеб. Пособие / П.В. Мулин, А.В. Березуев. – М.: Изд-во МАИ, 2015. – 124 с.

#### **Мулин Павел Викторович**

Канд. техн. наук, доцент каф. систем автоматического и интеллектуального управления (301)  
Московского авиационного института  
(национального исследовательского университета)  
Тел.: +7 (499) 158-41-82  
Эл. почта: pvmpro@mail.ru

#### **Березуев Александр Владимирович**

Канд. техн. наук, доцент каф. 301  
Тел.: +7 (499) 158-41-82  
Эл. почта: ber-av@mail.ru

#### **Кудрявцев Павел Сергеевич**

Канд. техн. наук, доцент каф. 301  
Тел.: +7 (499) 158-41-82  
Эл. почта: pms121@mail.ru

Mulin P.V., Berezuev A.V., Kudrayvtsev P.S.

#### **Method for automatic control of thrust of the ship aircraft when approaching the landing**

In this paper is considered a method of thrust automated control of a ship aircraft when approach the landing, that allows to eliminate a steady-state error of an angle of attack and to provide performance of response close to speed autothrottle in the conditions of wind influences.

**Keywords:** automatic thrust control, angle of attack, ship aircraft.

УДК 621.396.41

М.М. Антонов, А.А. Конев, Д.С. Никифоров, С.А. Черепанов

## Организация защищенной гетерогенной сети в автоматизированных системах коммерческого учета энергоресурсов

Создание автоматизированной системы для ЖКХ является сложной задачей. Такая система размещается на большой территории и должна отвечать высоким требованиям по надежности работы. Одной из проблем является обеспечение безопасности информации, обрабатываемой системой. В данной статье описываются подходы к решению задач, связанных с реализацией протоколов передачи данных между гетерогенными узлами автоматизированной системе коммерческого учета энергоресурсов, аутентификации и добавления в базу этих узлов.

**Ключевые слова:** маршрутизация, аутентификация, автоматизированная система коммерческого учета энергоресурсов, базы данных, гетерогенные сети, ear-psk.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2016-19-3-107-110

В настоящее время существует потребность в недорогой, простой в обслуживании, надежной и функциональной автоматизированной системе коммерческого учета энергоресурсов (АСКУЭ) для бытовых потребителей. Создание аппаратно-программного комплекса (АПК) сбора данных о потребляемых энергоресурсах с приборов учета на базе российских электронных компонентов позволит решить проблему комплексного импортозамещения. Гетерогенная организация сети позволит многократно увеличить достоверность передачи данных. Задача создания такой АСКУЭ осложняется двумя факторами – большим количеством узлов учета конечных потребителей и рассредоточением их на значительной территории, что существенно затрудняет доступ к ним через ставшие традиционными каналы передачи данных типа витая пара и интерфейс RS-485.

### Проблема гетерогенности каналов связи

Для связи устройств учета энергоресурсов (УУЭ) с устройством сбора и передачи данных (УСПД) используются PLC- и RF-каналы связи (рис. 1). Полученная в итоге сеть является сетью с гетерогенными каналами связи и различными по своему типу узлами. В частности, узлами могут яв-

ляться устройства учета таких энергоресурсов, как электроэнергия, горячая и холодная вода, тепло и т.п. К данной сети предъявлены следующие требования:

1) в сети может быть до 512 устройств. Это позволяет использовать УСПД как для обслуживания подъезда, так и для целого дома в зависимости от количества квартир;

2) сеть должна быть немобильной, т.к. УУЭ являются стационарными устройствами;

3) каналы связи должны быть гетерогенными (гетерогенными являются каналы, которые могут передавать данные по одной из нескольких доступных на выбор физических сред);

4) должна быть обеспечена гарантия доставки данных, т.к. данные, передающиеся по сети, являются коммерчески важными;

5) устройства в сети должны взаимодействовать по протоколу 6LoWPAN [1], т.к. это увеличит совместимость системы с УУЭ сторонних производителей;

6) должна быть возможность быстрого добавления новых типов устройств.

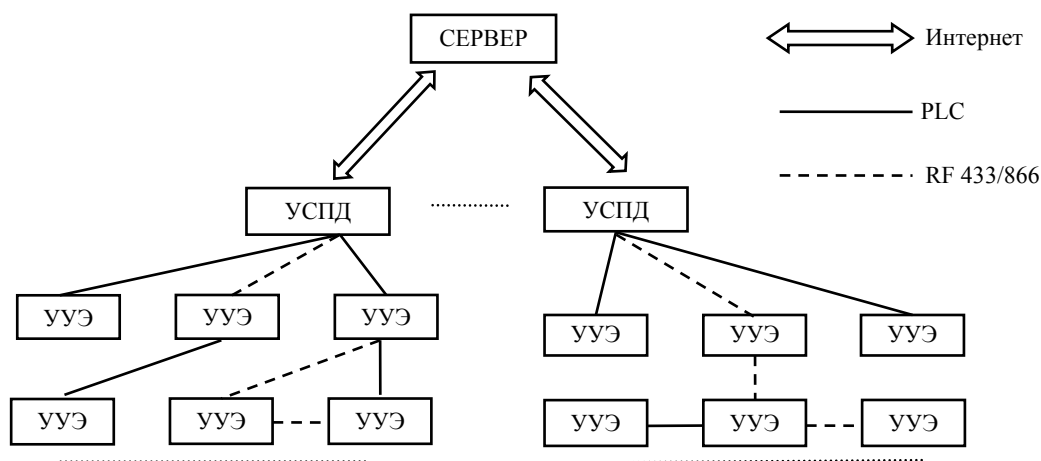


Рис. 1. Система с гетерогенными каналами связи

В ходе реализации задачи создания защищенной гетерогенной сети в АСКУЭ было проведено тестирование прототипа. Нами были выявлены следующие недостатки:

- низкая надежность доставки данных между узлами системы, расстояние между которыми превышает 15 м;
- проблема обеспечения информационной безопасности;
- проблема добавления в систему узлов новых типов.

Для решения данных проблем были поставлены задачи:

- разработка протокола маршрутизации данных в сети с гетерогенными каналами связи;
- разработка протокола аутентификации устройств внутри сети с гетерогенными каналами связи;
- разработка гибкого механизма добавления новых типов устройств в сеть с гетерогенными каналами связи.

Для обеспечения надежной доставки передаваемой информации необходима быстрая и надежная маршрутизация данных. Стандартные протоколы, как дистанционно-векторные (например, RIP, EIGRP), так и протоколы состояния канала связи (например, OSPF, IS-IS), не справляются с задачей, т.к. генерируют чрезмерное количество служебного трафика [2].

При этом некоторые протоколы маршрутизации, такие как Better Approach To Mobile Ad hoc Networking (B.A.T.M.A.N.), Optimized Link State Routing Protocol (OLSR), Babel и Dynamic Source Routing (DSR), могут частично решить вышеописанную задачу.

В таблице представлена степень удовлетворения рассмотренными протоколами ограничений, налагаемых требуемым типом сети. Если протокол удовлетворяет условию, в соответствующей ячейке ставится знак «+», иначе – знак «-».

**Соответствие протоколов условиям сети**

Протокол	Ограничения					
	1	2	3	4	5	6
BATMAN	+	+	-	+	-	-
OLSR	+	+	-	+	-	-
Babel	+	+	+	+	-	-
DSR	+	+	-	-	+	-

Таким образом, можно сделать выводы о необходимости разработки нового протокола маршрутизации.

В процессе работы был создан протокол маршрутизации в сетях с гетерогенными каналами связи «MI-LAN». Протокол поддерживает возможность передачи данных через промежуточные узлы как ретрансляторы [3], что позволяет надежно передавать данные на расстояния, большие, чем доступны при передаче данных от узла к узлу напрямую.

Моделирование показало, что сеть «MI-LAN» обеспечивает надежную передачу данных от узла к узлу на расстоянии до 500 м.

### Обеспечение безопасности передаваемой информации

Для обеспечения безопасности информации, обрабатываемой системой, необходимо предусмотреть процедуры идентификации и аутентификации для всех устройств сети. АСКУЭ является распределенной системой, компоненты которой включают в себя устройства сбора и передачи данных (УСПД) и устройства учета энергоресурсов (УУЭ). Данные устройства устанавливаются на объектах, которые необходимо контролировать. Такими объектами могут быть как промышленные предприятия, использующие АСКУЭ для контроля технических процессов, так и жилые дома, в которых необходимо рассчитать стоимость жилищно-коммунальных услуг. И если в первом случае АСКУЭ устанавливается в пределах контролируемой зоны, то во втором система распространяется на целые городские кварталы, используя существующую инфраструктуру для связи компонентов. В данном случае нет возможности контролировать все линии связи и устройства, которые используются в системе. УСПД передает данные на центральный сервер по существующим каналам связи. Для связи УУЭ с УСПД используется сеть с гетерогенными каналами связи «MI-LAN».

Проблема заключается в том, что устройства никак не контролируют ту информацию, которую получают. Таким образом, гарантировать достоверность информации, получаемой от УУЭ, невозможно. Более того, невозможно даже гарантировать того, что информация получена именно от УУЭ, а не от какого-либо несанкционированного устройства. Это позволяет исказить показания УУЭ, выводить из строя сеть «MI-LAN» либо привести к полному отказу работы системы и, как следствие, является серьезной проблемой.

Чтобы обеспечить должный уровень безопасности, необходимо предусмотреть процедуру аутентификации устройств в АСКУЭ, то есть создать перечень устройств, используемых в системе, и обеспечить процедуру идентификации и аутентификации этих устройств [4]. Внутри сети «MI-LAN» необходимо обеспечить процедуру шифрования всего трафика, необходимо обеспечить аутентификацию УСПД на серверах АСКУЭ.

Для идентификации и аутентификации устройств разрабатывается протокол аутентификации на базе EAP-PSK. Данный протокол использует предустановленный 128-битный ключ PSK в качестве секрета. Время жизни данного ключа считается неограниченным ввиду специфики его использования. Во время работы протокола происходит процедура взаимной аутентификации [5] сторон и установления между ними защищенного канала, обеспечивающего контроль целостности и конфиденциальности [6] передаваемой по нему информации. Процедура аутентификации EAP-PSK состоит из 2 раундов обмена сообщениями (рис. 2).

Протокол EAP-PSK можно использовать для взаимной аутентификации двух устройств, соеди-

ненных между собой напрямую, либо через другие устройства (в таком случае промежуточные устройства используются как ретрансляторы). Также для снятия нагрузки с устройств функции аутентифицирующей стороны можно вынести на отдельный сервер аутентификации.

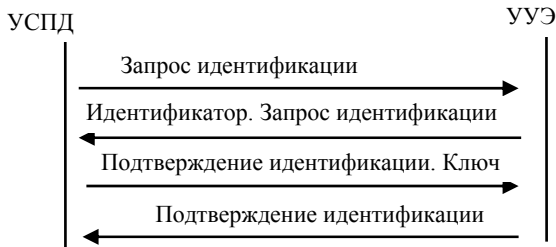


Рис 2. Раунды обмена сообщениями во время процедуры аутентификации EAP-PSK

Отличие разрабатываемого протокола от оригинального EAP-PSK состоит в том, что протокол может работать поверх различных типов каналов связи (что позволяет использовать его в сети «MI-LAN») и с различными типами устройств.

По защищенному каналу, установленному во время аутентификации устройств, производится передача ключа шифрования, общего для всех устройств внутри сети «MI-LAN». На этом ключе производится шифрование всего трафика внутри сети.

Срок жизни данного ключа составляет 30 дней. Генерация и распределение новых ключей происходит автоматически.

Такой подход позволит предотвратить внедрение в систему неавторизованных устройств, «прослушивание» сети «MI-LAN», подделку пакетов сети.

**Гетерогенность данных**

Проблема добавления новых узлов в сеть заключается в том, что гетерогенность в системе представлена не только организацией сети, но и типом собираемых, хранимых и обрабатываемых данных [7].

Для решения данной проблемы необходимо спроектировать базу данных, которая будет учитывать особенности сбора и хранения разнородных данных. Также такая база данных должна быть масштабируемой и расширяемой.

Спроектированная база данных должна удовлетворять требованиям, предъявляемым к центральному серверу, на котором она будет располагаться.

Исходя из требований к аппаратной части центрального сервера и требований в обслуживании 10000 УСПД и 255 счетчиков на каждый УСПД, в минимальной конфигурации сервера, объем дискового пространства, занимаемого базой данных, не должен превышать 500 Гб.

На основе проведенного исследования и поставленных требований была создана модель базы данных центрального сервера (рис. 3) [8].

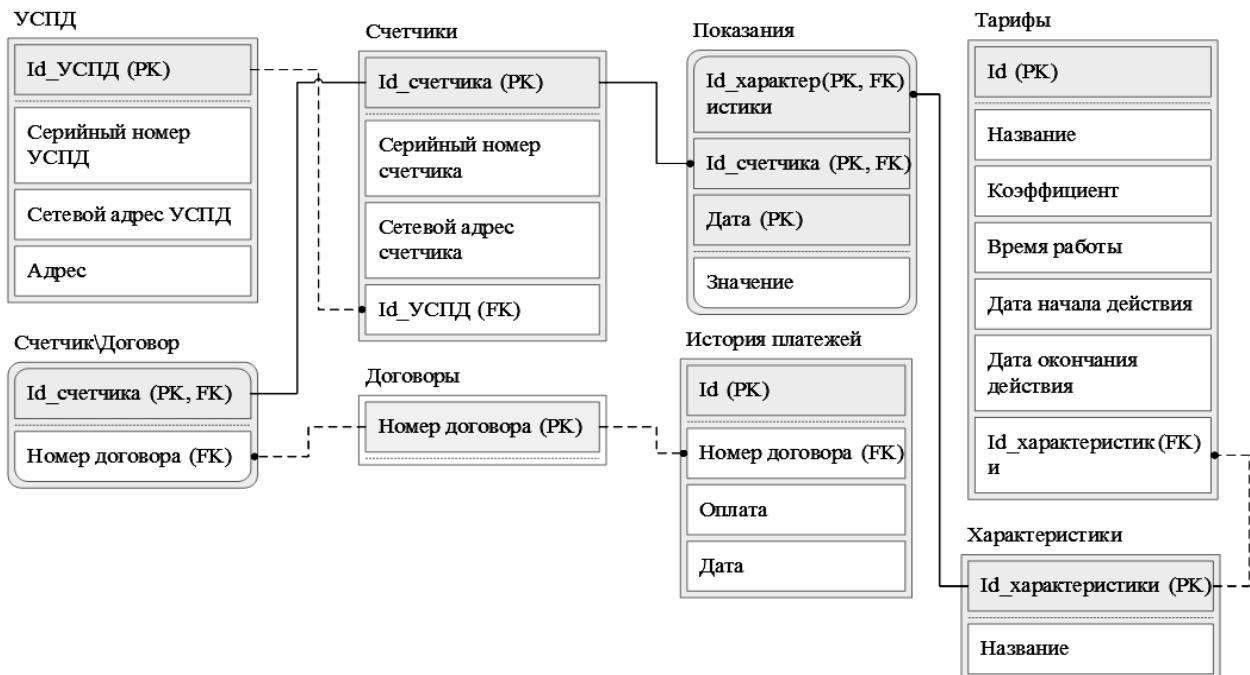


Рис. 3. Модель базы данных

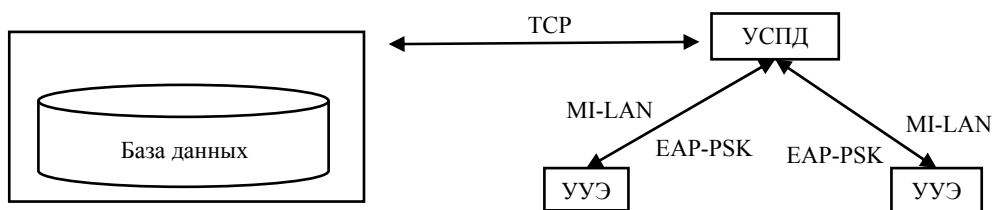


Рис. 4. Структура системы после внедрения сети «MI-LAN»

Одним из решений при проектировании БД является разделение таблиц показаний и типов показаний; таким образом, можно записывать и хранить показания, не привязываясь к их типу. Это позволяет добавлять или убирать из системы обработку любых типов собираемых данных.

Следующим решением в БД является отсутствие прямой привязки УУЭ к такой характеристике, как тип учитываемых ресурсов. Они привязаны только к договору, а уже договор учитывает тип ресурсов и всю остальную информацию, необходимую для дальнейшей обработки данных в системе.

#### Заключение

Структура системы с учетом доработок представлена на рис. 4.

В ходе работы были разработаны протоколы маршрутизации и аутентификации для сети с гетерогенными каналами связи «MI-LAN».

Сеть «MI-LAN» используется для связи УСПД и УУЭ. Помимо протоколов маршрутизации MI-LAN и аутентификации устройств, сеть «MI-LAN» включает в себя базу данных, позволяющую при необходимости добавлять правила взаимодействия с устройствами новых типов. Протокол маршрутизации «MI-LAN» обеспечивает надежную передачу данных между узлами сети, расположенными на расстоянии до 500 м друг от друга. Протокол аутентификации устройств обеспечивает надежную аутентификацию всех устройств в сети «MI-LAN», а также предоставляет защищенный канал связи во время аутентификации устройств, по которому передается общий для всей сети ключ шифрования.

Прототип данной системы внедрен и успешно эксплуатируется в жилом доме.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ по контракту № 02.G25.31.0107 от 14 августа 2014 г.

#### Литература

1. Recommendation ITU-T G.9903: Narrowband orthogonal frequency division multiplexing power line communication transceivers for G3-PLC networks [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.itu.int/rec/dologin\\_pub.asp?lang=e&id=T-REC-G.9903-201402-I!!PDF-E&type=items](https://www.itu.int/rec/dologin_pub.asp?lang=e&id=T-REC-G.9903-201402-I!!PDF-E&type=items) (дата обращения: 09.03.2016).
2. Murray D. An experimental comparison of routing protocols in multihop ad hoc networks / D. Murray, M. Dixon, T. Koziniec // Australasian Telecommunication Networks and Applications Conference. – Australasia: IEEE, 2010. – P. 159–164.
3. Маршрутизация в беспроводных мобильных ад-гос-сетях / В.М. Винокуров, А.В. Пуговкин, А.А. Пшен-

ников и др. // Доклады Том. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники. – 2010. – № 2 (22), ч. 1. – С. 288–292.

4. Шелупанов А.А. Требования к системам аутентификации по уровням строгости / А.Г. Сабанов, А.А. Шелупанов, Р.В. Мещеряков // Ползуновский вестник. – 2012. № 2–1. – С. 61–67.

5. Никифоров Д.С. Механизм защищенного взаимодействия устройства сбора и передачи данных с сервером сбора данных в автоматизированной системе коммерческого учета энергоресурсов // Электронные средства и системы управления. – 2015. – № 1, ч. 2. – С. 180–184.

6. Конев А.А. Оценка качества защищенности компьютерных сетей / А.А. Конев, А.К. Новохрестов // Динамика систем, механизмов и машин. – 2014. – №4. – С. 85–87.

7. Атре Ш. Структурный подход к организации баз данных – М.: Финансы и статистика, 1983. – 317 с.

8. Дейт К. Дж. Введение в системы баз данных. – М.: Вильямс, 2001. – 1072 с.

#### Антонов Максим Михайлович

Аспирант каф. комплексной информационной безопасности электронно-вычислительных систем (КИБЭВС) ТУСУРа  
Тел.: +7-999-620-15-23  
Эл. почта: amm@csp.tusur.ru

#### Конев Антон Александрович

Канд. техн. наук, доцент каф. КИБЭВС  
Тел.: (382-2) 70-15-29, доб. 2980  
Эл. почта: kaal@keva.tusur.ru

#### Никифоров Дмитрий Сергеевич

Аспирант каф. КИБЭВС  
Тел.: +7-999-620-20-64  
Эл. почта: nds@csp.tusur.ru

#### Черепанов Сергей Андреевич

Аспирант каф. КИБЭВС  
Тел.: +7-923-424-59-74  
Эл. почта: sivkinpunk@gmail.com

Antonov M.M., Konev A.A.,  
Nikiforov D.S., Cherepanov S.A.

#### Development of a protected network for an automated system of energy control and accounting

Creation of automated systems for housing and communal services is a challenge. Such a system is located in a large area, and must meet high reliability standards. One of the problems is the security of information processed by the system. This article explains the approaches to problem solving, when creating such a network.

**Keywords:** routing, authentication, ASCAE, databases, heterogeneous networks, eap-psk.



УДК 004.056.53

А.К. Новохрестов, Д.С. Никифоров, А.А. Конев, А.А. Шелупанов

## Модель угроз безопасности автоматизированной системы коммерческого учета энергоресурсов

Статья посвящена модели угроз безопасности автоматизированной системы коммерческого учета энергоресурсов. В качестве модели системы для описания угроз используется многоуровневая модель, построенная с помощью атрибутивного метаграфа вложенности 3. Рассматриваются аппаратный и программный уровни системы. Комплексно учитываются угрозы конфиденциальности, целостности и доступности информации, а также угрозы конфиденциальности и целостности информационной системы. Таким образом, был составлен максимально полный перечень, для разрабатываемой системы, состоящий из более 80 угроз.

**Ключевые слова:** информационная безопасность, угроза, модель угроз.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2016-19-3-111-114

В настоящее время значительную роль при проектировании и разработке информационных систем играет обеспечение безопасности информации, передаваемой при работе этих систем по сети. Это относится и к разрабатываемой автоматизированной системе коммерческого учета энергоресурсов (АСКУЭ), задача создания которой осложняется большим количеством узлов учёта конечных потребителей и рассредоточением их на значительной территории [1]. Неавторизованное воздействие на элементы системы может нарушить конфиденциальность, целостность или доступность передаваемых данных или даже функционирование системы в целом.

Однако прежде чем переходить к минимизации возможности неавторизованного воздействия на систему, необходимо оценить защищенность разрабатываемой системы [2]. Одними из важнейших этапов оценки защищенности являются построение модели угроз безопасности рассматриваемой системы, а также построение модели нарушителя [3]. Задачей настоящей работы является создание максимально полного перечня угроз безопасности разрабатываемой системы и обрабатываемой в ней информации в условиях, когда известна структура системы, но не известен ее состав.

Применяется подход к построению модели угроз безопасности информационной системы, который описан в [4] и [5].

Существующие модели угроз безопасности, такие как в [6, 7] а также в [8, 9], в явном виде не описывают угрозы безопасности информационной системы. Каждая из рассмотренных моделей может учитывать те или иные угрозы, которые не описаны в другой.

В большинстве рассмотренных моделей нет тематической формализации, т.е. все угрозы безопасности описаны посредством словесных перечней и указаний, что может привести к тому, что разные эксперты, использующие эти модели при оценке защищенности, могут трактовать их по-своему.

### Структура системы

В качестве модели системы для описания угроз безопасности используется многоуровневая модель, построенная с помощью атрибутивного метаграфа

вложенности 3. Взаимодействие между объектами в модели информационной системы происходит по правилам взаимодействия объектов в эталонной модели OSI. Использование метаграфов при построении модели позволяет получить полный перечень угроз безопасности информации и системы. Подход к построению модели системы описан в [10], он предполагает разделение системы на уровень сетей, уровень операционных систем и уровень программного обеспечения (ПО). В данном случае из-за отсутствия полной информации об используемом аппаратном и программном обеспечении используется упрощенный вариант модели системы, предполагающий разделение на аппаратный и программный уровни.

АСКУЭ можно представить совокупностью объектов трех типов:

- центральный сервер (ЦС);
- устройство сбора и передачи данных (УСПД);
- устройство учета энергоресурсов (УУЭ).

Простейший вариант системы представлен на рис. 1.



Рис. 1. Структура системы

Система имеет древовидную структуру, то есть ЦС взаимодействует с несколькими УСПД, УСПД взаимодействует с несколькими УУЭ. Все правила взаимодействия между элементами системы могут быть описаны в понятиях модели OSI. Пользователи системы могут напрямую работать с каждым объектом. Формулировка «пользователь» обозначает не самого оператора системы, а устройство, с помощью которого он с ней взаимодействует.

Рассматриваются аппаратный и программный уровни системы. К аппаратному уровню системы относятся все устройства системы, линии связи и протоколы низкого уровня. К программному уровню системы относятся операционные системы и про-

граммное обеспечение устройств, протоколы высокого уровня, программы конфигурирования устройств.

Согласно [10] двухуровневую систему  $G$  можно представить как совокупность множества устройств  $X_1$  (в него входят ЦС, а также все УСПД и УУЭ), множества программного обеспечения устройств  $X_2$ , множества связей на аппаратном уровне  $E_1$  и множества связей на программном уровне  $E_2$ :

$$G=(X_1, X_2, E_1, E_2). \quad (1)$$

### Угрозы безопасности информации

Информация в системе передается от объекта к объекту по каналу связи и хранится на объектах системы. Учитываются угрозы конфиденциальности, целостности и доступности информации [11]. При этом система из двух объектов, соединенных каналом связи, подвержена следующим угрозам:

- угроза целостности информации вследствие получения информации из неавторизованного источника;

- угроза конфиденциальности информации вследствие отправления информации неавторизованному объекту;

- угроза конфиденциальности и целостности информации вследствие воздействия на канал связи;

- угроза конфиденциальности и целостности информации из-за уязвимости канала;

- угроза доступности информации вследствие перегрузки или разрушения канала.

Применительно к АСКУЭ данный перечень необходимо рассмотреть для каждой связанной пары объектов, представленной на рис. 1, при этом стоит учитывать, что угрозы могут быть реализованы на различных уровнях. Далее рассмотрены примеры угроз безопасности информации.

Угроза целостности информации вследствие получения информации из неавторизованного источника на аппаратном уровне выражается возможностью ошибки выбора области памяти при отправке данных, на программном уровне – возможностью обработки команды от неавторизованного источника (УСПД, ЦС или пользователя) или получения данных от неавторизованного УУЭ, УСПД или ЦС.

Угроза конфиденциальности информации вследствие отправления информации неавторизованному объекту на аппаратном уровне выражается возможностью ошибки выбора области памяти при отправке данных, на программном – в возможности отправки команды на неавторизованное устройство либо отправки данных неавторизованному пользователю.

Угроза конфиденциальности информации вследствие воздействия на канал связи на аппаратном уровне выражается в возможности высокочастотного навязывания на канале связи, на программном уровне – в возможности проведения атаки «человек посередине».

Угроза целостности информации вследствие воздействия на канал связи на аппаратном и программном уровнях выражается в возможности внедрения в канал ложных пакетов информации.

Угроза конфиденциальности информации из-за уязвимости канала на аппаратном уровне обусловлена наличием паразитного электромагнитного излучения, на программном уровне – в возможности существования ошибок в протоколах передачи данных.

Угроза целостности информации из-за уязвимости канала на аппаратном уровне может быть реализована вследствие большого количества помех в канале связи, на программном уровне – вследствие возможности возникновения ошибок в работе протоколов передачи данных.

Угроза доступности информации на аппаратном уровне выражается в возможности уничтожения канала связи, на программном – в возможности проведения атаки на отказ в обслуживании.

### Угрозы безопасности системы

Угрозы, которым подвергается автоматизированная система, – это угрозы, связанные с несанкционированным изменением структуры этой системы, или угрозы, связанные с несанкционированным изменением параметров элементов системы. Угрозы можно разделить на две группы: угрозы безопасности самой информационной системы и угрозы безопасности средств защиты информации [11]. В данный момент, так как система защиты еще не разрабатывалась, угрозы безопасности средств защиты информации не рассматриваются.

К угрозам конфиденциальности относятся угрозы, связанные со сбором информации о системе. К данной информации могут относиться список идентификаторов устройств, версии программного обеспечения, политики разграничения доступа, аутентификационные данные и т.д.

К угрозам целостности информационной системы относятся угрозы:

- несанкционированное добавление объекта в систему;

- несанкционированное удаление объекта из системы;

- подмена авторизованного объекта системы неавторизованным;

- создание несанкционированного канала связи между двумя объектами;

- уничтожение канала связи между объектами системы;

- подмена канала связи между двумя объектами;

- изменение атрибутов элементов системы и связей между элементами.

Данный перечень необходимо рассмотреть для каждой связи и объекта, представленных на рис. 1. В данном случае пользователь как часть системы не рассматривается.

Возможные способы реализации каждой угрозы из представленного перечня кратко расписаны для аппаратного уровня в табл. 1 и для программного уровня в табл. 2.

Рассмотрим примеры некоторых угроз целостности для системы, представленной в (1). Согласно [5] и [12] угроза удаления элемента из множества устройств, составляющих систему, будет выражена, как (2):

$$G'=(X_1 \setminus x_1^l, X_2, E_1, E_2), \quad (2)$$

где  $x_1^l$  – один из элементов системы ( $l$  – номер элемента).

Если взять в качестве удаляемого элемента УУЭ ( $x_1^l$ ), тогда данное выражение будет соответствовать угрозе «несанкционированное удаление УУЭ» из табл. 1.

Угроза добавления элемента во множество устройств системы будет выражена, как (3):

$$G''=(X_1 \cup x_1^{m+1}, X_2, E_1, E_2), \quad (3)$$

где  $m$  – количество элементов системы.

Если взять в качестве добавляемого элемента УУЭ ( $x_1^{m+1}$ ), тогда данное выражение будет соответствовать угрозе «несанкционированное добавление УУЭ» из табл. 1.

Угроза подмены элемента множества устройств системы выражается как последовательность из действий (2) и (3).

Таблица 1

**Угрозы системе на аппаратном уровне**

Элементы системы	Н/с* добавление элемента	Н/с удаление элемента	Подмена объекта системы	Создание н/с канала связи	Уничтожение канала связи	Подмена канала связи	Изменение атрибутов
Связь УУЭ – УСПД	Н/с добавление УУЭ или УСПД	Н/с удаление УУЭ или УСПД	Подмена УУЭ или УСПД	Используй-е н/с линии связи	Повреждение линии связи, помехи на линии связи	Используй-е н/с линии связи вместо санкционир.	Изменение MAC-адреса УУЭ или УСПД
Связь УСПД – ЦС	Н/с добавление УСПД или ЦС	Н/с удаление УСПД или ЦС	Подмена УСПД или ЦС	Используй-е н/с линии связи	Повреждение линии связи, помехи на линии связи	Используй-е н/с линии связи вместо санкционир.	Изменение MAC-адреса УУЭ или УСПД
УУЭ	Подключение н/с оборудования	Н/с удаление компонента УУЭ	Н/с замена компонента УУЭ	Создание н/с связей между комп. УУЭ	Уничтожение связей между комп. УУЭ	Изменение связей между комп. УУЭ	Н/с изменение крит. парам. УУЭ
УСПД	Подключение н/с оборудования	Н/с удаление компонента УСПД	Н/с замена компонента УСПД	Создание н/с связей между комп. УСПД	Уничтожение связей между комп. УСПД	Изменение связей между комп. УСПД	Н/с изменение крит. парам. УСПД
ЦС	Подключение н/с оборудования	Н/с удаление компонента ЦС	Н/с замена компонента ЦС	Создание н/с связей между комп. ЦС	Уничтожение связей между комп. ЦС	Изменение связей между комп. ЦС	Н/с изменение крит. парам. ЦС

\* Несанкционированное.

Таблица 2

**Угрозы системе на программном уровне**

Элементы системы	Н/с добавление элемента	Н/с удаление элемента	Подмена объекта системы	Создание н/с канала связи	Уничтожение канала связи	Подмена канала связи	Изменение атрибутов
Связь УУЭ – УСПД	Н/с добавление УУЭ или УСПД (в логическую сеть)	Н/с удаление УУЭ или УСПД (на прогр. уровне)	Подмена УУЭ или УСПД	Используй-е н/с драйвера или протокола	DoS-атака, удаление драйвера	Используй-е н/с драйвера или протокола	Изменение IP-адреса УУЭ или УСПД
Связь УСПД – ЦС	Н/с добавление УСПД или ЦС (в логическую сеть)	Н/с удаление УСПД или ЦС (на прогр. уровне)	Подмена УСПД или ЦС	Используй-е н/с драйвера или протокола	DoS-атака, удаление драйвера	Используй-е н/с драйвера или протокола	Изменение IP-адреса УУЭ или УСПД
УУЭ	Внедрение н/с ПО	Н/с удаление ПО	Н/с замена ПО	Создание н/с связей между комп. УУЭ	Уничтожение связей между комп. УУЭ	Изменение связей между комп.	Н/с изменение крит. парам. УУЭ
УСПД	Внедрение н/с ПО	Н/с удаление ПО	Н/с замена ПО	Создание н/с связей между ПО	Уничтожение связей между ПО	Изменение связей между ПО	Н/с изменение крит. парам. УСПД
ЦС	Внедрение н/с ПО	Н/с удаление ПО	Н/с замена ПО	Создание н/с связей между ПО	Уничтожение связей между ПО	Изменение связей между ПО	Н/с изменение крит. парам. ЦС

**Механизмы защиты от угроз**

Следующим шагом после описания угроз безопасности идет описание механизмов защиты, которые должны присутствовать в системе для минимизации возможности неавторизованного воздействия. Далее приведен перечень механизмов защиты для аппаратного уровня системы.

Так, для защиты от угроз несанкционированного добавления элемента в систему и подмены элемента системы должна быть реализована иденти-

фикация и аутентификация устройств системы, а также контроль целостности каждого отдельного устройства.

Минимизировать возможность реализации угрозы удаления элемента системы, а также уничтожения канала связи можно только организационными методами защиты.

Для защиты от создания несанкционированного канала связи, подмены канала, а также изменения атрибутов системы необходимо реализовать иден-

тификацию и аутентификацию пользователей системы в совокупности с разграничением доступа к параметрам системы.

#### Закключение

Таким образом, для разрабатываемой АСКУЭ на основе математических моделей угроз безопасности информации и информационной системы был составлен перечень, состоящий из более 80 угроз. В нем учтены все угрозы, приведенные в моделях угроз безопасности [6–9], при этом из описания модели угроз исключена модель нарушителя.

Дальнейшая работа с моделью угроз будет производиться после выбора протоколов и технологий взаимодействия между элементами, а также реализации самих элементов системы. Для выбранных протоколов и технологий можно будет выделить угрозы, зависящие от особенностей их построения и работы, а также выделить из рассмотренного перечня актуальные и неактуальные угрозы. Возможность реализации актуальных угроз должна быть устранена или сведена к минимуму после разработки и внедрения системы защиты. При этом комплексный подход к составлению модели угроз позволил разработчикам конкретизировать требования к наличию необходимых механизмов защиты уже на этапе проектирования системы.

Однако необходимо учитывать, что с развитием сетевых технологий появляются новые способы неавторизованного воздействия, а также выявляются ранее обнаруженные ранее уязвимости используемых технологий. Следовательно, существует необходимость периодической переоценки защищенности и обновления списка актуальных угроз с последующей модернизацией системы защиты.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ по контракту № 02.G25.31.0107 от 14 августа 2014.

#### Литература

1. Сапронов А.А. Требования, критерий оптимальности и функция цели АСКУЭ для бытового и мелкомоторного сектора электрических сетей напряжением 0,4 кВ // Энергосбережение и водоподготовка. – 2006. – № 6. – С. 57–58.
2. Новохрестов А.К. Оценка качества защищенности компьютерных сетей / А.К. Новохрестов, А.А. Конев // Динамика систем, механизмов и машин: матер. XI Междунар. науч.-техн. конф. – Омск: ФГБОУ ВПО «Омский государственный технический университет», 2014. – № 4. – С. 85–87.
3. Миронова В.Г. Модель нарушителя безопасности конфиденциальной информации / В.Г. Миронова, А.А. Шелупанов // Информатика и системы управления. – 2012. – № 1 (31). – С. 28–35.
4. Конев А.А. Подход к построению модели угроз защищаемой информации // Доклады Том. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники. – 2012. – Т. 1, № 2. – С. 34–39.
5. Новохрестов А.К. Математическая модель угроз информационной системе / А.К. Новохрестов, А.А. Конев // Перспективы развития фундаментальных наук [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://sciencepersp.tpu.ru/Arch/Proceedings\\_2016\\_vol\\_7.pdf](http://sciencepersp.tpu.ru/Arch/Proceedings_2016_vol_7.pdf), свободный (дата обращения: 02.09.2016). – С. 99–101.

6. Базовая модель угроз безопасности персональных данных при их обработке в информационных системах персональных данных [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://fstec.ru/component/attachments/download/289> свободный (дата обращения: 10.09.2016).

7. The STRIDE Threat Model [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://msdn.microsoft.com/en-us/library/ee823878\(v=cs.20\).aspx](https://msdn.microsoft.com/en-us/library/ee823878(v=cs.20).aspx), свободный (дата обращения: 10.09.2016).

8. Модели механизмов реализации типовых угроз безопасности РВС [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://bugtraq.ru/library/books/attack/chapter03/02.html?k=9>, свободный (дата обращения: 10.09.2016).

9. Yuill J. Intrusion-detection for incident-response, using a military battlefield-intelligence process / J. Yuill, F. Wu, J. Settle, F. Gong // Computer Networks. – 2000. – No. 34. – P. 671–697.

10. Новохрестов А.К. Многоуровневая модель информационной системы на основе атрибутивных метаграфов / А.К. Новохрестов, А.А. Конев // Электронные средства и системы управления: сб. тр. XI Междунар. науч.-практ. конф. – Томск: ТУСУР, 2015. – № 1, 2. – С. 184–188.

11. Шелупанов А.А. Основы информационной безопасности / А.А. Шелупанов, Р.В. Мещеряков, Е.Б. Белов, В.П. Лось. – М.: Горячая линия – Телеком, 2011. – 558 с.

12. Basu A. Metagraphs and their applications / A. Basu, R. Blanning. – New York: Springer US, 2007. – 174 p.

---

#### Новохрестов Алексей Константинович

Аспирант каф. комплексной информационной безопасности электронно-вычислительных систем (КИБЭВС) ТУСУРа  
Тел.: +7 (382-2) 70-15-29, внут. 2966  
Эл. почта: nak1@keva.tusur.ru

#### Никифоров Дмитрий Сергеевич

Аспирант каф. КИБЭВС  
Тел.: +7 (382-2) 70-15-29, внут. 2981  
Эл. почта: nds@csp.tusur.ru

#### Конев Антон Александрович

Канд. техн. наук, доцент каф. КИБЭВС  
Тел.: +7 (382-2) 70-15-29, внут. 2980  
Эл. почта: kaal@keva.tusur.ru

#### Шелупанов Александр Александрович

Д-р техн. наук, профессор каф. КИБЭВС  
Тел.: +7 (382-2) 70-15-29, внут. 2950  
Эл. почта: saa@keva.tusur.ru

Novokhrestov A.K., Nikiforov D.S.,  
Konev A.A., Shelupanov A.A.

#### Model of threats to automatic system for commercial accounting of power consumption

Development of information system requires consideration of the issues of information security. Security system designing requires a preliminary assessment of the protected object. One of the most important phases of the security assessment is to identify threats to information and system. This article discusses the model of threats to automatic system for commercial accounting of power consumption.

**Keywords:** information security, security assessment, model of threats, integrity of information system.

УДК 004.02

Е.В. Саломатина

## Ресурсный подход к понятию «умный город»

Проблемы эффективного распределения ресурсов требуют своего решения в различных сферах деятельности человека. Увеличение численности и размеров городских агломераций, выявление и решение возникающих при этом проблем обуславливают необходимость рационального управления городской системой. В концепции умного города можно выделить несколько ключевых моментов, одним из которых является оптимальное распределение ресурсов на базе инфраструктуры информационно-коммуникационных технологий. В работе приводится содержательная постановка прикладной задачи и строится общая математическая модель проблемы распределения ресурсов в иерархической системе.

**Ключевые слова:** инфраструктура информационно-коммуникационных технологий, умный город, социотехническая система, умные ресурсы, Интернет вещей, оптимальное распределение ресурсов.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2016-19-3-115-120

Глобальным трендом нашего времени является продолжающаяся во всём мире миграция населения из сельской местности в города. Особенно быстрые темпы урбанизации характерны для стран с низким и средним уровнем дохода. По данным Департамента ООН по экономическим и социальным вопросам, чуть более половины населения мира живёт в городах, и эта цифра, как ожидается, увеличится до двух третей к 2050 г. [1] (рис. 1). Увеличение численности и размеров городских агломераций, выявление и решение возникающих при этом проблем обуславливают необходимость рационального управления городской системой.

Город является сложной социально-экономической системой, в которой должен быть сохранен баланс интересов и жителей, и городских властей, и управляющих, и ресурсоснабжающих организаций.

Благодаря преимуществам, предоставляемым совместным использованием разнообразных инфраструктур (информационной, транспортной, социальной, экономической и др.), города развиваются в экономическом и социальном плане. Но с каждым годом развитие городов порождает громадное количество проблем: обеспечение водой, электроэнергией, питанием, жильём, транспортом и др. Многие страны ставят перед собой задачи реализации проектов умных городов (цифровой город, интеллектуальный город, Smart City, Data-driven city). Но не существует единого подхода к понятию «умного» города. В основе каждого лежат ключевые показатели эффективности, которые выдвигаются самими городами: забота об окружающей среде, энергоэффективность, безопасность, удобство, имидж, всеобщая автоматизация и т.д.

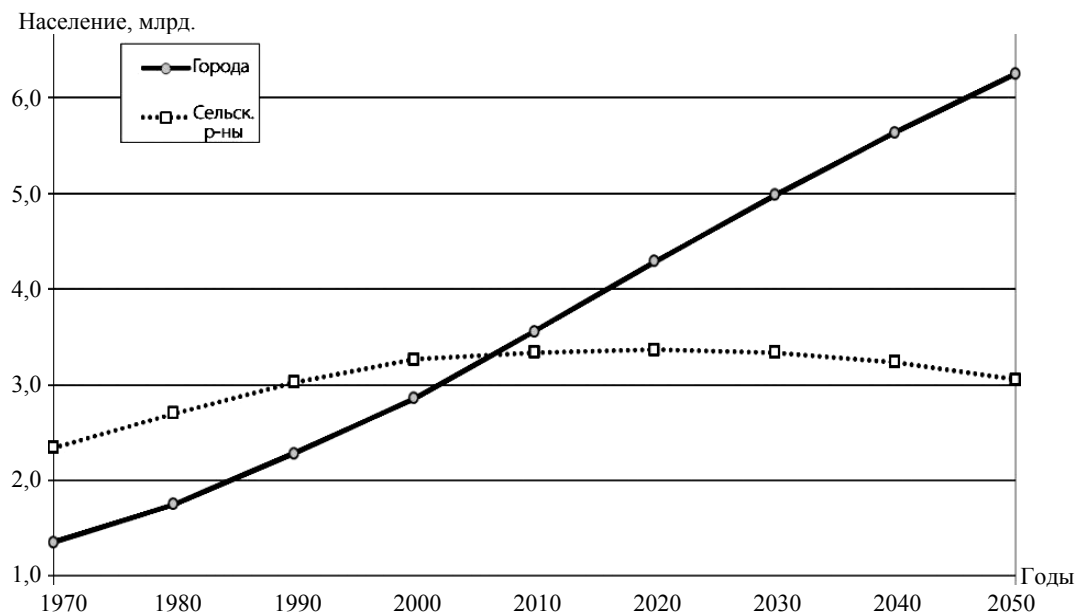


Рис. 1. Оценочная численность городского и сельского населения, 1970–2050 годы.

Источник: ООН, мировая демографическая ситуация, 2014

European Innovation Partnership on Smart Cities and Communities предлагает умные города рассматривать как системы людей, взаимодействующих и

использующих потоки энергии, материалов, услуг и финансов для стимулирования устойчивого экономического развития, обеспечения высокого качества

жизни. В процессе городского планирования и управления потоки и их взаимодействия становятся интеллектуальными путем стратегического использования информационно-коммуникационной инфраструктуры и услуг, которые в свою очередь реагируют на социальные и экономические потребности общества [2].

В отчете Smart cities (Preliminary Report 2014) Технического комитета ISO/IEC JTC 1 приводятся несколько определений умного города [3]:

- это новая концепция и новая модель, которая применяет новое поколение информационных технологий, таких как Интернет вещей, облачные вычисления, Большие данные и географические информационные системы, в целях содействия планированию, строительству, управлению и умным услугам городов;

- это термин, обозначающий эффективную интеграцию физических, цифровых и человеческих систем в искусственной среде для обеспечения устойчивого, процветающего и инклюзивного будущего для своих граждан;

- это инновационный город, который использует информационные и коммуникационные технологии (ИКТ), а также другие средства, чтобы улучшить качество жизни, эффективность городской эксплуатации и услуг, а также конкурентоспособность, гарантируя, что удовлетворяет потребности нынешнего и будущих поколений относительно экономических, социальных и экологических аспектов.

Умный город является динамической системой, использующей большое количество разнообразных ресурсов (человеческих, социальных, технических и др.). Виктор Чернышёв в своём докладе определил умный город как «комплекс программно-технических решений и организационных мероприятий, направленных на эффективное использование всех видов ресурсов (электричество, вода, газ/тепло, пространство, время...) и создающих условия для удобного пребывания в городе, комфортного проживания и ведения бизнеса» [4]. В европейских проектах умных городов подчёркивается важность социального и человеческого капитала, в том числе уровня и качества образования людей, творческого потенциала, наукоемких рабочих мест, сотрудничества между заинтересованными сторонами [5, 6].

#### **Инфраструктура умного города**

Более 80% мирового ВВП производится в городах. Городская инфраструктура является основой для существования и развития города. Состояние городской среды в умном городе определяется не просто наличием инфраструктуры, а оптимальным распределением разнообразных ресурсов на ее базе. Умный город как социотехническая система состоит из небольших, автономных, неуклонно повышающих свой интеллектуальный уровень систем (ЖКХ, транспорт, здравоохранение, государственные услуги и др.). Системы умного города взаимосвязаны и взаимозависимы, различные функциональные компоненты могут одновременно использоваться во

многих подсистемах. Общий интеллект города равен сумме интеллектов, составляющих ее систем, умноженной на синергетический эффект.

К. Майнцер называет систему «умной», если она в состоянии эффективно и самостоятельно решать более или менее сложные задачи. Степень интеллекта обуславливают измеряемые, не зависящие от деятельности человека величины: а) степень самостоятельности (автономии) системы; б) степень эффективности метода решения проблемы и в) степень сложности проблемы [7].

Достижения в области информационных и коммуникационных технологий (ИКТ) открывают окно возможностей для решения огромных проблем, с которыми сталкиваются современные города. Ключевым моментом умного города являются умные технологии, которые позволяют эффективно управлять ресурсами. Умный город использует информационно-коммуникационные технологии, чтобы сделать важнейшие компоненты городской инфраструктуры и его услуги более интерактивными и эффективными. Инфраструктура ИКТ связывает различные инфраструктурные уровни и обеспечивает обмен информацией между ними, оказывает поддержку в продвижении инноваций многим разновидностям инфраструктур, хотя в основном независимо друг от друга. Инфраструктура умного города состоит из физической, цифровой и коммуникационной составляющих. Актуальным является вопрос о возможности интеграции этих инфраструктур на базе использования существующих «умных» ресурсов. Отдельно взятый ресурс невозможно назвать умным, только коллективные взаимодействия ресурсов и их соединения при наличии определенных благоприятных условий порождают умное состояние. Такой подход признает взаимозависимость между городскими системами. Каждый из ресурсов играет двойную роль: с одной стороны, он является вкладом, а с другой – результатом использования. Создается своеобразный непрерывный цикл, который при эффективном использовании ресурсов направлен на развитие городских систем и инфраструктур завтрашнего дня и в конечном итоге обеспечивает повышение качества жизни жителей [8].

Основу ресурсного подхода составляет сбор и анализ данных из источников, внедрённых в физической среде, а также данных, предоставляемых самим гражданами непосредственно, а также косвенно через их поведенческие модели [9–11]. В работе [12] умный город определяется через эффективность, достигаемую на основе интеллектуального управления и интегрированных ИКТ, а также активного участия граждан в развитии города. На сегодняшний день менее 1% от вещей в нашем окружении подключено к Интернету; это составляет около 10 миллиардов из потенциальных 1,5 триллиона вещей. Сложные системы нуждаются в механизмах контроля, чтобы находить баланс. Благодаря технологии Интернет вещей (IoT), городская среда становится более взаимосвязанной и контролируемой. Системы

управления, встроенные в современные технические устройства и состоящие из множества сенсоров и исполняющих устройств, невозможно однозначно отнести к объектам физического или виртуального мира. Технология Интернета вещей интегрирует окружающие предметы с датчиками, которые получают информацию о свойствах предмета или параметрах среды вокруг предмета, преобразуют получаемую информацию к машиночитаемому виду. В дальнейшем эта информация может использоваться для межмашинного или человеко-машинного взаимодействия. IoT путем сбора, обработки и анализа данных, полученных с помощью разнообразных датчиков, обеспечивает систему мониторинга и контроля физического мира [13]. С помощью полученной информации можно автоматически контролировать потоки ресурсов и приспосабливаться к изменениям. Данные могут обрабатываться в режиме реального времени и дополнять традиционные виды информации, что повышает оперативность и качество принятия решений.

### Оптимальная модель распределения ресурсов

Задачи распределения ресурсов в сложных системах занимают особое место среди прикладных задач линейного программирования. Поиск эффективных алгоритмов их решения обусловлен важной особенностью моделируемых объектов – большой размерностью. Значимость проблемы определяется также ограниченностью ресурсов и тем, что понятие эффективности ресурсов может быть различным. То есть общая эффективность функционирования сложной иерархической системы зависит как от количества ресурсов, так и от их распределения. Исследование проблем распределения ресурсов проводилось в трудах таких выдающихся ученых, как Е.Г. Гольштейн [14], Л.В. Канторович [15], Д.Б. Юдин [16], В.М. Полтерович [17] и др.

Рассматривается управляемая система, которая под влиянием управляющих воздействий меняет свое начальное состояние. В системе присутствует  $m$  элементов (участников) с выпуклыми функциями полезности  $f_k(x_k)$ ,  $k = 1, 2, \dots, m$ . Участники представлены с различным соотношением ресурсов  $n$  и находятся во взаимодействии друг с другом. Состояниями системы будем называть  $n \times m$ -мерные векторы  $x = (x_1, \dots, x_k, \dots, x_m)$ . Из всего множества элементов выделяется группа контролируемых участников  $\alpha$ . Процессы перераспределения ресурсов будут допускаться между всевозможными группами по  $\Theta$  или меньше субъектов, количество одновременно взаимодействующих участников не превосходит некоторого фиксированного числа, меньшего числа всех участников  $2 \leq \Theta < m$ . Ресурсы в процессе обмена должны переходить к тем субъектам, которые могут их использовать более эффективно. Под эффективным будем подразумевать использование ресурсов именно в необходимых количествах, без формирования излишков. Процесс перераспределения ресурсов представляет некоторое преобразование, пере-

водящее систему из состояния  $x^{s-1} = (x_1^{s-1}, \dots, x_k^{s-1}, \dots, x_m^{s-1})$

в состояние  $x^s = (x_1^s, \dots, x_k^s, \dots, x_m^s)$  такое, что ресурсы участников, не входящих во множество  $\alpha$ , остаются без изменения. В момент времени  $s = 0, 1, \dots$  участник обладает набором ресурсов  $x_k^s$ , в начальный момент –  $x_k^s = x_k^0$ . Суммарное количество ресурсов

ограничено и неизменно  $\sum_{k=1}^m x_k^s = \sum_{k=1}^m x_k^0$ . В результате

решения задачи распределение ресурсов должно соответствовать эффективной схеме функционирования системы при условии выполнения всех ограничений. Среди ограничений задачи могут присутствовать ограничения ресурсного, технологического и/или организационного типа. В иерархических системах ресурсные ограничения накладываются на элементы системы, их связи и на суммарные объемы ресурсов [18].

Вильфредо Парето предложил считать распределение ресурсов экономически эффективным, если ни одно перераспределение не может быть улучшено без ухудшения его у другого участника. Целью данной работы является обобщение результатов [17] на случай, когда перераспределение ресурсов обеспечивает каждому  $k$ -му участнику значение целевой функции не меньшее, чем  $f_k(x_k^0)$  и хотя бы одному – большее.

Изменение ресурсов для  $k$ -го субъекта, участвующего в обмене в момент времени  $s$ , соответствует вектору  $x_k^s - x_k^{s-1}$ . В процессе перераспределения принимается во внимание только информация об ее участниках. Таким образом, в момент  $s = 1$  выбирается некоторое множество  $\alpha_1$  участников и совершается сделка, в результате которой система переходит из состояния  $x^0$  в состояние  $x^1$ . Затем выбирается новая группа участников  $\alpha_2$  и осуществляется переход в состояние  $x^2$  и т.д. в результате сделки группа участников  $\alpha_s$  перераспределяет свои ресурсы так, чтобы максимизировать сумму полезностей. Ресурсы других участников не изменяются.

Рассматривается задача

$$\left. \begin{aligned} \sum_{k \in \alpha_s} f_k(x_k) &\rightarrow \max, \\ \sum_{k \in \alpha_s} x_k &= \sum_{k \in \alpha_s} x_k^{s-1}, \\ x_k &\geq 0, \quad k \in \alpha_s, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

и  $x_k^s$ ,  $k \in \alpha_s$  является ее решением. В результате обмена сумма полезностей группы участников  $\alpha_s$  должна быть максимальной.

В работе [19] показано, что при обмене одним ресурсом решение задачи возможно путем парных сделок. За счет повторения случайных последовательностей парных сделок вида (1) можно добиться оптимального распределения одного ресурса между

всеми участниками. Но при наличии двух ресурсов оптимизирующая последовательность парных сделок уже может не существовать. Пусть имеется два ресурса ( $u, v$ ) и три участника. Через  $u_k$  и  $v_k$  обозначим количество ресурсов у  $k$ -участника. Вектор  $\mathbf{x}_k$  содержит две компоненты  $\mathbf{x}_k = (u_k; v_k)$ . Предположим, что начальное распределение ресурсов характеризуется табл. 1.

Т а б л и ц а 1  
Начальное распределение ресурсов

	1	2	3
$f_k$	$\min(u_1; v_1)$	$0,4u_2$	$0,4v_3$
$u_k$	0	1	0
$v_k$	0	0	1

Видно, что никакие парные обмены в этой ситуации не приводят к увеличению суммарной полезности. Но при одновременной передаче обоих ресурсов первому участнику суммарная полезность возрастает до 1. Таким образом, несмотря на то, что функции полезностей отдельных участников уменьшились, суммарное значение функций полезностей участников увеличилось.

Задачи оптимального распределения ресурсов характеризуются неопределённостью параметров моделей этих задач. Разным моделям могут соответствовать ресурсы различной природы (временные, трудовые, энергетические и др.). Основной причиной неопределённости является случайный характер величин, количественно характеризующих эффективность использования ресурсов. При каких условиях участники обмена рассмотренного выше примера должны согласиться на перераспределение ресурсов, уменьшающее функции полезностей у некоторых участников? Можно предположить, что функции полезностей выражены в одинаковых единицах (например, денежных) и одновременно с процессом обмена производятся денежные расчеты.

Перед сделкой ценность имеющегося у  $k$ -го участника количества ресурсов  $x_k^0$  равна  $f_k(x_k^0)$ , и требуется, чтобы после обмена суммарная ценность выручки была не менее этой величины. Если  $k$ -й участник передаёт  $l$ -му часть своих ресурсов, то  $l$ -й обязывается выплатить ему некоторую часть денег. Пусть  $\mathbf{x}_k^0, \mathbf{x}_l^0$  и  $\mathbf{x}_k^1, \mathbf{x}_l^1$  – векторы ресурсов соответственно до и после сделки. Уменьшение функции полезности одного из участников перекрывается увеличением функции полезности другого:

$$f_k(\mathbf{x}_k^1) + f_l(\mathbf{x}_l^1) \geq f_k(\mathbf{x}_k^0) + f_l(\mathbf{x}_l^0).$$

Для участников из группы  $\alpha$  необходимым и достаточным условием существования решения задачи является следующее неравенство:

$$\sum_{k \in \alpha} f_k(\mathbf{x}_k^1) \geq \sum_{k \in \alpha} f_k(\mathbf{x}_k^0). \quad (2)$$

В результате сделки суммарная полезность возрастает на величину  $\sum_{k \in \alpha} f_k(\mathbf{x}_k^1) - \sum_{k \in \alpha} f_k(\mathbf{x}_k^0)$  и может

быть распределена пропорционально заранее заданным коэффициентам  $a_k > 0, \sum_{k \in \alpha} a_k = 1$ .

В результате в распоряжении  $l$ -го участника оказывается суммарный выигрыш:

$$a_l \left[ \sum_{k \in \alpha} f_k(\mathbf{x}_k^1) - \sum_{k \in \alpha} f_k(\mathbf{x}_k^0) \right]. \quad (3)$$

Другой способ организации платежей основан на использовании цен. В этом случае  $l$ -й участник в результате сделки приобретает право на получение денег в количестве

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i (x_{il}^0 - x_{il}^1). \quad (4)$$

Здесь  $\lambda_i$  – цена  $i$ -го ресурса,  $i = 1, 2, \dots, n$ ;  $x_{il}^0, x_{il}^1$  – количества  $i$ -го ресурса у  $l$ -го участника соответственно до и после сделки. Для того чтобы сделка была выгодна всем участникам, выбор цен  $\lambda_i$  должен обеспечивать выполнение неравенства

$$f_l(x_l^1) + \sum_{i=1}^n \lambda_i (x_{il}^0 - x_{il}^1) \geq f_l(x_l^0) \quad (5)$$

для всех  $l=1, 2, \dots, m$ . В качестве  $\lambda_i$  можно использовать множители Лагранжа задачи (1).

Сформулируем условия, при которых из любого начального состояния с помощью последовательностей обменов ресурсами вида (1) между  $\Theta$  участниками можно прийти к оптимуму, дающему решение задачи и максимизирующему сумму полезностей всех участников. Распределение ресурсов, когда ни одна из сделок не даёт положительного приращения суммарной полезности, будем считать тупиковым. Распределение оптимальное в смысле Парето является тупиковым. Однако из рассмотрения примера (табл. 1) следует, что тупиковая точка может и не быть оптимальной. Это обстоятельство связано с дифференциальными свойствами функций  $f_k(x_k)$ . Дифференцируемость функций  $f_k(x_k)$  в точке  $x_k^0 = (x_{1k}^0, \dots, x_{ik}^0, \dots, x_{nk}^0)$  означает, что малое приращение  $\Delta_i$  каждого  $i$ -ресурса не зависит от приращений,

получаемых остальными ресурсами, и равна  $\frac{df_k}{dx_{ik}} \Delta_i$ ,

частная производная  $\frac{df_k}{dx_{ik}}$  в точке  $x_k^0$  выполняет

роль внутренней цены  $i$ -го ресурса для  $k$ -участника. В общем случае для каждого фиксированного состояния множество ресурсов образует группы, так что ценность малого приращения каждого ресурса для данного участника зависит от приращения других ресурсов из той же группы и не зависит от приращений остальных ресурсов. Группа ресурсов, обладающая данным свойством, называется комплектом. Если функция полезности определяется как  $\min(u; v)$  и  $u = v$ , то оба ресурса образуют комплект, так как ценность приращения одного из них зависит от того, какое приращение получил другой. Если же



$u = 1, v = 2$ , то ценность малого приращения каждого ресурса определяется независимо от приращения другого: увеличение первого ресурса увеличивает на такую же величину функцию полезности; малое изменение ресурса  $v$  на величину  $\min(u,v)$  не влияет. Поэтому в точке  $u = 1, v = 2$  пара ресурсов не образует комплекта. Если все функции полезности дифференцируемы в рассматриваемой точке, то каждый отдельный ресурс составляет комплект.

Предположим, что ни в одной точке максимальное число ресурсов, образующих комплект, не превосходит некоторого числа  $\tau$ . Очевидно, что  $1 \leq \tau \leq n$  ( $n$  – число всех ресурсов). Оказывается, что если любая сделка, включающая  $\tau + 1$  участника, допустима, то любая тупиковая точка является оптимальной. Отсюда следует возможность оптимально перераспределить ресурсы за счет цепочки взаимодействий, в каждом из которых участвует не более  $\tau + 1$  субъекта. В частности, если все функции полезности дифференцируемы, то  $\tau = 1$  и для достижения оптимума достаточно парных сделок. Аналогичный вывод имеет место для случая одного ресурса и без условия дифференцируемости.

Оптимум Парето должен выбираться так, чтобы ни одна из функций полезности не убывала, но найдется ли для произвольного начального состояния последовательность сделок, обеспечивающая достижение оптимума Парето для всех участников? Оказывается, что если на каждом шаге допустимы сделки между не более чем  $n - 1$  участником, то такая последовательность может не существовать даже при линейных функциях полезности. В качестве примера рассмотрим табл. 2.

Таблица 2

Начальное распределение ресурсов			
	1	2	3
$f_k$	$u_1 + v_1$	$v_2 + w_2$	$0,2w_3 + u_3$
$u_k$	1	0	0
$v_k$	0	2	1
$w_k$	0	0	3

Видно, что любой парный обмен обязательно ухудшает состояние одного из участников. Например, передача ресурса  $w$  от третьего участника второму хотя и увеличивает сумму полезностей, но уменьшает функцию полезностей третьего участника. Второй участник не может компенсировать третьему это уменьшение: единственное, что он может предложить взамен, ресурс  $v$  бесполезен для третьего участника. Но путем сделки между тремя участниками можно одновременно улучшить состояние всех, если первый передаст весь свой ресурс третьему, третий – второму, а второй – первому, если в начальном состоянии функции полезности имели вид

$$\begin{aligned} u_1 + v_1 &= 1, \\ v_2 + w_2 &= 2, \\ 0,2w_3 + u_3 &= 0,6. \end{aligned}$$

После сделки функции полезности участников примут вид

$$\begin{aligned} u_1 + v_1 &= 2, \\ v_2 + w_2 &= 3, \\ 0,2w_3 + u_3 &= 1. \end{aligned}$$

Для формирования оптимизирующей последовательности сделок достаточно на каждом шаге выбирать допустимую сделку, которая дает наибольшее приращение суммарной полезности. Такой перебор требует централизованной информации. Очень часто передача всей информации в один центр невозможна или нерациональна, и выделяется специальный участник («центр»), через которого осуществляется координация, при этом непосредственные контакты между участниками отсутствуют.

**Выводы**

Устойчивая урбанизация требует, чтобы города расширяли необходимую инфраструктуру для водоснабжения и санитарии, энергетики, транспорта, информации и связи; обеспечивали равный доступ к услугам; сохраняли природные активы в пределах города и прилегающих районов. Комплексный подход к городскому планированию и управлению реализуется в рамках концепции умного города, главной целью которой является повышение качества жизни населения не только городов, но и сельских районов. Город рассматривается как единый организм, осуществляющий оптимальное распределение ресурсов на базе взаимосвязанных и взаимозависимых ИКТ-систем. Благодаря технологиям Big Data и IoT городская среда становится более взаимосвязанной и контролируемой. На базе использования существующих «умных» ресурсов возможна интеграция физической, цифровой и коммуникационной составляющих инфраструктуры умного города.

Эффективность функционирования сложной иерархической системы зависит как от количества ресурсов, так и от их распределения. За счет повторения случайных последовательностей парных сделок вида

$$\left. \begin{aligned} \sum_{k \in \alpha_s} f_k(x_k) &\rightarrow \max; \\ \sum_{k \in \alpha_s} x_k &= \sum_{k \in \alpha_s} x_k^{s-1}; \\ x_k &\geq 0, \quad k \in \alpha_s \end{aligned} \right\}$$

можно добиться оптимального распределения ресурсов между всеми участниками. Ресурсы в процессе обмена должны переходить к тем участникам, которые могут их использовать более эффективно.

Необходимое и достаточное условие «осуществимости» сделки можно записать в виде неравенства

$$\sum_{k \in \alpha} f_k(\mathbf{x}_k^1) \geq \sum_{k \in \alpha} f_k(\mathbf{x}_k^0).$$

Если все функции полезности дифференцируемы в рассматриваемой точке, то каждый отдельный ресурс составляет комплект.

Распределение ресурсов считается целесообразным, если в результате происходит увеличение функции полезности хотя бы одного из участников и

ни для одного из них полезность не уменьшается. Также такое распределение является оптимальным в смысле Парето.

Для существования оптимизирующей последовательности сделок достаточно на каждом шаге выбирать такую допустимую сделку, которая дает наибольшее приращение суммарной полезности.

#### Благодарности

Выражаю глубокую благодарность своему научному руководителю – академику Национальной академии наук Республики Армения, заслуженному работнику связи РФ, д.т.н. Вильяму Карповичу Сарьяну, за идею и помощь в подготовке данной статьи.

#### Литература

1. Мировая демографическая ситуация, 2014 год (краткий доклад) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.un.org/en/development/desa/population/publications>, свободный (дата обращения: 03.09.2016).
2. European Innovation Partnership on Smart Cities and Communities – Strategic Implementation Plan, 2013 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ec.europa.eu/eip/smartcities>, свободный (дата обращения: 03.09.2016).
3. ISO/IEC JTC 1 – Smart cities. Preliminary Report 2014 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.iso.org/iso/publication\\_item.html?pid=PUB100363](http://www.iso.org/iso/publication_item.html?pid=PUB100363), свободный (дата обращения: 03.09.2016).
4. Чернышёв В. Умный город: рождение детальной концепции. Презентации участников круглого стола «Умный город 2013: задачи–решения–результаты». Инфраструктура «Умного города» – оптимальные решения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.cnews.ru/articles/umnyy\\_gorod\\_rozhdnie\\_detalnoy\\_koncepcii](http://www.cnews.ru/articles/umnyy_gorod_rozhdnie_detalnoy_koncepcii), свободный (дата обращения: 03.09.2016).
5. Smart cities in perspective – A comparative European study by means of self-organizing maps / K. Kourtiti, P. Nijkamp, D. Arribas // *Innovation (Abingdon)*. – 2012. – Vol. 25, No. 2. – P. 229–246.
6. Smart cities in Europe / A. Caragliu; C. Del Bo, P. Nijkamp // *Journal of urban technology*. – 2011. – Vol. 18, No. 2. – P. 65–82.
7. Maimier K. KI – Künstliche Intelligenz. Grundlagen intelligenter Systeme. – Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft, 2003. – 296 С.
8. Саломатина Е.В. Ресурсное взаимодействие // *Всемир. науч. конф. «Актуальные проблемы фундаментальных и прикладных наук в современном информационном обществе»*; труды 56-й науч. конф. МФТИ. – М.: МФТИ, 2013. – 157 с.
9. Сарьян В.К. Массовые информационно-управленческие сети – основа инфокоммуникационной среды будущего // *IV Междунар. отраслевая науч.-техн. конф. «Технологии информационного общества»: Программа научно-технических секций*. – М.: МТУСИ, 2010. – С. 6.
10. Назаренко А.П. Способ повышения предсказательного потенциала существующих систем мониторинга и исследование природных ресурсов и промышленных объектов / А.П. Назаренко, В.К. Сарьян, Е.В. Саломатина // *II Междунар. конф. «Инжиниринг & телекоммуникации En&T–2015»*. 18–19 ноября, 2015 г. – М.: МФТИ, 2015. – С. 40–41.
11. Сарьян В.К. Перспективы использования больших данных для определения показателей развития ИКТ / В.К. Сарьян, Н.А. Сущенко // *Труды НИИР*. – 2012. – № 4. – С. 30–35.
12. Pero, ¿Qué es una Smart City? / G. Seisdedos. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.coit.es/archivo-bit/marzo-2012/el-camino-hacia-las-smart-cities-pero-que-es-una-smart-city>, свободный (дата обращения: 03.09.2016).
13. Бутенко В.В. IoT – новая точка развития ИКТ и средство кардинального повышения адаптивных возможностей человека при взаимодействии с ухудшающейся антропогенной средой / В.В. Бутенко, А.П. Назаренко, В.К. Сарьян // *Труды 54-й науч. конф. МФТИ: «Радиотехника и кибернетика»*. 10–30 ноября, 2011 г. – М.: МФТИ, 2011. – С. 11–12.
14. Гольштейн Е.Г. Задачи линейного программирования транспортного типа // Е.Г. Гольштейн, Д.Б. Юдин. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1969. – 324 с.
15. Канторович Л.В. Экономический расчет наилучшего использования ресурсов. – М.: Изд-во АН СССР, 1960. – 345 с.
16. Юдин Д.Б. Экстремальные модели в экономике // Д.Б. Юдин, А.Д. Юдин. – М.: Экономика, 1979. – 288 с.
17. Полтерович В.М. Математические модели перераспределения ресурсов. – М.: АН СССР ЦЭМИ, 1970. – 108 с.
18. Прилуцкий М.Х. Распределение ресурсов в иерархических системах транспортного типа: учеб.-метод. матер. по программе повышения квалификации «Новые подходы в исследованиях и разработках информационно-телекоммуникационных систем и технологий» / М.Х. Прилуцкий, Л.Г. Афраймович. – Нижний Новгород, 2007. – 80 с.
19. Тенисберг Ю.Д. Некоторые модели коллективного поведения в динамических процессах формирования рыночных цен // *Автоматика и телемеханика*. – 1969. – № 7. – С. 137–147.

#### Саломатина Елена Васильевна

Аспирант каф. электромагнитной совместимости и управления радиочастотным спектром (ЭСЦУРС) Московского технического университета связи и информатики (МТУСИ)  
Тел.: +3 737-782-61-81  
Эл. почта: salolew@spsu.ru

Salomatina E.V.

#### Resource approach to the concept of «Smart City»

Problems of efficient allocation of resources need to be addressed in the various spheres of human activity. The increasing in the number and size of urban agglomerations, identifying and resolving arising problems necessitates a rational urban system management. In the concept of smart city there are several key points, one of which is the optimal allocation of resources based on the infrastructure of information and communication technologies. The paper presents a meaningful staging applications as well as describes how a general mathematical model of resource allocation problems in a hierarchical system is built.

**Keywords:** infrastructure of information and communication technologies, smart city, socio-technical systems, smart resources, Internet of things, the optimal allocation of resources.

# **ЭЛЕКТРОТЕХНИКА**



УДК 621.314.1:001.891.573

В.И. Апасов, Ю.А. Шурыгин

## Влияние коэффициента усиления сигнала ошибки звена обратной связи на характер работы комбинированного преобразователя

Рассмотрен комбинированный преобразователь со стабилизацией выходного напряжения. Дана математическая модель подобного устройства, основанная на обыкновенных дифференциальных уравнениях. Проведено бифуркационное исследование влияния изменения коэффициента усиления на качество выходного напряжения. Определен допустимый диапазон значений коэффициента усиления, обеспечивающий работоспособность устройства при различных режимах функционирования.

**Ключевые слова:** система электропитания, комбинированный преобразователь напряжения, коммутационная функция, бифуркационные диаграммы.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2016-19-3-123-127

Современный космический аппарат (КА) является сложнейшим электротехническим комплексом, соединяющим в себе множество устройств [1]. При его проектировании и изготовлении используются самые передовые достижения науки и техники. Основопологающим для гарантированной работы КА на орбите в течение всего заданного срока активного существования является наличие на борту системы электропитания (СЭП), обеспечивающей энергией заданного качества всех потребителей. Подобные системы должны иметь высокую надежность, поэтому в СЭП применяют различные приемы как аппаратного, так и программного резервирования.

В большинстве разработок СЭП КА строятся на параллельно-последовательной структуре (рис. 1), которая позволяет наиболее полно использовать энергию первичных источников, а также обеспечить индивидуальные зарядно-разрядные характеристики батарей [1]. Поддержание напряжения на выходных шинах при работе от солнечной батареи (СБ) обеспечивается стабилизатором напряжения (СН), а при работе от аккумуляторной батареи (АБ) – разрядным устройством (РУ), для восполнения энергии АБ служит зарядное устройство (ЗУ).

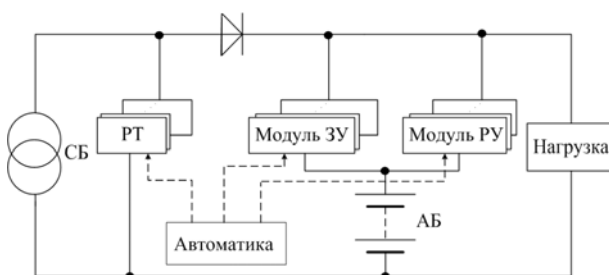


Рис. 1. Параллельно-последовательная структура

В качестве основы для построения модулей подсистем СН, ЗУ и РУ выступают импульсные преобразователи напряжения (ИПН), применение которых в данной схеме обусловлено их хорошими удельными характеристиками. В последних разработках как отечественных, так и зарубежных приборостроителей достигнут уровень коэффициента полезного действия примерно 96–97% [2–6]. Благодаря

таким показателям можно существенно снизить энергопотери в мощных комплексах и уменьшить массу бортовых теплоотводящих систем. При проектировании подобных СЭП имеется тенденция унификации силовых модулей, что позволяет использовать для каждой платформы КА конкретную архитектуру и избежать излишней аппаратной избыточности. К тому же применение унифицированных модулей существенно сокращает сроки и стоимость разработки СЭП. Так, согласно открытым источникам, цена выведения 1 кг полезной нагрузки на околоземную орбиту составляет от 5 000 до 11 000 долларов.

### Постановка задачи

Рассматриваемый комбинированный преобразователь (структурная схема преобразователя приведена на рис. 2) может быть использован при построении унифицированного модуля СЭП КА.

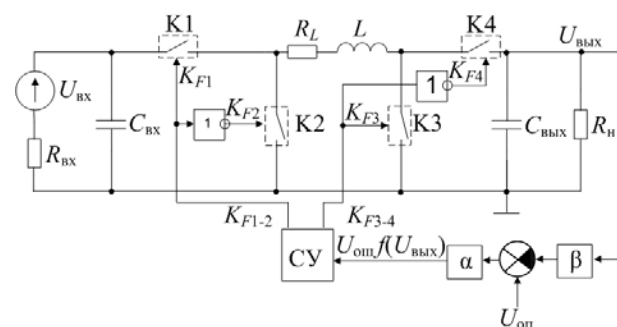


Рис. 2. Структурная схема комбинированного преобразователя со стабилизацией входного напряжения

На рис. 2  $U_{вх}$  – напряжение входного источника; K1–K4 – силовые коммутационные компоненты;  $L$  – индуктивность накопительного дросселя;  $C_{вх}$ ,  $C_{вых}$  – емкости входного и выходного фильтра соответственно;  $R_L$ ,  $R_{вх}$ ,  $R_n$  – активные сопротивления обмотки дросселя, входного источника и выходной нагрузки соответственно;  $U_{ош} f(U_{вых})$  – сигнал ошибки системы управления;  $\alpha$  – коэффициент усиления сигнала ошибки звена обратной связи;  $U_{оп}$  – напряжение опорного источника напряжения;  $\beta$  – коэффициент пропорционального звена обратной связи.

Силовой преобразователь строится из последовательно соединенных понижающего и повышающего ИПН с общим дросселем [7–9]. Данная схема позволяет получать выходное напряжение той же полярности, что и входное, как ниже, так и выше его по номиналу. Основным ее недостатком является наличие четырех коммутационных компонентов при одновременном протекании тока как минимум по двум из них. Такое свойство схемы снижает ее КПД, повысить который возможно применением полностью управляемых полупроводниковых ключей с «мягкой» коммутацией и снижением динамических потерь преобразователя.

В большинстве разработок СЭП КА (как отечественных, так и зарубежных) для обеспечения гарантированной работы КА во время всего срока активного существования напряжения СБ и АБ должны быть или больше, или меньше выходного напряжения. Нарушение же подобного соотношения вследствие того, что параметры первичных источников энергии со временем претерпевают существенную деградацию (так, напряжение холостого хода СБ после года эксплуатации снижается на 20–30%), ведет к отказу подсистем СЭП (РУ, СН, ЗУ) и, в зависимости от ситуации, к полной потере работоспособности всего КА. Построение же модулей этих подсистем на основе комбинированного преобразователя позволяет избежать такого развития.

Исходя из вышеизложенного, разработка высоконадежного унифицированного силового модуля для применения в подсистемах СЭП КА является актуальной задачей.

**Теория**

При проектировании модулей для разработчика важно уже на этапе разработки максимально полно изучить как линейную, так и нелинейную динамику работы комбинированного преобразователя, которая описывается нелинейными кусочно-непрерывными уравнениями [10]. Также в ходе разработки устройства важно провести его бифуркационное исследование, которое позволяет определить границы допустимых значений параметров схемы, обеспечивающих работу устройства в наиболее оптимальных (одноцикловых) режимах [11–13].

Математическая модель комбинированного преобразователя записывается в виде системы обыкновенных дифференциальных уравнений с переменными матрицами состояний **A** и **B** для каждого из возможных состояний схемы, зависящих от коммутационных функций  $K_F(\xi)$  [14, 15]:

$$\begin{aligned} \frac{d\mathbf{X}}{dt} &= \mathbf{A}_1(K_F(\xi))\mathbf{X} + \mathbf{B}_1(K_F(\xi)), \text{ при } t \in ((k-1)\tau; t_{k1}); \\ \frac{d\mathbf{X}}{dt} &= \mathbf{A}_2(K_F(\xi))\mathbf{X} + \mathbf{B}_2(K_F(\xi)), \text{ при } t \in (t_{k1}; t_{k2}); \\ \frac{d\mathbf{X}}{dt} &= \mathbf{A}_3(K_F(\xi))\mathbf{X} + \mathbf{B}_3(K_F(\xi)), \text{ при } t \in (t_{k2}; k\tau), \end{aligned} \quad (1)$$

где **X** – вектор состояний;  $t_{k1}$  – момент коммутации ключа К1;  $t_{k2}$  – момент коммутации ключа К3;  $\tau$  – тактовый интервал.

В свою очередь, вектор состояний  $\mathbf{X} = \{i_L, U_{\text{вх}}, U_{\text{вых}}\}$ , включает в себя  $i_L$  – ток в дросселе;  $U_{\text{вх}}$  – напряжение на входном конденсаторе;  $U_{\text{вых}}$  – напряжение на выходном конденсаторе. По причине того, что в схеме присутствует как выходной, так и входной фильтр, матрицы состояний данного преобразователя имеют три компонента (таблица). Для упрощения расчетов принято, что в схеме отсутствуют режимы прерывистых токов.

**Матрицы состояния комбинированного преобразователя с трехкомпонентным вектором неизвестных состояний**

Интервал	Состояние ключевых компонентов	Матрица <b>A</b>	Матрица <b>B</b>
I $((k-1)\tau; t_{k1})$	$K_{F1} = 0;$ $K_{F2} = 1;$ $K_{F3} = 0;$ $K_{F4} = 1$	$\begin{bmatrix} -\frac{R_L}{L} & 0 & \frac{1}{L} \\ 0 & -\frac{1}{C_{\text{вх}}R_{\text{вх}}} & 0 \\ \frac{1}{C_{\text{вых}}} & 0 & \frac{1}{R_H C_{\text{вых}}} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 \\ \frac{U_{\text{вх}}}{C_{\text{вх}}R_{\text{вх}}} \\ 0 \end{bmatrix}$
II $(t_{k1}; t_{k2})$	$K_{F1} = 1;$ $K_{F2} = 0;$ $K_{F3} = 0;$ $K_{F4} = 1$	$\begin{bmatrix} -\frac{R_L}{L} & 0 & \frac{1}{L} \\ \frac{1}{C_{\text{вх}}} & -\frac{1}{C_{\text{вх}}R_{\text{вх}}} & 0 \\ \frac{1}{C_{\text{вых}}} & 0 & \frac{1}{R_H C_{\text{вых}}} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 \\ \frac{U_{\text{вх}}}{C_{\text{вх}}R_{\text{вх}}} \\ 0 \end{bmatrix}$
III $(t_{k2}; k\tau)$	$K_{F1} = 1;$ $K_{F2} = 0;$ $K_{F3} = 1;$ $K_{F4} = 0$	$\begin{bmatrix} -\frac{R_L}{L} & \frac{1}{L} & 0 \\ \frac{1}{C_{\text{вх}}} & -\frac{1}{C_{\text{вх}}R_{\text{вх}}} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{R_H C_{\text{вых}}} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 \\ \frac{U_{\text{вх}}}{C_{\text{вх}}R_{\text{вх}}} \\ 0 \end{bmatrix}$

В системе управления применена многозонная модуляция для управления ключами К1–К4 с условием, что ключ повышающего преобразователя К3 может переходить в замкнутое состояние только тогда, когда ключ понижающего преобразователя К1 также находится в замкнутом состоянии. При этом коммутационные функции могут принимать единичное значение только в начале тактового интервала (рис. 3).

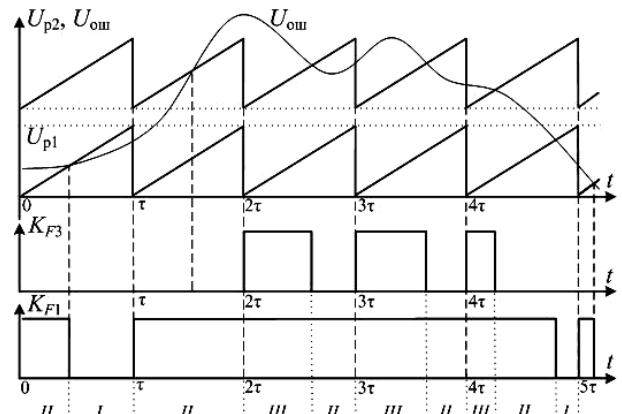


Рис. 3. Формирование коммутационных функций ключей К1, К3

Управление ключевыми компонентами комбинированного преобразователя осуществляется следующим образом. Коммутационные функции формируются для ключей К1 и К3, состояние же ключей К2, К4 противофазно коммутационным функциям ключей К1, К3 соответственно. С учетом принципов непрерывности формирования импульсной последовательности система уравнений (1) по вычислению вектора состояний  $\mathbf{X}$  для силовой части на  $k$ -м тактовом интервале  $[(k-1)\tau, k\tau]$  распадается на три интервала линейности: 1) от начала тактового интервала  $((k-1)\tau)$  до момента коммутации ключа К1 ( $t_{k1}$ ); 2) от момента коммутации ключа К1 ( $t_{k1}$ ) до момента коммутации ключа К3 ( $t_{k2}$ ); 3) от момента коммутации ключа К3 ( $t_{k2}$ ) до окончания тактового интервала ( $k\tau$ ). Теоретически для представленной схемы с четырьмя коммутационными элементами возможны 16 различных состояний. Матрицы  $\mathbf{A}$  и  $\mathbf{B}$  получены в ходе анализа работы преобразователя, но существование некоторых состояний невозможно, а другие состояния могут возникать только при работе в прерывистых режимах.

Состояния ключей К1, К3 в зависимости от коммутационных функций  $\xi(\mathbf{X}, t)$ ,  $i = 1, 2$  определяются принципами формирования импульсной последовательности, рассмотренными ранее в [15].

Проверка полученной математической модели проводилась с помощью программной модели, построенной в симуляционном пакете LTspice IV, основанной на языке программирования Spice. Управление преобразователем задано алгоритмически с целью минимизации ошибки встроенных управляющих микросхем. На основании этой программной модели проведена верификация математической модели, были получены нагрузочные характеристики преобразователя при разных входных напряжениях [15, 16].

#### Результаты математического эксперимента

Используя методики расчета силовой части параметров элементов комбинированного преобразователя и его системы управления [7, 17], проведем расчет, задавая следующие требования:

- напряжение входного источника от 20 до 40 В;
- выходное напряжение 30 В;
- статическая стабильность выходного напряжения не менее 1%;
- частота работы преобразователя 200 кГц;
- ток нагрузки до 20 А.

В результате расчета были получены следующие параметры элементов схемы:

- емкость входного фильтра  $C_{вх} = 20$  мкФ;
- индуктивность дросселя  $L = 30$  мкГн;
- емкость выходного фильтра  $C_{вых} = 100$  мкФ.

Результаты расчета согласно [7, 17] не учитывают, что характеристики и параметры компонентов изменяются в зависимости от многих факторов (временная деградация, температурная нестабильность, воздействие тяжелых заряженных частиц и др.). Зачастую проведение такой оценки является довольно трудоемкой многопараметрической зада-

чей, поэтому в большинстве случаев инженеры-разработчики при проектировании приборов выбирают номиналы компонентов схемы с учетом коэффициентов запаса, равных от 1,5 до 2,0. Но подобный подход не отвечает на вопрос об устойчивости работы устройства во время всего времени активного функционирования.

Частично данную задачу можно разрешить при помощи построения бифуркационных диаграмм поведения требуемого параметра устройства в зависимости от иных параметров схемы. Подобный анализ позволяет определить границы номинала исследуемого компонента, обеспечивающие работу устройства в устойчивом режиме с минимальными пульсациями требуемого стабилизированного параметра [16].

В нашем случае таким исследуемым параметром является выходное напряжение преобразователя. На рис. 4–7 представлены бифуркационные диаграммы выходного напряжения в зависимости от коэффициента усиления сигнала ошибки звена обратной связи.

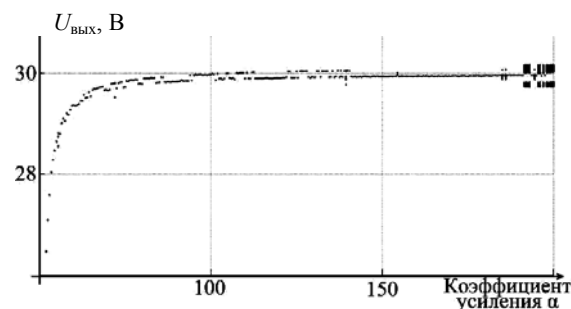


Рис. 4. Бифуркационная диаграмма выходного напряжения при  $U_{вх} = 20$  В,  $I_n = 15$  А,  $C_{вх} = C_{вых} = 100$  мкФ и изменении коэффициента усиления от 0 до 200

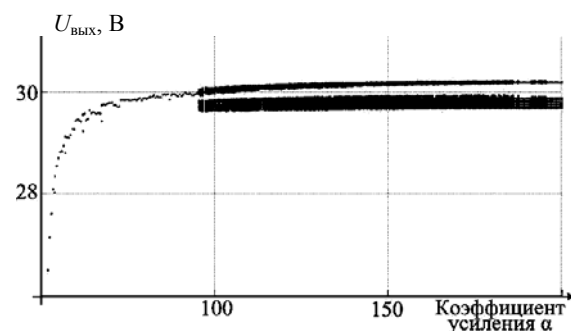


Рис. 5. Бифуркационная диаграмма выходного напряжения при  $U_{вх} = 20$  В,  $I_n = 1$  А,  $C_{вх} = C_{вых} = 100$  мкФ и изменении коэффициента усиления от 0 до 200

Из полученных бифуркационных диаграмм выходного напряжения преобразователя при токе нагрузки 1 А (см. рис. 5, 7) видно, что минимальное значение коэффициента усиления, при котором происходит переход от одноциклового режима к многоцикловому, постепенно уменьшается. При напряжении входного источника  $U_{вх} = 20$  В граничное значение  $\alpha_{гр} = 95$ , а при  $U_{вх} = 40$  В  $\alpha_{гр} = 75$ .

Бифуркационные диаграммы выходного напряжения при токе нагрузки 15 А (см. рис. 4, 6) иллюстрируют уменьшение значения граничной точки коэффициента усиления в зависимости от роста входного напряжения:  $\alpha_{\text{гр}} = 138$  при  $U_{\text{вх}} = 20$  В,  $\alpha_{\text{гр}} = 78$  при  $U_{\text{вх}} = 40$  В.

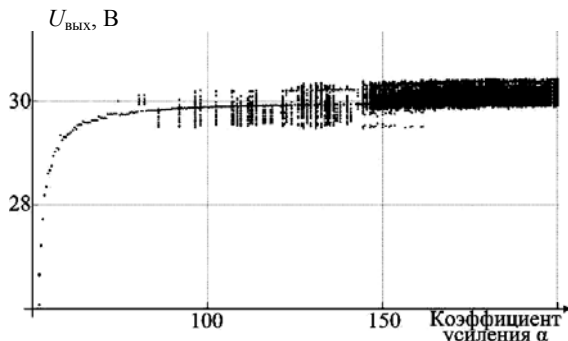


Рис. 6. Бифуркационная диаграмма выходного напряжения при  $U_{\text{вх}} = 40$  В,  $I_{\text{н}} = 15$  А,  $C_{\text{вх}} = C_{\text{вых}} = 100$  мкФ и изменении коэффициента усиления от 0 до 200

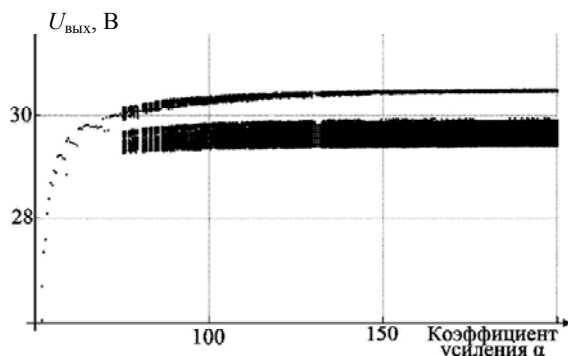


Рис. 7. Бифуркационная диаграмма выходного напряжения при  $U_{\text{вх}} = 40$  В,  $I_{\text{н}} = 1$  А,  $C_{\text{вх}} = C_{\text{вых}} = 100$  мкФ и изменении коэффициента усиления от 0 до 200

### Заключение

Таким образом, в статье определены параметры комбинированного преобразователя, а также допустимые границы выбора коэффициента усиления, обеспечивающие работу устройства в устойчивых одноцикловых режимах. Расчеты были проверены в симуляционном пакете LTspice и подтверждены положительными результатами испытаний силовых модулей комплексов автоматики и стабилизации СЭП КА разработки АО «НПЦ «Полнос». Таким образом, данная методика и математическая модель пригодны для проектирования устройств подобного рода.

Показано, что построение бифуркационных диаграмм позволяет оценить поведение системы в зависимости от изменения параметров системы и определить границы допустимых значений номиналов компонентов схемы, благодаря чему повышается качество разработки и ее работоспособность в зависимости от влияния внешних факторов.

### Благодарность

Выражаю благодарность своему научному руководителю С.Г. Михальченко, д.т.н., заведующему

кафедрой промышленной электроники Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники, который оказал существенную помощь в разработке математической модели комбинированного преобразователя и проведении исследований.

### Литература

1. Системы электропитания космических аппаратов / Б. П. Соусти, В.И. Иванчура, А.И. Чернышев, Ш.Н. Исляев. – Новосибирск: ВО «Наука». Сиб. изд. фирма, 1994. – 318 с.
2. Shamsi P. Design and development of very high frequency resonant DC-DC boost converters' / P. Shamsi, B. Fahimi // IEEE Trans. Power Electron. – 2012. – Vol. 27, № 8. – P. 3725–3373.
3. Lee I.-O. Interleaved buck converter having low switching losses and improved step-down conversion ratio / I.-O. Lee, S.-Y. Cho, G.-W. Moon // IEEE Trans. Power Electron. – 2012. – Vol. 27, № 8. – P. 3664–3675.
4. Pan C.-T. A novel transformerless interleaved high step-down conversion ratio DC-DC converter with low switch voltage stress / C.-T. Pan, C.-F. Chuang, C.-C. Chu // IEEE Trans. Power Electron. – 2014. – Vol. 61, №.10. – P. 5290–5300.
5. Analog Devices provides a broad product portfolio [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.analog.com/ru/products>, свободный (дата обращения: 01.06.2016).
6. Linear Technology Corporation Product Categories [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.linear.com/products>, свободный (дата обращения: 01.06.2016).
7. Мелешин В. И. Транзисторная преобразовательная техника. – М. : Техносфера, 2006. – 632 с.
8. Design of an average-current-mode noninverting buck-boost DC-DC converter with reduced switching and conduction losses / C.-L. Wei, C.-H. Chen, K.-C. Wu, I.-T. Ko // IEEE Trans. Power Electron. – 2012. – Vol. 27, № 12. – P. 4934–4943.
9. Hybrid buck-boost feedforward and reduced average inductor current techniques in fast line transient and high-efficiency buck-boost converter / P.-C. Huang, W.-Q. Wu, H.-H. Ho, K.-H. Chen // IEEE Trans. Power Electron. – 2010. – Vol. 25, № 3. – P. 719–730.
10. Баушев В. С. О недетерминированных режимах функционирования стабилизатора напряжения с широтно-импульсным регулированием / В.С. Баушев, Ж.Т. Жусубалиев // Электричество. – 1992. – №. 8. – С. 59–68.
11. Эрроусмит Д. Обыкновенные дифференциальные уравнения. Качественная теория с приложениями / Д. Эрроусмит, Л. Плейс. – М. : Мир, 1986. – 243 с.
12. Оценка нелинейных динамических свойств полупроводниковых преобразователей с дозированием энергии по коэффициентам пульсаций тока и напряжения / К.В. Бородин, Г.Я. Михальченко, С.Г. Михальченко, В.П. Обрусник // Науч. вестник НГТУ. – 2012. – № 2(47). – С. 79–90.
13. Нелинейная динамика полупроводниковых преобразователей / А.В. Кобзев, Г.Я. Михальченко, С.Г. Михальченко, А.И. Андриянов. – Томск: Том. гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники, 2007. – 224 с.
14. Михальченко С. Г. Автоматизация анализа и синтез импульсных преобразователей энергии с двухполярной реверсивной модуляцией: дис. ... канд. техн. наук. – Брянск, 2001. – 200 с.



15. Апасов В. И. Математическое моделирование комбинированного преобразователя напряжения со стабилизацией выходного напряжения / В.И. Апасов, С.Г. Михальченко, В.П. Коцубинский // Докл. ТУСУРа. – 2013. – № 4(30). – С. 96–102.

16. Апасов В. И. Бифуркационный анализ комбинированного преобразователя при изменении емкости выходного фильтра / В.И. Апасов, С.Г. Михальченко // Решетневские чтения: матер. XVIII Междунар. науч. конф.: в 3 ч. / под общ. ред. Ю.Ю. Логинова; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. – Красноярск, 2014. – Ч. 2. – С. 15–17.

17. Зиновьев Г. С. Основы силовой электроники: учеб. пособие. – 2-е изд., испр. и доп. – Новосибирск: Изд. НГТУ, 2003. – 664 с.

---

**Апасов Владимир Иванович**

Аспирант каф. промышленной электроники (ПрЭ) ТУСУРа  
Инженер-конструктор 2-й категории АО «НПП «Полус»  
Тел.: +7-923-428-54-26  
Эл. почта: info@polus-tomsk.ru, vovaap@mail.ru

**Шурыгин Юрий Алексеевич**

Д-р техн. наук, профессор, директор департамента управления и стратегического развития  
Тел.: 8 (382-2) 51-05-30  
Эл. почта: office@tusur.ru

Апасов V.I., Shurygin Y.A.

**Impact of the gain changes on the behavior of the combined converter**

This paper presents features of a combined converter with stabilization output voltage. A mathematical model of a converter is given, based on ordinary differential equations. A bifurcation study of the impact the gain of changes on the quality of the output voltage is carried out. The permissible range of gain values, providing efficiency of the device in different modes of operation is identified.

**Keywords:** power system, combined voltage converter, switching function, bifurcation diagrams.



## **СООБЩЕНИЯ**



УДК 025.4.036

Б.А. Воронин

## Анализ индекса цитируемости и методика его повышения

Рассмотрены подходы для повышения индекса цитируемости как ученого/преподавателя, так и организации в целом. Статья ориентирована на преподавателей и исследователей, уже имеющих некоторый публикационный задел. Рассмотрены способы повышения индекса цитирования и популяризация работ.

**Ключевые слова:** индекс цитирования, публикация статьей, индекс Хирша.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2016-19-3-131-135

Получение и распространение новых знаний – вот основные задачи науки. В университетской науке, в отличие от академической, добавляется фактор подготовки студентов. В академической науке есть только фрагментарная подготовка курсовиков-дипломников и аспирантов, а основной упор делается на публикационную деятельность в журналах, регистрацию патентов и т.п. В последние годы очень усилилась роль оценки ученого и научной организации по наукометрическим показателям, таким как число публикаций, число цитирований, индекс Хирша и т.п. Это вынуждает ученых заниматься продвижением своих публикаций и разработок. В статье даны полезные советы для самопродвижения исследователя. Идея написания данной работы появилась после многочисленных консультаций, которые проходили практически по одному алгоритму.

### Постановка задачи

Итак, вы – исследователь / преподаватель / руководитель. У вас есть публикации в журналах. Вам

необходимо поднять их цитируемость в силу разных обстоятельств: для получения грантов, для улучшения личного рейтинга и т.д. Увеличение вашего личного рейтинга будет способствовать улучшению рейтинга вашей организации, города, региона и даже страны! Таким образом, то, что делаешь лучше для себя, делаешь лучше для всех. По рейтингу цитирования публикаций ТУСУР находится на 13-м (в 2015 г. ТУСУР был на 11-м) месте в Томске среди 175 организаций по данным сайта РИНЦ (Российский индекс научного цитирования) – <http://elibrary.ru> [1], в то же время по числу статей – на пятом! (таблица), уступая только ТГУ, ТПУ, СибГМУ и ТГПУ. Конечно, можно указывать на определенную специфику тематики, и прочие обстоятельства, но факты говорят о недооцененности ТУСУРа и, следовательно, его сотрудников в этом вопросе. Цель статьи – показать коллегам некоторые моменты улучшения данного положения.

**Томские институты и университеты: первые 16 позиций согласно рейтингу РИНЦ (данные на май 2015 – 2016 г.)**

№ п/п	Организация	Число статей $N_1$	Число цитирований, $N_2$	2015/2016	
				$K = N_2/N_1$	$K_n, \%$
1	НИ ТГУ	36132/49568	83123/148626	2,30/2,99	30
2	НИ ТПУ	28488/39232	32184/54542	1,13/1,39	23
3	ТГПУ	4999/7316	29265/53489	5,85/7,31	25
4	ИФПМ СО РАН	4051/4981	17117/2258	4,23/4,53	7
5	СибГМУ	7853/12787	14803/39979	1,89/3,13	65
6	ИСЭ СО РАН	2949/3608	14217/18347	4,82/5,09	5
7	ИОА СО РАН	3463/3913	13665/17883	3,95/4,57	16
8	НИИ кардиологии СО РАМН	3416/4141	6304/12008	1,85/2,90	57
9	ТГАСУ	3734/5149	5484/9397	1,47/1,83	24
10	НИИПЗ СО РАМН	1656/1925	5226/8202	3,16/4,26	35
11	<b>ТУСУР</b>	<b>4818/6670</b>	<b>4766/7211</b>	<b>0,99/1,08</b>	<b>9</b>
12	Томский НИИ онкологии	2513/2887	4491/7726	1,79/2,68	50
13	ИХН СО РАН	1807/2131	3533/4928	1,96/2,31	18
14	НИИ медицинской генетики	750/996	3044/4624	4,06/4,64	14
15	НИИФиРМ им. Е.Д. Гольдберга	1502/2800	2848/15031	1,89/5,37	190
16	ИМКЭС СО РАН	1078/1372	2068/3059	1,92/2,23	16
	$N_2/N_1$ среднее			2,52/2,86	16

Примечание.  $K_n$  – коэффициент прироста индекса  $K = N_2/N_1$  за последний год, в %.

У автора имеется опыт работы на факультете физики и астрономии Университетского колледжа Лондона (UCL). Данный университет традиционно входит в десятку сильнейших университетов мира, а декан факультета физики и астрономии академик, профессор Дж. Теннисон [2] имеет амбиции на Нобе-

левскую премию (по одному из критериев у нобелевского лауреата должно быть больше 10000 цитирований на его публикации, что у проф. Дж. Теннисона уже давно есть). Поэтому автор получил мастер-классы самопродвижения и самопиара от успешного ученого, с которыми спешит поделиться с вами.

Вопрос к преподавателю/исследователю – есть ли у вас собрание всех ваших журнальных трудов, публикаций, пособий и монографий в электронном виде? Скорее всего, для большинства ответ будет – увы, нет. Что-то, конечно, есть в разном формате: Word, HTML, PDF и пр. Кроме того, следует отметить тот факт, что некоторые публикации 90-х годов и ранее выходили только на бумаге и их не существует в цифровом виде. Это означает, что в современном информационном мире их не существует, как это ни прискорбно. Далее, допустим, они у вас есть или вы их соберете за какое то-время, и они будут лежать у вас в компьютере, но как их можно найти, кроме как написав вам на электронную почту? То, что не существует в Интернете, не существует совсем.

Если посмотреть на 16 лучших университетов и НИИ г. Томска по рейтингу РИНЦ (см. таблицу), то мы увидим, что, несмотря на высокие показатели по числу статей и достаточно высокие показатели по цитируемости, по отношению к числу  $K$  (коэффициент отношения числа цитирования к числу статей) в 2015–2016 годах ТУСУР занимает уверенное последнее место и является единственной организацией, где данный показатель меньше 1 (в 2015 г.)! В 2016 г. ТУСУР по цитированию показал прирост на 10%, перешагнул заветную 1, но по коэффициенту прироста –  $K_n$  – остался хуже всех других университетов, которые, по-видимому, занимаются повышением своего рейтинга централизованно и более активно. Хуже прирост  $K_n$  можно отметить только в научных институтах ИСЭ и ИФПМ, где приоритетным считается не вал, а качество, но и их меньший прирост позволил перейти планку в цитировании на одну статью 5 и 4,5 (соответственно для ИСЭ и ИФПМ) ссылки на статью, а у ТУСУРа только 1.

Можно выделить 2 направления: повышение рейтинга университета в целом и повышение рейтинга каждого ученого.

#### Повышение рейтинга ТУСУРа в целом

1. Архив журнала «Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники» [3] существует только с 2003 г. Так как издание существовало и ранее, по-видимому, необходимо его добавление в Интернет, хотя бы названия и абстракты.

2. В журналах издаваемых ТУСУРом (Доклады ТУСУРа и др.), требовать ограничения снизу на число ссылок в статье – не менее 15 или даже 20. Необходимо стимулировать сотрудников ссылаться на себя и на других. В журнале «Известиях вузов. Физика» имеется архаическое ограничение на число цитируемой литературы – не более 15 ссылок в статье. Видимо раньше – это позволяло экономить бумагу, но нужно делать более понятные статьи и введения к ним, что усилит их понимание и, следовательно, цитирование.

3. Делать труды конференций ТУСУРа реферируемыми РИНЦ.

4. Публиковать монографии ТУСУРа в РИНЦ, что требует определенной финансовой и даже юри-

дической поддержки в определении авторских прав и пр. Возможно, на каждом факультете/кафедре должен быть человек, который знает, как это делать.

5. Стимулировать сотрудников к повышению их личных наукометрических показателей.

Как пожелание – перевести прием статей в журнал(ы) ТУСУРа только в электронную форму, заполняя отдельные разделы на странице журнала. Возможно, есть смысл подойти к этому совместно, с каким-нибудь другим журнал(ом), используя одну платформу для исключения человеческого фактора и удобства пользователей.

#### Повышение рейтинга ученого-преподавателя

Что такое индекс Хирша [4] –  $h$ -индекс, или индекс Хирша, – наукометрический показатель, предложенный в 2005 г. Хорхе Хиршем первоначально для оценки научной продуктивности физиков (рис. 1). Индекс Хирша является количественной характеристикой продуктивности учёного, группы учёных, научной организации или страны в целом, основанной на количестве публикаций и количестве цитирований этих публикаций. Кроме того, он отражает некоторое распределение по публикациям и ссылкам.

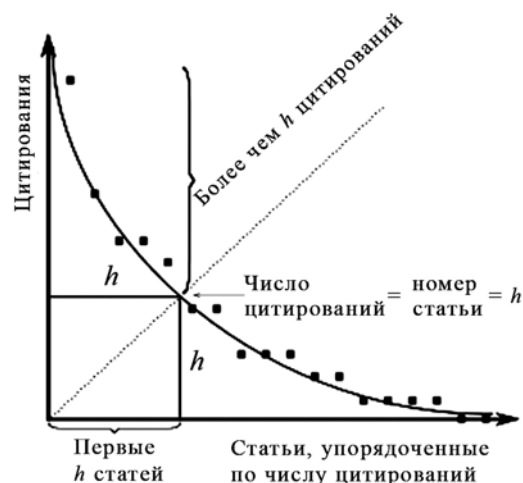


Рис. 1. Графическое объяснение индекса Хирша [4]. То есть если у человека индекс Хирша  $h$  – это значит, что у него есть  $h$  статей, на которые сослались по крайней мере  $h$  раз

Если у читателя еще нет научных трудов, то дальше можно не читать, а заняться заполнением данного пробела.

#### РИНЦ

И так, у вас есть публикации, которые принимаются/индексируются РИНЦ, ВАК, Scopus, WoS. То есть они опубликованы в трудах, журналах и монографиях.

Если ваших публикаций нет по какой-либо причине в списке сайта РИНЦ [1], что достаточно часто случается для молодых людей, вы можете написать письмо в службу поддержки support@elibrary.ru и попросить исправить ситуацию. И вот вы есть в РИНЦ, для повышения рейтинга там же на сайте [1] вам нужно пройти процедуру регистрации еще и в

системе Science Index (\*) и получить красную звезду в конце своих инициалов. Делается это за несколько минут, а фактически означает, что вы зарегистрировались уже во 2-ю базу данных, и обычно это удваивает ваш рейтинг. Кроме того, при заполнении анкеты вы указываете, где учились, где работаете и т.д., чем фактически отдаете некоторую дань вашей альма-матер. После этого вы имеете возможность просматривать и даже редактировать список своих публикаций и цитирований на них. Заходите на свою страничку и выбираете непривязанные публикации, отмечаете, какие ваши, а какие – нет. Аналогично с цитированием отмечаете, кто сослался на ваши работы, а кто на ваших однофамильцев. Возможно, имеет смысл заходить с некоторой периодичностью и помогать РИНЦу выставлять вам правильные данные.

Конечное, может возникнуть искушение – накрутить себе цитирование разными методами, как, например, описано в статье из «Московского комсомольца» «Скандал в научном мире: ученый накручивал себе индекс цитируемости» [5]. Но история эта привела к увольнению.

Если же у вас есть монографии, то вы можете выложить их в РИНЦ, и все ссылки будут добавлены автоматически.

Также в рейтинг РИНЦ вы можете добавлять ссылки из диссертаций на свои работы, как советует кафедра математики ТУСУРа, см. [6].

#### **Научные социальные сети GOOGLE**

Для того чтобы знать, что о вас знает [www.google.com](http://www.google.com), вы можете завести свой аккаунт на [scholar.google.ru](http://scholar.google.ru) [7]. Ваши права тут минимальны, но вы можете также отметить ваши – не ваши статьи, добавлять статьи, которые по каким-либо причинам не попали в список google, в том числе и русскоязычные, и следить за тем, кто на вас ссылается, или за новыми публикациями ученых, которые вам интересны. Индексация [scholar.google](http://scholar.google) отличается меньшей жесткостью от Scopus и WoS. Кроме статей, google индексирует тезисы конференций, диссертации и пр. Можно посмотреть свой *h*-индекс, *i10*-индекс (сколько ваших статей имеют более 10 ссылок), данные по ссылкам за все время, за последние 5 лет, распределении и пр.

За несколько последних лет появилось много социальных сетей для ученых и преподавателей, которые пришли на смену социальным сетям, ориентированным больше на бизнес, таких как [linkedin.com](http://linkedin.com) [8]. Тем не менее [linkedin.com](http://linkedin.com) может помочь в поиске работы, единомышленников и т.д.

#### **Scopus&WoS**

Scopus&WoS являются сейчас достаточно популярными международными наукометрическими базами данных в России. На их рейтинги часто ориентируются Минобрнауки, ФАНО и другие российские организации, хотя, по сути, обе они являются част-

ными коммерческими организациями. Несколько слов про них ниже.

«Scopus» («скопус»; ранее называлась: SciVerse Scopus) – библиографическая и реферативная база данных и инструмент для отслеживания цитируемости статей, опубликованных в научных изданиях. Индексирует ~18 тыс. названий научных изданий по техническим, медицинским и гуманитарным наукам, объединяя 5 тыс. издателей. База данных индексирует научные журналы, материалы конференций и серийные книжные издания. Разработчиком и владельцем Scopus является издательская корпорация Elsevier. Поисковый аппарат интегрирован с поисковой системой Scirus для поиска веб-страниц и патентной базой данных (по данным [wikipedia.org](http://wikipedia.org)).

Web of Science (WoS, предыдущее название Web of Knowledge) – поисковая платформа, объединяющая реферативные базы данных публикаций в научных журналах и патентов, в том числе базы, учитывающие взаимное цитирование публикаций, разрабатываемая и предоставляемая компанией Thomson Reuters. Web of Science охватывает материалы по естественным, техническим, общественным, гуманитарным наукам и искусству. Платформа обладает встроенными возможностями поиска, анализа и управления библиографической информацией (по данным [wikipedia.org](http://wikipedia.org)).

На портале «Научная Россия» появился обзор Е. Береснева о научных сетях под названием «Ученые и социальные сети» [9]. Работа Береснева описывает международные реалии по материалам статьи из журнала Nature [10] и пользованию научных социальных сетей в России.

В исходной статье R. Van Noorden [10] указывается, что опрос более 3000 ученых (по науке и технике) показал, что наибольшим интересом (~90%) пользуется Google Scholar [6], затем ReasearchGate [11], далее идут Facebook и Linkedin, чуть меньше (>80%) Google+ и Twitter; более 40% – ResearcherID, Mandeley и ORCID, далее идут Academia.edu, BiomedExperts, и замыкает рейтинг Microsoft Academic Search.

Сам факт того, что 90% исследователей на Западе используют специальные социальные сети для продвижения и популяризации своих работ, а также поиска информации, статей, публикаций, обсуждений в группах, говорит о том, что нам этого не избежать и в будущем мы должны будем делать то же самое.

В большинстве научных социальных сетей вы можете размещать свои статьи. На ReasearchGate вы можете следить, кто и откуда их просматривает, скачивает, какие из ваших работ являются лидерами рейтинга недели/месяца и т.д. Также вы можете следить за новыми работами авторов, которые вам интересны, задавать вопросы, отвечать на вопросы и т.д. При чем публикации могут быть представлены на разных языках.

### Российские сети

Корпус экспертов [12] – это постоянно пополняемые списки экспертов по естественнонаучным дисциплинам, отобранных на основе рекомендаций ученых с высокими индексами цитирования в международных научных журналах. Их цель – создание инструмента для квалифицированной научной экспертизы проектов (инвестиционных, научных, государственных), не зависящей от конъюнктуры, процедурно прозрачной и пользующейся авторитетом у научного сообщества. На май 2015 г. из Томска в корпусе экспертов было 82 человека (09.2016 – 118 человек), ТУСУР в 2015 г. совсем не был представлен, хотя кроме университетов и ведущих институтов есть, например, противотуберкулезный диспансер. Туда попадают ученые, у кого есть более 1000 (749 ученых по России) ссылок на его работы за все время или же более 100 ссылок за последние 7 лет (959 по России).

В начале 2016 г. ТУСУР попал в рейтинг Корпуса экспертов в составе 4 человек! Данные эксперты могут сами рекомендовать новых экспертов в данный рейтинг. Кроме того, возможно внесение структуры ТУСУРа на данный сайт.

<https://картанауки.рф> – тоже в какой-то степени соцсеть, где можно зарегистрироваться, смотреть свое участие, сравнивать, анализировать, получить свой номер ученого. Но, по-видимому, сайт еще находится в стадии развития.

Можно упомянуть научную украинскую сеть, в которой возможна подписка на объявления о новых грантах и конкурсах: [www.science-community.org](http://www.science-community.org).

Также следует отметить научные социальные сети Academia.edu [13]; социальную сеть ученых [14], SciPeople [15], научные работы, обсуждения, комментарии и многое другое в научной сфере. Есть еще множество других как общенаучных, так и имеющих узкую специализацию социальных сетей.

В честь Д.И. Менделеева и монаха Менделя названа сеть Mendeley.com [16], в которой возможно находить интересные статьи, но в основном она ориентирована на биологов и химиков.

### Заключение

Повышая свой рейтинг, каждый сотрудник повышает свою стоимость и тем самым повышает рейтинг университета.

1. Практически во всех социальных научных сетях рассмотрены возможность загрузки своих работ, поиск статей, кооперация с коллегами. Через год-два после публикации вы мало чем рискуете, выкладывая PDF своей работы в Интернет, так как журналы стараются отслеживать распространение в основном свежих публикаций. В сложных случаях можно, например, выкладывать черновик статьи и ее точные выходные данные.

2. Ссылайтесь на себя и на коллег. Пишите обзорные статьи и делайте более подробные введения в ваших работах.

3. Публикуйтесь в высокорейтинговых журналах.

Например, есть такой показатель – *i*-индекс для организаций, см. википедию [17]. *i*-индекс – это индекс публикационной активности научной организации, рассчитываемый на основе индексов Хирша сотрудников. Он предложен в 2006 г. независимо М. Космульским [18] и Г. Пратхапом [19]. Индекс рассчитывается на основе распределения индекса Хирша ученых из данной научной организации – т.е. научная организация имеет индекс *i*, если не менее *i* ученых из этой организации имеют *h*-индекс не менее *i*. Таким образом, чем выше рейтинги ученых в организации, тем выше и ее рейтинг.

Конечно, необходимо помнить, что любая оценка или рейтинг носит большую долю субъективности. У разных отраслей науки есть своя специфика и особенность, как показали математики в исследовании рейтингов, ссылок и оценок [20]. Но давайте вместе работать на благо себя, своей семьи, своего работодателя и своей страны.

Автор выражает благодарность профессорам каф. автоматизированных систем управления ТУСУРа М.Ю. Катаеву и А.А. Мицелю за полезные обсуждения.

### Литература

1. <http://elibrary.ru/orgs.asp>
2. [https://www.ucl.ac.uk/phys/amopp/people/jonathan\\_tennyson](https://www.ucl.ac.uk/phys/amopp/people/jonathan_tennyson)
3. <http://proceedings.tusur.ru/index.php/dokladi>
4. Hirsch J. E. An index to quantify an individual's scientific research output // Proceedings of The National Academy of Sciences. 2005. – Vol. 102, № 46. – P. 16569–16572.
5. <http://www.mk.ru/science/2016/06/05/skandal-v-nauchnom-mire-uchenyi-nakruchival-sebe-indeks-citruemosti.html>
6. [https://vk.com/video22074827\\_456239031?list=371d592e34d505aae6](https://vk.com/video22074827_456239031?list=371d592e34d505aae6)
7. <https://scholar.google.ru>
8. <https://www.linkedin.com/>
9. <http://scientificrussia.ru/articles/uchenyie-i-socialnye-seti>
10. Noorden R. Van Online collaboration: Scientists and the social network // Nature. – 2014. – Vol. 512, Iss. 7513. – P. 126–129.
11. <https://www.researchgate.net>
12. <http://www.expertcorps.ru/science/whoiswho>
13. [www.academia.edu](http://www.academia.edu)
14. <http://www.science-community.org/ru/>
15. <http://scipeople.ru/>
16. <https://www.mendeley.com/>
17. <https://ru.wikipedia.org/wiki/I-%D0%98%D0%BD%D0%B4%D0%B5%D0%BA%D1%81>
18. Kosmulski M. I—a bibliometric index // Forum Akademickie. – 2006. – Vol. 11. – 31 p.
19. Prathap G. Hirsch-type indices for ranking institutions' scientific research output // Current Science. – 2006. – Vol. 91, № 11. – P. 1439.
20. Игра в ЦЫФИРЬ, или Как теперь оценивают труд ученого (сборник статей о библиометрике). – М., Изд-во МЦНМО, 2011. 72 с. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.mccme.ru/free-books/bibliometric.pdf>, свободный (дата обращения: 03.05.2016).



**Воронин Борис Александрович**

Ст. науч. сотрудник Института оптики атмосферы  
им. В.Е. Зуева СО РАН,  
доцент каф. автоматизированных систем управления  
ТУСУРа  
Тел.: 8 (383-2) 49-00-67  
Эл. почта: vba\_iao@mail.ru, vba@iao.ru

Voronin B.A.

**Increasing citation index**

Some ideas of approaches aimed to increase the citation index for a scientist/ professor and organization. The article focuses on the faculty members and researchers who already have a certain amount of publication.

**Keywords:** h-index, references, publications.

**Уважаемые авторы!**  
**С 2016 года изменяется формат печати журнала,**  
**вводятся новые правила и требования к оформлению статьи.**

**Требования к подготовке рукописей статей, представляемых для публикации в журнале**  
**«Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники»**

1. Электронный вариант статьи должен быть представлен в виде файла, названного по-русски фамилией первого автора, на дискете или диске в формате Word 2003. Предпочтительнее представить его по электронной почте.

2. Оригинал на бумажном носителе должен полностью соответствовать электронному варианту.

3. Статья должна иметь (в порядке следования): УДК; И.О. Фамилии авторов; заглавие; аннотация (не реферат); ключевые слова; основной текст статьи; список библиографий под подзаголовком «Литература»; сведения об авторах; далее на английском языке: Фамилии авторов И.О., заглавие статьи, аннотацию, ключевые слова. Сведения об авторах включают в себя фамилию, имя, отчество, ученую степень, ученое звание, должность, место работы, телефон, электронный адрес.

4. Текст статьи должен быть размещен в две колонки без принудительных переносов через один интервал шрифтом Times New Roman 10 кегля на одной стороне листа белой писчей бумаги формата А4, без помарок и вставок. Для облегчения форматирования прилагается **шаблон статьи**, который размещен на сайте: [journal.tusur.ru](http://journal.tusur.ru). Размер статьи со всеми атрибутами должен быть, как правило, не более пяти страниц.

5. Одни и те же символы в тексте, формулах, таблицах и рисунках должны быть единообразными по написанию. Русские и греческие символы набираются прямым шрифтом, а латинские – курсивом, кроме слов, их сокращений, имен функций, программ, фирм и химических формул.

6. Формулы должны быть набраны в формульном редакторе (Equation, MathType) программы Word. Русские буквы, греческие символы, математические знаки (+, -, ×, ∈, =, скобки, ...) и цифры всегда набираются прямым не жирным шрифтом, а переменные, обозначенные латинскими буквами – курсивом, кроме слов, их сокращений, имен функций, программ, фирм и химических формул (const, input;  $\sin x(t_1)$ ;  $U_{in}$ ;  $I_{вх}$ ;  $T_z$ ;  $\beta_2$ ;  $H_2O$ , Adobe Acrobat, Cisco и т.д.); векторные величины – жирным, прямо (не курсив) –  $A_1$ ,  $M(f)$ ,  $\beta$ . Шаблоны для набора формул необходимо взять из шаблона статьи.

7. Все употребляемые обозначения и сокращения должны быть пояснены.

8. Единицы измерения физических величин должны соответствовать Международной системе единиц (СИ) и написаны по-русски через пробел

(х, ГГц; 20 ГГц;  $T$ , град;  $7^\circ C$ ). Десятичные числа пишутся через запятую (не точку).

9. Таблицы и рисунки должны иметь тематические заголовки (не повторяющие фразы-ссылки на них в тексте). (Рис. 1. Название рисунка; Таблица 1. Название таблицы). Большие блоки расшифровки условных обозначений лучше приводить в тексте. Подписи и надписи – Times New Roman, 9 пт, не жирным, не курсивом, переменные – также как и в тексте. На все рисунки и таблицы должны быть ссылки в тексте (... на рис. 3, ... в табл. 2).

10. Рисунки и фотографии должны быть **черно-белыми**, четкими, контрастными, аккуратными, сгруппированными. Графики – не жирно, сетка – четко. Единицы измерения – на русском. Десятичная запятая (не точка). Рисунки могут быть выполнены в программах CorelDraw, Illustrator, Word, Visio и должны давать возможность внесения исправлений.

11. Иллюстрации, должны быть разрешением не менее 600 dpi. Масштаб изображения – 8 или 16,7 см по ширине (при условии читаемости всех надписей, выполненных шрифтом Times New Roman 9 кегля).

12. На все источники, указанные в списке литературы, должны быть ссылки по тексту (нумерация в порядке упоминания, например, [1, 2], [5–7]). Описание источников должно соответствовать ГОСТ 7.1–2003 и ГОСТ Р 7.0.5–2008 и содержать всю необходимую для идентификации источника информацию, а именно: *для неперидических изданий* – фамилию и инициалы автора, полное название работы, место издания, название издательства, год издания, количество страниц; *для периодических изданий* – фамилию, инициалы автора, полное название работы, название журнала, год выпуска, том, номер, номера страниц (см. примеры оформления библиографий).

Бумажный вариант рукописи статьи должен быть подписан авторами и (для сторонних авторов) иметь сопроводительное письмо на бланке организации.

Плата за публикацию рукописей не взимается.

Материальные претензии авторов, связанные с распространением материалов их статей после опубликования, не принимаются.

Авторы несут полную ответственность за содержание статей и за последствия, связанные с их публикацией.

**Контактная информация**

Адрес: 634050, Томск, пр. Ленина, 40, 414-ГК. Эл. почта: [vnmas@tusur.ru](mailto:vnmas@tusur.ru). Тел.: +7 (3822) 51-21-21.