

ISSN 2078-9181

DOI 10.15622/sp.2020.19.2

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
Отделение нанотехнологий и информационных технологий

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ
ИНСТИТУТ ИНФОРМАТИКИ И АВТОМАТИЗАЦИИ РАН

ТРУДЫ СПИИРАН

proceedings.spiiras.nw.ru



ТОМ 19 № 2



Санкт-Петербург
2020

SPIIRAS PROCEEDINGS

Volume 19 № 2, 2020

Scientific, educational, and interdisciplinary journal primarily specialized
in computer science, automation, and applied mathematics

Trudy SPIIRAN ♦ Founded in 2002 ♦ Труды СПИИРАН

Founder and Publisher

St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences

Editor-in-Chief

R. M. Yusupov, Prof., Dr. Sci., Corr. Member of RAS, St. Petersburg, Russia

Editorial Council

A. A. Ashimov ,	Prof., Dr. Sci., Academician of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Almaty, Kazakhstan
N. P. Veselkin ,	Prof., Dr. Sci., Academician of RAS, St. Petersburg, Russia
I. A. Kalyaev ,	Prof., Dr. Sci., Academician of RAS, Taganrog, Russia
Yu. A. Merkurjev ,	Prof., Dr. Habil., Academician of the Latvian Academy of Sciences, Riga, Latvia
A. I. Rudskoi ,	Prof., Dr. Sci., Academician of RAS, St. Petersburg, Russia
V. Sgurev ,	Prof., Dr. Sci., Academician of the Bulgarian academy of sciences, Sofia, Bulgaria
B. Ya. Sovetov ,	Prof., Dr. Sci., Academician of RAE, St. Petersburg, Russia
V. A. Soyfer ,	Prof., Dr. Sci., Academician of RAS, Samara, Russia

Editorial Board

O. Yu. Gusikhin ,	Ph. D., Dearborn, USA
V. Delic ,	Prof., Dr. Sci., Novi Sad, Serbia
A. Dolgui ,	Prof., Dr. Habil., St. Etienne, France
M. Zelezny ,	Assoc. Prof., Ph.D., Plzen, Czech Republic
H. Kaya ,	Assoc. Prof., Ph.D., Utrecht, the Netherlands
A. A. Karpov ,	Assoc. Prof., Dr. Sci., St. Petersburg, Russia
S. V. Kuleshov ,	Dr. Sci., St. Petersburg, Russia
D. A. Ivanov ,	Prof., Dr. Habil., Berlin, Germany
K. P. Markov ,	Assoc. Prof., Ph.D., Aizu, Japan
R. V. Meshcheryakov ,	Prof., Dr. Sci., Moscow, Russia
N. A. Moldovian ,	Prof., Dr. Sci., St. Petersburg, Russia
V. K. Pshikhopov ,	Prof., Dr. Sci., Taganrog, Russia
A. L. Ronzhin ,	(Deputy Editor-in-Chief), Prof., Dr. Sci., St. Petersburg, Russia
H. Samani ,	Assoc. Prof., Ph.D., New Taipei City, Taiwan, Province of China
V. Skormin ,	Prof., Ph.D., Binghamton, USA
A. V. Smirnov ,	Prof., Dr. Sci., St. Petersburg, Russia
B. V. Sokolov ,	Prof., Dr. Sci., St. Petersburg, Russia
L. V. Utkin ,	Prof., Dr. Sci., St. Petersburg, Russia
L. B. Sheremetov ,	Assoc. Prof., Dr. Sci., Mexico, Mexico

Editor: A. I. Motienko

Editor: E. P. Miroshnikova

Technical editor: M. S. Avstriyskaya

Translator: N. V. Kashina

Editorial Board's address

14-th line VO, 39, SPIIRAS, St. Petersburg, 199178, Russia,
e-mail: publ@iias.spb.su, web: <http://proceedings.spiiras.nw.ru>

The journal is indexed in Scopus

© St. Petersburg Institute for Informatics and Automation
of the Russian Academy of Sciences, 2020

ТРУДЫ СПИИРАН

Том 19 № 2, 2020

Научный, научно-образовательный, междисциплинарный журнал с базовой специализацией в области информатики, автоматизации и прикладной математики
Журнал основан в 2002 году

Учредитель и издатель

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук
(СПИИРАН)

Главный редактор

Р. М. Юсупов, чл.-корр. РАН, д-р техн. наук, проф., С-Петербург, РФ

Редакционный совет

- А. А. Ашимов**, академик национальной академии наук Республики Казахстан д-р техн. наук, проф., Алматы, Казахстан
Н. П. Веселкин, академик РАН, д-р мед. наук, проф., С.-Петербург, РФ
И. А. Каляев, академик РАН, д-р техн. наук, проф., Таганрог, РФ
Ю. А. Меркурьев, академик Латвийской академии наук, Dr. Habil., проф., Рига, Латвия
А. И. Рудской, академик РАН, д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ
В. Сгурев, академик Болгарской академии наук, д-р техн. наук, проф., София, Болгария
Б. Я. Советов, академик РАО, д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ
В. А. Сойфер, академик РАН, д-р техн. наук, проф., Самара, РФ

Редакционная коллегия

- О. Ю. Гусихин**, Ph.D., Диаборн, США
В. Делич, д-р техн. наук, проф., Нови-Сад, Сербия
А. Б. Долгий, Dr. Habil., проф. Сент-Этьен, Франция
М. Железны, Ph.D., доцент, Пльзень, Чешская республика
Д. А. Иванов, д-р экон. наук, проф., Берлин, Германия
Х. Кайя, Ph.D., доцент, Утрехт, Нидерланды
А. А. Карпов, д-р техн. наук, доцент, С.-Петербург, РФ
С. В. Кулешов, д-р техн. наук, С.-Петербург, РФ
К. П. Марков, Ph.D., доцент, Аизу, Япония
Р. В. Мещеряков, д-р техн. наук, проф., Москва, РФ
Н. А. Молдовян, д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ
В. Х. Пшихопов, д-р техн. наук, проф., Таганрог, РФ
А. Л. Ронжин, (зам. главного редактора), д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ
Х. Самани, Ph.D., доцент, Синьбэй, Тайвань, КНР
В. А. Скормин, Ph.D., проф., Бингемптон, США
А. В. Смирнов, д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ
Б. В. Соколов, д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ
Л. В. Уткин, д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ
Л. Б. Шереметов, д-р техн. наук, Мехико, Мексика

Редактор: А. И. Мотиенко

Литературный редактор: Е. П. Мирошникова

Технический редактор: М. С. Австрийская

Переводчик: Н. В. Кашина

Адрес редакции

199178, Санкт-Петербург, 14-я линия, д. 39,

e-mail: publ@iias.spb.su, сайт: <http://proceedings.spiiiras.nw.ru>

Журнал индексируется в международной базе данных Scopus

Журнал входит в «Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертации на соискание ученой степени доктора и кандидата наук»

© Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук, 2020
Разрешается воспроизведение в прессе, а также сообщение в эфир или по кабелю опубликованных в составе печатного периодического издания–журнала «Труды СПИИРАН» статей по текущим экономическим, политическим, социальным и религиозным вопросам с обязательным указанием имени автора статьи и печатного периодического издания–журнала «Труды СПИИРАН»

CONTENTS

Artificial Intelligence, Knowledge and Data Engineering

- M. Vashkevich, I. Azarov
VOICE PATHOLOGY DETECTION BASED ON ANALYSIS OF MODULATION SPECTRUM
IN CRITICAL BANDS 249
- F. Gundelakh, L. Stankevich, K. Sonkin, G. Nagornova, N. Shemyakina
APPLICATION OF BRAIN-COMPUTER INTERFACES IN ASSISTIVE TECHNOLOGIES 277
- V. Evdokimova, D. Kocharov, P. Skrelin
METHOD FOR CONSTRUCTING FORMANTS FOR STUDYING PHONETIC CHARACTERISTICS
OF VOWELS 302

Mathematical Modeling, Numerical Methods

- M. Gourary, S. Rusakov, M. Zarov, S. Ulyanov
COMPUTATIONAL ALGORITHMS FOR REDUCING RATIONAL TRANSFER FUNCTIONS'
ORDER 330

Information Security

- G. Tsochev, R. Yoshinov, N. Zhukova
SOME SECURITY ISSUES WITH THE INDUSTRIAL INTERNET OF THINGS AND
COMPARISON TO SCADA SYSTEMS 358
- I. Livshitz
METHOD FOR EVALUATING SECURITY OF CLOUD IT-COMPONENTS BASED ON
EXISTING STANDARDS CRITERIA 383

Digital Information Telecommunication Technologies

- S. Andreev, R. Tregubov, A. Mironov
PROBLEM OF SELECTING COMMUNICATION CHANNELS BANDWIDTH OF
TRANSPORT NETWORK TAKING INTO ACCOUNT IMBALANCE OF VARIOUS PRIORITY
TRAFFIC 412
- K. Sazonov, M. Tatarka, A. Tsyganov, V. Bessolcev
IDENTIFICATION OF SUBSCRIBER TERMINALS OF INFOCOMMUNICATION NETWORKS
BASED ON THE MODEL OF FORMING IMAGES IN MODERN COMPUTER SYSTEMS 446

СОДЕРЖАНИЕ

Искусственный интеллект, инженерия данных и знаний

- М.И. Вашкевич, И.С. Азаров
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАТОЛОГИИ ГОЛОСОВОГО АППАРАТА НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА
МОДУЛЯЦИОННОГО СПЕКТРА РЕЧИ В КРИТИЧЕСКИХ ПОЛОСАХ 249
- Ф.В. Гунделах, Л.А. Станкевич, К.М. Сонькин, Ж.В. Нагорнова, Н.В. Шемакина
ПРИМЕНЕНИЕ ИНТЕРФЕЙСОВ «МОЗГ-КОМПЬЮТЕР» В АССИСТИВНЫХ
ТЕХНОЛОГИЯХ 277
- В.В. Евдокимова, Д.А. Кочаров, П.А. Скредин
МЕТОД ПОСТРОЕНИЯ ФОРМАНТНЫХ КАРТИН ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ
ФОНЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГЛАСНЫХ 302

Математическое моделирование и прикладная математика

- М.М. Гурарий, М.М. Жаров, С.Г. Русаков, С.Л. Ульянов
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ АЛГОРИТМЫ ПОНИЖЕНИЯ ПОРЯДКА ДРОБНО-
РАЦИОНАЛЬНЫХ ПЕРЕДАТОЧНЫХ ФУНКЦИЙ 330

Информационная безопасность

- Г.Р. Цочев, Р.Д. Йошинов, Н.А. Жукова
ПРОБЛЕМЫ БЕЗОПАСНОСТИ ИНДУСТРИАЛЬНОГО ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ И
СРАВНЕНИЕ С СИСТЕМАМИ SCADA 358
- И.И. Лившиц
МЕТОД ОЦЕНИВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ОБЛАЧНЫХ ИТ-КОМПОНЕНТ ПО
КРИТЕРИЯМ СУЩЕСТВУЮЩИХ СТАНДАРТОВ 383

Цифровые информационно-телекоммуникационные технологии

- С.Ю. Андреев, Р.Б. Трегубов, А.Е. Миронов
ЗАДАЧА ВЫБОРА ПРОПУСКНЫХ СПОСОБНОСТЕЙ КАНАЛОВ СВЯЗИ
ТРАНСПОРТНОЙ СЕТИ, УЧИТЫВАЮЩАЯ РАЗБАЛАНСИРОВКУ ТРАФИКА
РАЗЛИЧНОГО ПРИОРИТЕТА 412
- К.В. Сазонов, М.В. Татарка, А.С. Цыганов, В.Е. Бессольцев
ИДЕНТИФИКАЦИЯ АБОНЕНТСКИХ ТЕРМИНАЛОВ ИНФОРМАЦИОННО-
ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СЕТЕЙ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ ФОРМИРОВАНИЯ
ИЗОБРАЖЕНИЙ В СОВРЕМЕННЫХ КОМПЬЮТЕРНЫХ СИСТЕМАХ 446

М.И. ВАШКЕВИЧ, И.С. АЗАРОВ
**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАТОЛОГИИ ГОЛОСОВОГО АППАРАТА НА
ОСНОВЕ АНАЛИЗА МОДУЛЯЦИОННОГО СПЕКТРА РЕЧИ В
КРИТИЧЕСКИХ ПОЛОСАХ**

Вашкевич М.И., Азаров И.С. Определение патологии голосового аппарата на основе анализа модуляционного спектра речи в критических полосах.

Аннотация. Предложен метод определения патологических изменений голоса на основе анализа модуляционного спектра речевого сигнала. Модуляционный спектр вычисляется при помощи двух последовательных частотно-временных преобразований: первое переводит сигнал в частотную область, второе – в модуляционную. Особенностью предложенного метода является использование неравномерного частотно-временного плана при переводе сигнала в частотную область. Предложен способ оценки модуляционного спектра, основанный на принципах антропоморфической обработки сигналов, имитирующий неравномерное частотно-временное разрешение слуховой системы человека. Использован неравнополосный банк фильтров модулированный дискретным преобразованием Фурье, аппроксимирующий шкалу критических частот и повышающий временное разрешение в широких полосах. Банк фильтров использует фазовые (всепропускающие) звенья в качестве элементов задержки, что позволяет получить неравномерный частотно-временной план. Выполнено сравнение предложенного способа с более традиционным способом вычисления модуляционного спектра в критических полосах с фиксированным временным разрешением. Приведены данные экспериментов по использованию параметров модуляционного спектра для определения патологических изменений голоса, обусловленных: 1) боковым амиотрофическим склерозом (БАС); 2) заболеваниями гортани. Отбор и ранжирование параметров модуляционного спектра, использованных в качестве информационных признаков для классификации, выполнен при помощи метода LASSO. Классификация параметров на основе линейного дискриминантного анализа обеспечила высокую точность определения патологии (более 97%). Полученные результаты свидетельствуют о том, что использование неравномерного частотно-временного плана является предпочтительным в случае, когда анализируемый сигнал является протяжным гласным звуком, поскольку обеспечивает более высокую точность обнаружения патологии при меньшем числе модуляционных параметров.

Ключевые слова: анализ речевого сигнала, критические полосы, модуляционный спектр, модуляционные признаки, извлечение признаков, детектирование патологии по голосу.

1. Введение. Во многих практических задачах обработки речевых сигналов используется кратковременное спектральное представление, полученное в результате анализа коротких (5-50 мс), перекрывающихся временных интервалов аудиосигнала. Однако спектральное представление не описывает амплитудную модуляцию спектральных компонент сигнала, которая является важной для многих практических задач. Альтернативой классическому спектральному представлению является модуляционный

спектр, представляющий собой частотное разложение амплитудных огибающих спектральных компонент.

Низкочастотные амплитудные модуляции звука являются основными носителями информации в речи и музыке [1–3]. Так в работе [4] было показано, что в диапазоне от 1 до 12 Гц модуляционного спектра находится основная речевая информация и именно этот диапазон наиболее важен для распознавания речи с точки зрения слуховой системы человека. Кроме того, во многих работах показано, что представление речи в области модуляционных частот устойчиво к воздействию аддитивных шумов [5, 6]. Этой особенностью обусловлено широкое применение модуляционных параметров в системах распознавания речи [7–9], где устойчивость к воздействию шума является критически важным свойством. В частности, техника RASTA (англ. *RelAtive SpecTrAl*) является классическим методом анализа модуляционного спектра [10], который применяется в системах распознавания речи [7], а также в задаче идентификации диктора [11]. Параметры, полученные из модуляционного спектра, используются в задачах шумоподавления [12, 13] и классификации акустических сигналов [14, 15]. Модуляционный спектр также используют для предсказания разборчивости речи для людей с нормальным слухом и с тугоухостью [16].

Представление речи, фокусирующееся на низкочастотных модуляциях, также имеет прямую связь с динамикой работы артикуляционных органов, скорость движения которых находится в диапазоне от 2 до 12 Гц [17]. Нейрофизиологические исследования показали, что различные отделы головного мозга отвечают за восприятие различных модуляционных частот временной огибающей звукового сигнала [18]. Причем, обнаружена чувствительность к модуляционным частотам в низкочастотном диапазоне до 32 Гц (данный диапазон отвечает за восприятие манеры артикуляции и слоговую скорость – англ. *syllabic rate*) и в высокочастотном диапазоне от 64 до 256 Гц (данный диапазон отвечает за восприятие просодики и других акустических свойств голоса). Интересно, что в работе [18] не было обнаружено чувствительности к модуляционным частотам в диапазоне от 32 до 64 Гц.

В последнее десятилетие анализ модуляционного спектра начал применяться для выявления и классификации патологических изменений голоса [19–22]. Однако, в отличие от систем распознавания речи для выявления патологий голосового аппарата используется значительно более широкий диапазон (от 0 до 500 Гц), поскольку для диагностики важно описание процесса фонации, состоящего из повторяющихся сокращений голосовых связок. Исследования [19, 20] подтвердили, что информация, содержащаяся в расширенном диапазоне модуляционных частот от 0 до

500 Гц является важной для правильной диагностики патологических изменений голоса. Так, в [19] описана система выявления патологии голосового аппарата, использующая параметры модуляционного спектра и машину опорных векторов и имеющая точность 94,1%. Характерной особенностью методов [19, 20] является большая размерность параметров модуляционного спектра. Для сокращения размерности в [19] использовался метод, основанный на сингулярном разложении тензоров. В [20] проблема большой размерности данных решалась путем конструирования новых интегральных признаков на базе исходных модуляционных параметров. В настоящей работе предлагается другой подход, основанный на анализе модуляционного спектра в критических частотных полосах, который позволяет на начальной стадии существенно сократить размерность конечного представления голосового сигнала. Данный подход также соответствует парадигме антропоморфической обработки сигналов, согласно которой обработка информации должна строиться на тех же принципах, что и в слуховой системе человека. Следование данной парадигме привело к существенному улучшению систем автоматического распознавания речи [5, 7], что позволяет надеяться, что и для области детектирования патологий голосового аппарата она также окажется эффективной.

Рассмотрены два подхода к анализу модуляционного спектра сигнала в критических полосах: на основе дискретного преобразования Фурье (ДПФ) с объединением каналов [23] и на основе неравнополосного ДПФ-модулированного банк фильтров [24]. В разделе 6 сравниваются параметры модуляционного спектра, полученные при помощи указанных подходов применительно к задаче выявления патологии голосового аппарата.

2. Модуляционный спектр. Модуляционный спектр – трехмерное представление сигнала, отражающее информацию о распределении его энергии по модуляционным частотам, обнаруживаемым в спектральных огибающих. Абсцисса обычно отвечает за модуляционную частоту, ордината – за акустическую частоту, а аппликата – за акустическую энергию. В общем случае для получения модуляционного спектра требуются два преобразования: первое – для перехода от временного представления к акустическим частотам, а второе – для перехода от акустических частот к модуляционным [1] (см. рис. 1).

Часто в качестве обоих преобразований используются ДПФ [14, 19]. На первом шаге для дискретного сигнала $x(n)$ рассчитывается кратковременное преобразование Фурье (КВПФ) [19]:

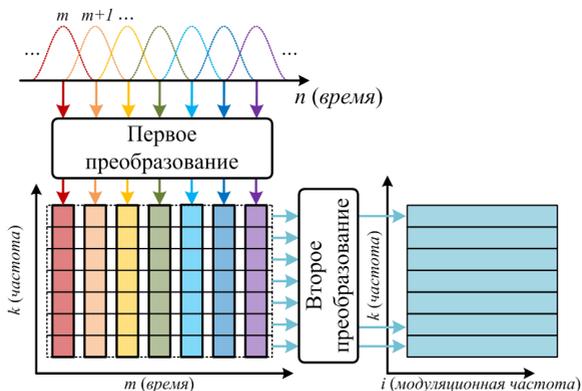


Рис. 1. Обобщенная схема оценки модуляционного спектра звукового сигнала

$$X_k(m) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} h(mM - n)x(n)W_K^{kn}, \quad k = 0, \dots, K - 1, \quad (1)$$

где $W_K = e^{-j2\pi/K}$, $h(n)$ – оконная функция, используемая в процессе анализа акустических частот; M – перекрытие между соседними кадрами анализа. Перед тем как перейти к оценке модуляционного спектра, в каждой субполосе устраняется постоянная составляющая путем вычитания среднего значения огибающей сигнала $|X_k(m)|$. Далее применяют второе КВПФ к временным последовательностям огибающих субполосных сигналов:

$$X_l(k, i) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} g(lL - m)|X_k(m)|W_I^{im}, \quad i = 0, \dots, I - 1, \quad (2)$$

где $g(m)$ – оконная функция, используемая в процессе анализа модуляционных частот; L – перекрытие между соседними кадрами анализа; k и i – индексы акустической и модуляционной частоты, соответственно.

Получаемая таким образом модуляционная спектрограмма отображает модуляционную спектральную энергию $|X_l(k, i)|$ на объединенной акустическо-модуляционной плоскости. Пример модуляционной спектрограммы, вычисленной для фрагмента протяжного произнесения звука [а] здоровым мужчиной (22 года), приведен на рисунке 2. В процессе

вычислений использовались следующие значения параметров в выражениях (1) и (2): $M = 44$ (что соответствует 1 мс на частоте дискретизации 44,1 кГц), $L = 78$, $h(n)$ – 132-точечное (или 3 мс) окно Хемминга, $g(m)$ – 78-точечное окно Хемминга.

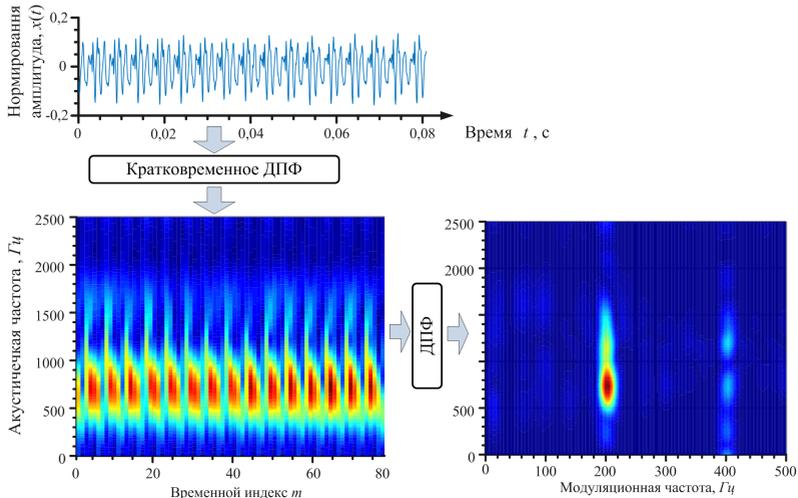


Рис. 2. Пример вычисления модуляционной спектрограммы для фрейма длительностью 80 мс

Протяжное произнесение звука не обладает синлабической (слоговой) и фонетической временной структурой и, соответственно, в нем отсутствуют типичные для речи модуляционные частоты в диапазоне 1-20 Гц. Поскольку при анализе использовалось временное окно $h(n)$ с длиной короче, чем период основного тона, то в спектральном представлении не различима гармоническая структура звука. Данная особенность приводит к тому, что основная энергия (компонент модуляционного спектра) концентрируется в области частоты основного тона (~ 200 Гц). Энергия локализуется на акустических частотах, соответствующих формантам звука [а] (на рисунке 2 первая форманта на ~ 750 Гц, а вторая на ~ 1100 Гц).

Недостатком рассмотренного подхода к представлению голосового сигнала в модуляционной области в контексте задачи классификации является большая размерность результирующего представления [1, 14]. В рассмотренном примере (как и в [19]) использовалось $K = 257$ акустических частот и $I = 257$ модуляционных частот, соответственно,

результатирующее представление является матрицей 257×257 , то есть содержит 66 049 параметров.

3. Оценка модуляционного спектра в критических частотных полосах. Одним из вариантов решения указанной выше проблемы большой размерности является использование вместо шкалы акустических частот (измеряемой в герцах), какой-либо психоакустической шкалы (например, мелов или барков) [14, 25], которая учитывает конфигурацию критических частотных полос. Аналогичный подход к преобразованию частоты выполняется при расчете мел-частотных кепстральных коэффициентов [7]. Так, если использовать число критических полос, равное $B = 20$, то в указанном выше примере число параметров модуляционного спектра будет равно $B \times I = 20 \times 257 = 5140$, то есть в 26 раз меньше первоначального.

Рассматриваются два подхода к оценке спектра сигнала в психоакустической шкале барков (1 барк = 1 критической полосе):

1) на основе вычисления ДПФ с последующим объединением спектральных коэффициентов [7, 23];

2) на основе пропускания сигнала через неравнополосный ДПФ-модулированный банк фильтров [23, 24].

Особенностью первого способа является его простота и вычислительная эффективность в силу существования быстрых алгоритмов вычисления ДПФ. Отличием второго способа является возможность анализа сигнала с различным временным разрешением в зависимости от анализируемой полосы частот. Как будет показано ниже, импульсные характеристики банка фильтров имеют большую длину на низких частотах и меньшую на высоких частотах, что позволяет более точно описывать частотно-временную структуру сигнала. В этом отношении анализ сигнала с использованием ДПФ менее гибкий, поскольку имеет фиксированное окно анализа для всех частотных полос.

3.1. Оценка спектра сигнала в шкале барков с использованием ДПФ. Для вычисления энергии спектра в шкале барков ДПФ-спектр сигнала, получаемый в (1), суммируется в критических полосах, которые измеряются в барках [23]:

$$E(b) = \sum_{k=kl(b)}^{kh(b)} |X(k)|^2, \quad b = 0, \dots, B - 1, \quad (3)$$

где $kl(b)$, $kh(b)$ – номер начального и конечного спектрального отсчета, попадающих в b -ю критическую полосу.

На рисунке 3 представлен пример оценки спектра сигнала в шкале барков с использованием выражения (3).

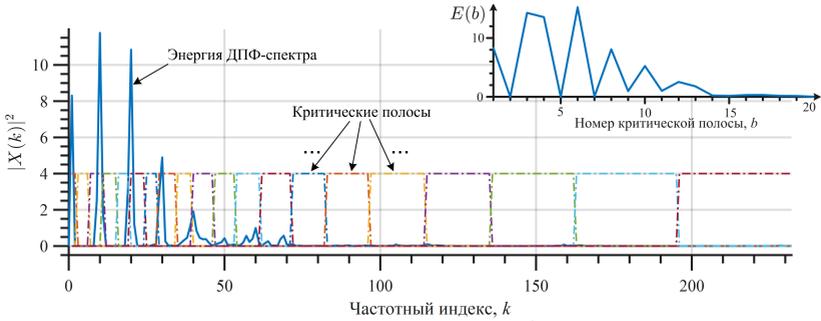


Рис. 3. Оценка энергии спектра сигнала в шкале барков: сплошной линией показана энергия ДПФ-спектра речевого сигнала, а штрихпунктирной – границы критических полос в шкале барков; в верхнем правом углу показана полученная оценка спектра в шкале барков

3.2. Неравнополосный ДПФ-модулированный банк фильтров. Неравнополосный ДПФ-модулированный банк фильтров образуется из своей равнополосной версии путем деформации частотной оси при помощи фазового преобразования [24]. Равнополосный банк фильтров (в виде набора импульсных характеристик) можно получить, используя комплексную модуляцию НЧ фильтра-прототипа:

$$h_b(n) = h_0(n)W_B^{bn}, \quad b = 0, \dots, B - 1, \quad (4)$$

где $n = 0, \dots, N - 1$; B – число полос банка фильтров; $h_0(n)$ – фильтр-прототип порядка N с конечной импульсной характеристикой (КИХ) и частотой среза $\omega_c = 2\pi/B$.

Если обозначить z -преобразование фильтра-прототипа $h_0(n)$ как $H_0(z)$, то выражение (4) представляется в z -области в виде:

$$H_b(z) = H_0(zW_B^b). \quad (5)$$

Если в выражении (5) выполнить замену $z = e^{j\omega}$, то получится выражение для комплексной частотной характеристики банка фильтров:

$$H_b(e^{j\omega}) = H_0(e^{j\omega}W_B^b) = H_0(e^{j(\omega - 2\pi b/B)}), \quad (6)$$

которое показывает, что банк фильтров состоит из сдвинутых по частоте копий фильтра-прототипа.

Название «ДПФ-модулированный» банк фильтров, описываемый выражением (4), получил вследствие того, что его эффективная реализация, получаемая в результате полифазного представления фильтра-прототипа, сводится к вычислению ДПФ размера B . Подробное описание реализации ДПФ-модулированного банка фильтров можно найти в [23].

Неравнополосная версия банка фильтров образуется в результате применения фазового преобразования [26], которое заключается в замене всех элементов задержки в структуре банка фильтров фазовыми звеньями:

$$z^{-1} \rightarrow A(z), \quad (7)$$

где $A(z)$ – передаточная характеристика фазового (всепропускающего) фильтра. В данной работе использовались фазовые фильтры первого порядка [27]:

$$A(z) = \frac{z^{-1} + \alpha}{1 + \alpha z^{-1}}, \quad \alpha \in \mathbb{R}, \quad |\alpha| < 1, \quad A(e^{j\omega}) = e^{j\varphi(\omega)},$$

где

$$\varphi(\omega) = \omega - 2 \arctan \frac{\alpha \sin \omega}{1 + \alpha \cos \omega}. \quad (8)$$

В результате замены (7) в банке фильтров происходит деформация частотной оси, описываемая выражением (8). Данный процесс проиллюстрирован на рисунке 4.

Выбор параметра фазового преобразования α в выражении (8) зависит от частоты дискретизации f_s , на которой работает банк фильтров, а также от психоакустической шкалы, которую банк аппроксимирует. Согласно [28] для аппроксимации шкалы барков параметр фазового преобразования должен выбираться по следующей формуле:

$$\alpha(f_s) = 1.048 \left[\frac{2}{\pi} \arctan(0,07212 f_s) \right]^{1/2} - 0.1957. \quad (9)$$

4. Практические аспекты реализации схем анализа модуляционного спектра сигнала. Для практических целей, рассматриваемых в данной работе, разработаны две схемы анализа модуляционного спектра сигнала – первая основана на вычислении ДПФ с последующим объединением каналов (везде далее – «схема на основе ДПФ»), а вторая на основе

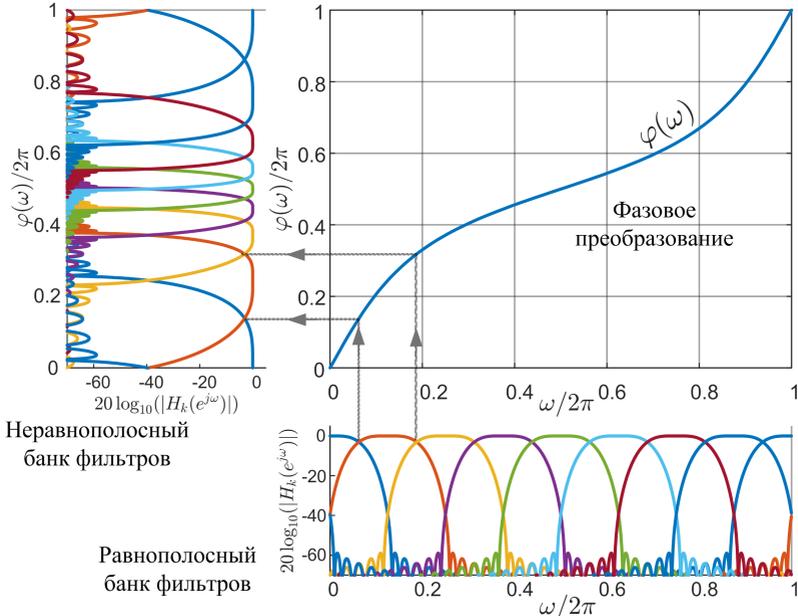


Рис. 4. Процесс получения неравнополосного банка фильтров с использованием фазового преобразования, коэффициент определяющий степень деформации частотной оси $\alpha = -0,4$

неравнополосного банка фильтров (везде далее – «схема на основе банка фильтров»)¹. Первая схема анализа представлена на рисунке 5.

На вход схемы поступает сигнал $x(n)$ длительностью T мс, если исходный сигнал имеет большую длительность, то он разбивается на сегменты по T мс, каждый из которых обрабатывается отдельно. Входной сигнал разбивается на фреймы размером N отсчетов с перекрытием h_{size} . Для каждого фрейма рассчитывается энергия ДПФ-спектра и производится объединение каналов для перехода к шкале барков. Полученные таким образом оценки спектра помещаются во временный буфер. В блоке «Выч. ср» выполняется вычитание среднего значения временной последовательности спектральных оценок в каждой полосе (среднее вычисляется после того, как временный буфер полностью заполнен). Далее происходит децимация временных спектральных последовательностей с коэффициентом D . На заключительном этапе рассчитывается модуляционный

¹Matlab-реализация данных схем размещена в общедоступном репозитории https://github.com/Mak-Sim/modulation_spectra_in_CB

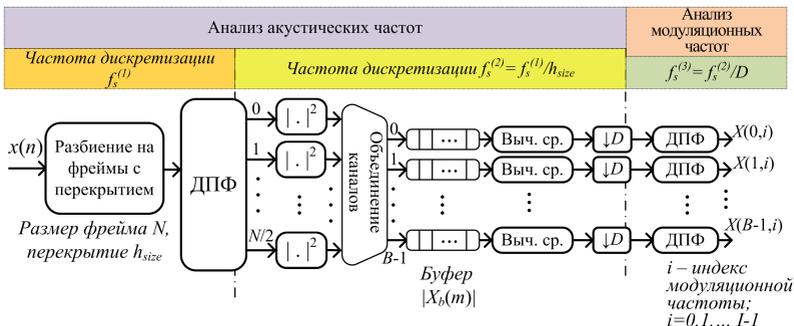


Рис. 5. Схема анализа модуляционного спектра сигнала: анализ акустических частот в шкале барков выполняется при помощи ДПФ с объединением каналов

спектр при помощи ДПФ. В работе использовались следующие значения параметров: частота дискретизации входного сигнала $f_s^{(1)} = 44100$ Гц, длительность входного сигнала $T = 800$ мс, длина фрейма $N = 1764$ (что соответствует окну анализа 40 мс), перекрытие $h_{size} = 21$ (или 0,5 мс), число каналов $B = 20$ (т.е. анализировались первые 20 критических полос), $f_s^{(2)} = 44100/h_{size} = 2100$ Гц, коэффициент децимации D имеет рациональное значение $\frac{525}{128}$, $f_s^{(3)} = 2100/D = 512$ Гц, число модуляционных частот $I = 257$ (для чего размер ДПФ выбирался равным 512). В результате анализа для каждой критической полосы выполнялась оценка модуляционного спектра в диапазоне от 0 до 256 Гц с шагом 1 Гц.

Вторая схема анализа модуляционного спектра, использующая неравнополосный банк фильтров, показана на рисунке 6. Входной сигнал подается аналогичным образом, как и в предыдущей схеме. Далее выполняется его децимация с коэффициентом R_1 таким образом, чтобы в результирующий частотный диапазон попадало ровно B критических полос. Далее сигнал подается в банк фильтров, где пропускается через цепочку фазовых звеньев (обеспечивающих деформацию частотной оси), умножается на коэффициенты фильтра-прототипа с последующим суммированием для получения выходов полифазных компонент фильтра. После чего выполняется децимация канальных сигналов с коэффициентом R_2 , за которой следует вычисление ДПФ, завершающее формирование выходов банка фильтров. Последующие элементы имеют такое же значение, как и в схеме на основе ДПФ (рис. 5).

Коэффициенты децимации R_1 и R_2 выбраны таким образом, чтобы выполнялось равенство $R_1 R_2 = h_{size}$. Этим достигается согласованность частот дискретизации рассматриваемых схем. Параметры схемы имели

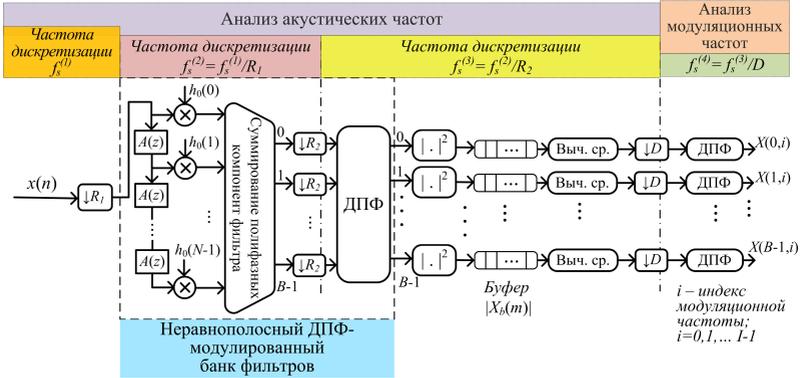


Рис. 6. Схема анализа модуляционного спектра сигнала: анализ акустических частот в шкале барков выполняется при помощи ДПФ с объединением каналов

следующие значения: $R_1 = 7/2$, $R_2 = 6$, $f_s^{(2)} = 44100/R_1 = 12600$ Гц, $f_s^{(3)} = 12600/R_2 = 2100$ Гц. Оставшиеся параметры имели такие же значения, как и в схеме на рисунке 5.

В качестве фильтра-прототипа для банка фильтров рассчитан КИХ-фильтр 200 порядка [29]. Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) результирующего неравнополосного банка фильтров показана на рисунке 7.

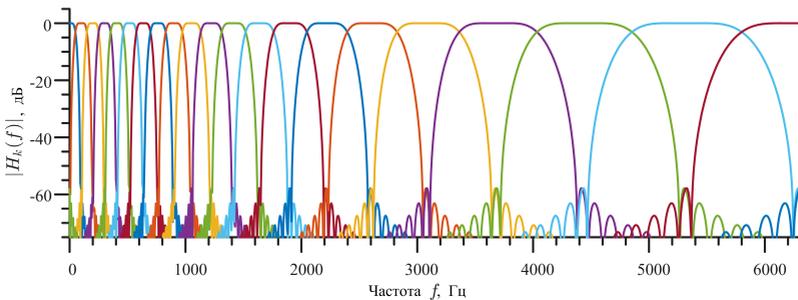


Рис. 7. АЧХ 20-канального неравнополосного ДПФ-модулированного банка фильтров, используемого в схеме на рисунке 6; коэффициент фазового преобразования $\alpha = 0,52$ (выбирался согласно выражению (9))

Как упоминалось ранее, отличительная черта неравнополосного ДПФ-модулированного банка фильтров состоит в том, что временной масштаб, анализирующих функций (фильтров) не является постоянным, но зависит от анализируемой полосы частоты. Низкие частоты анализиру-

ются на большем временном окне, а с возрастанием частоты окно анализа уменьшается. Таким образом происходит имитация представления сигнала периферийной частью слуховой системы человека. На рисунке 8 показаны выборочные примеры импульсных характеристик фильтров, входящих в состав банка.

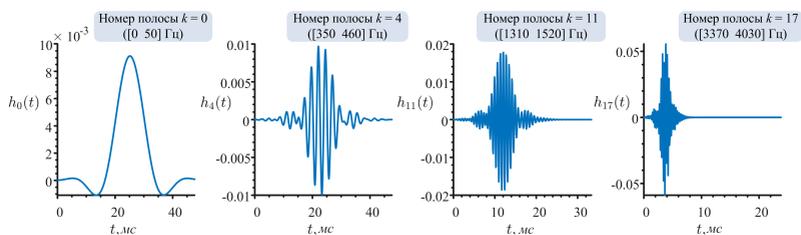


Рис. 8. Вид импульсных характеристик неравнополосного банка фильтров (на графиках показаны только действительная часть импульсных характеристик)

Анализ сигнала в неравнополосном ДПФ-модулированном банке фильтров имеет сходство с вейвлет-анализом (временной масштаб окна анализа зависит от анализируемой ширины полосы частот). Разница заключается в том, что в неравнополосном банке фильтров за управление шириной полос и временным масштабом импульсных характеристик фильтров отвечает один коэффициент фазового преобразования α , в то время как в вейвлет-анализе необходимо непосредственно задавать коэффициент масштабирования для каждой отдельной полосы. Кроме того, как показано в [30], точность аппроксимации психоакустической шкалы при использовании пакета дискретного вейвлет преобразования ниже, чем в случае использования банка фильтров с фазовым преобразованием.

5. Пример анализа речевого сигнала. На рисунке 9 показан пример анализа одного и того же речевого сигнала при помощи ДПФ с объединением каналов и при помощи неравнополосного банка фильтров. Анализ выполнялся согласно схемам на рисунках 5 и 6. Данное представление сигнала (рис. 9) соответствует тому, которое подается на анализ модуляционных частот (для улучшения визуализации операция вычитания среднего значения не выполнялась, а сами значения показаны в логарифмическом масштабе).

Приведенные графики выявляют особенности анализа, присущие рассматриваемым схемам. Схема анализа на основе ДПФ формирует сглаженное частотно-временное распределение энергии сигнала за счет относительно широкого (40 мс) временного окна анализа. В свою очередь, схема анализа на основе неравнополосного банка фильтров позволяет

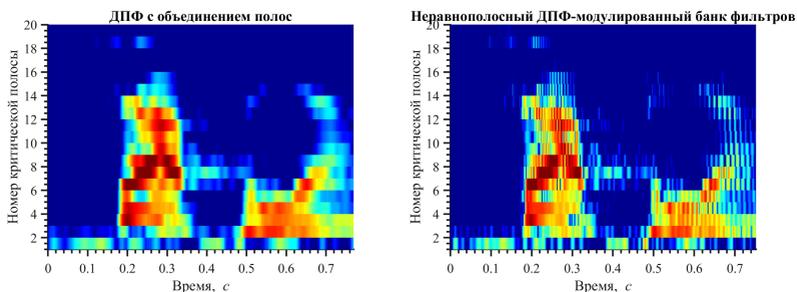


Рис. 9. Представление речевого сигнала (слово «Цапля», произнесенное мужским голосом) в системах анализа на основе ДПФ с объединением полос (слева) и на основе неравнополосного банка фильтров (справа)

получить более детализированное представление. На низких частотах (1-6 критические полосы) рассматриваемые представления схожи, поскольку эффективная длина окон анализа в обеих схемах для данных частот приблизительно совпадает. Однако, на более высоких частотах, в схеме на основе ДПФ наблюдается размытость спектральных составляющих, в то время как в схеме на основе неравнополосного банка фильтров высокочастотные компоненты имеют хорошую временную локализацию.

6. Применение параметров модуляционного спектра для выявления патологии голосового аппарата. Акустический анализ голоса используется при построении систем детектирования неврологических заболеваний [31], таких как болезнь Паркинсона [32,33], боковой амиотрофический склероз [34–37] и другие. [38]. Его также применяют для выявления заболеваний гортани, таких как узлы, полипы, парезы [39,40], рак [41] и прочие [42]. В большинстве подобных работ исследователи используют методы анализа во временной области (джиттер, шиммер) [37,41,43], а также методы анализа в частотной и кепстральной областях [31,32,34,40], которые первоначально использовались в системах распознавания речи. Имеется относительно немного работ, описывающих применение параметров модуляционного спектра к задаче выявления патологии голосового аппарата. Например, в [19] описывается применение признаков, полученных в из модуляционного спектра, для построения систем детектирования и классификации патологий голосового аппарата. Использование модуляционных признаков в задаче детектирования патологии позволило получить такую же точность (~94%), как и использование кепстральных признаков. Однако в задаче классификации патологии, когда классификатору нужно было отличить одну патологию от другой, модуляционные признаки поз-

волили получить точность значительно большую, чем признаки на основе кепстра.

В настоящей работе анализировалось применение параметров модуляционного спектра, полученных при помощи схем, показанных на рисунках 5 и 6 для детектирования патологии голосового аппарата. Использовались три различные речевые базы данных: 1) база записей голосов (протяжный звук [а]) пациентов с БАС [37]; 2) база коротких речевых фраз пациентов с БАС [44]; 3) база записей голосов пациентов с заболеванием гортани [40].

6.1. Описание эксперимента. Эксперимент проводился в три этапа: 1) подготовка обучающей выборки; 2) ранжирование признаков; 3) обучение и тестирование классификатора с использованием различного числа признаков.

На первом этапе исходная база звуковых файлов переводилась в параметры модуляционного спектра (согласно схемам на рисунках 5 и 6). Поскольку сигнала анализировался сегментами длительностью 0,8 с, а средняя длительность анализируемых звуковых файлов превышала 3 с, то для каждого файла получалось несколько выходных значений модуляционного спектра. Каждое такое выходное значение $X(b, i)$ преобразовывалось в вектор $\mathbf{x} = [x_j]$, следующим образом:

$$X(b, i) \mapsto x_j, \quad j = (i - 1)B + b,$$

где $b = 1, \dots, B$ – номер критической полосы; $i = 1, \dots, I$ – номер модуляционной частоты; $j = 1, \dots, J$ – номер компоненты вектора \mathbf{x} ; $J = B \times I$ – общее число параметров модуляционного спектра. Каждому характеристическому вектору $\mathbf{x}^{(m)}$ ставилась в соответствие метка класса $y^{(m)}$ (равная «1», если в голосе есть патология и «-1» в противном случае). В результате анализа всей базы голосов формировалась обучающая выборка $\{\mathbf{x}^{(m)}, y^{(m)}\}$, $m = 1, \dots, M$, где M – общее число векторов в обучающей выборке.

На втором этапе для полученной обучающей выборки выполнялось ранжирование признаков (т.е. параметров модуляционного спектра) методом LASSO (описание данного метода приводится ниже). Результатом ранжирования является перестановка

$$\sigma(z) = j, \quad z, j \in \{1, \dots, J\},$$

которая переупорядочивает индексы параметров модуляционного спектра в порядке их значимости. Например, $\sigma(1)$ указывает индекс наиболее

значимого параметра, $\sigma(2)$ – следующий по значимости параметр и так далее.

На третьем этапе выполнялось обучение и тестирование классификатора методом перекрестной проверки по K блокам ($K = 4$). Причем разбиение на блоки выполнялось на уровне дикторов и, таким образом, тестовый и обучающий наборы содержали вектора, относящиеся к голосам разных дикторов. Процедура перекрестной проверки выполнялась 75 раз, для того, чтобы проверить работу классификатора с различным числом признаков (от 1 до 75). При этом на k -м запуске для классификатора выбирались признаки, имеющие ранг с 1 по k . По результатам перекрестных проверок строился график, который показывал, как изменяется точность классификатора при увеличении числа признаков.

Описанный эксперимент выполнялся для данных, полученных в результате анализа звуковых сигналов схемой на основе ДПФ и схемой на основе банка фильтров.

6.2. Отбор признаков и классификация. Как указывалось ранее, в результате анализа входного сигнала длительностью $T = 800$ мс при помощи схем, показанных на рисунках 5 и 6, получается число параметров модуляционного спектра, равное $B \times I = 20 \times 257 = 5140$. Очевидно, что не все они являются информативными для задачи выявления патологии голосового аппарата. Для отбора признаков разработан ряд методов таких, как, например, Relief [45], mRMR [46], LASSO [47], QoV [48]. В процессе проведения экспериментов были испробованы все указанные методы, однако результаты, полученные с использованием метода LASSO, значительно превосходили все прочие, поэтому в статье описаны только они. Отбор подходящего подмножества признаков не только позволяет ускорить процесс обучения классификатора, поскольку уменьшается число параметров обучения, но и помогает избежать переобучения [45]. Кроме того, анализируя отобранные признаки, можно понять какие именно параметры наиболее важны для правильной классификации.

Метод LASSO (англ. *least absolute shrinkage and selection operator*), используемый в данной работе, основан на решении задачи линейной регрессии [47]:

$$\hat{\beta}^{\text{lasso}} = \underset{\beta}{\operatorname{argmin}} \left(\frac{1}{2} \sum_{m=1}^M (y^{(m)} - \beta_0 - \sum_{j=1}^p x_j^{(m)} \beta_j)^2 + \lambda \sum_{j=1}^p |\beta_j| \right), \quad (10)$$

где M – число примеров в обучающей выборке; y_i – метка класса i -го примера («1» – голос с патологией, «-1» – голос без патологии); $x_j^{(m)}$ – j -й признак m -го примера; β_j – j -й коэффициент линейной модели; λ – параметр регуляризации. Решение (10) при достаточно большом λ приводит к тому, что часть коэффициентов (предикторов) β становятся в точности нулевыми. Поэтому, решая (10) для ряда возрастающих значений параметра регуляризации λ и фиксируя порядок, в котором модель «отбрасывает» признаки, можно ранжировать их по значимости (первыми отбрасываются наименее значимые признаки).

Для решения задачи бинарной классификации использовался метод на основе линейного дискриминантного анализа (ЛДА). В методе ЛДА строится функция принадлежности к классу:

$$f(\mathbf{x}) = \text{sign} \left(\sum_{j=1}^p w_j x_j + w_0 \right), \quad (11)$$

где w_j – весовые коэффициенты, $\mathbf{x} = [x_1 x_2 \dots x_p]$ – вектор признаков; w_0 – смещение; $\text{sign}(a)$ – функция возвращающая, знак числа a . Если $f(\mathbf{x}) = 1$, то вектор \mathbf{x} относят к классу голосов с патологией, а при $f(\mathbf{x}) = -1$ к классу здоровых голосов. Подробности реализации метода ЛДА можно найти в [47].

6.3. Оценка точности классификатора. Для оценки производительности классификатора использовался метод перекрестной проверки по K блокам (англ. *K-fold cross-validation*) [45]. Исходная обучающая выборка перемешивалась случайным образом и разбивалась на K блоков. Далее выполнялось обучение классификатора, причем один из блоков выступал как тестовый набор, а оставшиеся $K - 1$ блоков составляли обучающий набор. Эта процедура повторялась K раз так, чтобы каждый блок один раз выступил в роли тестового набора. Метки, присвоенные классификаторами, для тестовых наборов сохранялись, и выполнялась оценка точности работы классификатора:

$$\text{Acc} = \frac{TP + TN}{TP + FP + FN + TN}, \quad (12)$$

где TP , TN , FP , FN – количество истинно положительных, истинно отрицательных, ложно положительных и ложно отрицательных результатов классификации соответственно. Процедура перекрестной проверки повторялась 40 раз, после чего вычислялись выборочное среднее и среднеквадратичное отклонение (СКО) параметра точности классификатора.

6.4. Результаты экспериментов. В первом эксперименте по детектированию патологии голосового аппарата использовалась база голосов из исследования [37], содержащая записи протяжного звука [a] 15 пациентов с БАС и 39 здоровых людей. В [37] использовались голоса пациентов с БАС, чья речь обладала хорошей разборчивостью, но имела признаки патологии, слышимые для врача-специалиста, но трудно различимые для неподготовленного слушателя. В результате перевода звуковой базы в модуляционные параметры получена выборка из 877 обучающих векторов (650 – группа здоровых, 227 – группа с БАС). На рисунке 10 приводится график, показывающий, как изменялась точность классификации при увеличении числа признаков в характеристическом векторе. На графике указано среднее значение точности, а также ее СКО.

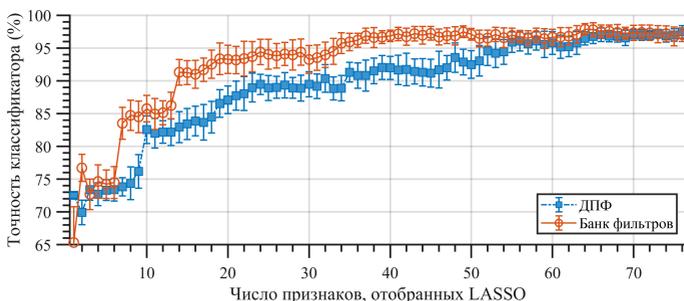


Рис. 10. Точность классификатора, при использовании параметров модуляционного спектра, полученных в схемах на основе ДПФ и банка фильтров

Анализируя график на рисунке 10, можно заметить, что признаки, полученные в схеме на основе банка фильтров, обеспечивают лучшую точность. При числе признаков $p = 55$ и более классификаторы показывают приблизительно равную точность.

В таблице 1 приведена точность классификации в зависимости от схемы получения признаков, при ограничении на размерность характеристического вектора. Данное ограничение обусловлено тем, что при построении классификатора всегда желательно иметь меньшее число признаков, но обеспечивающих лучшую точность.

Следует отметить, что эффективность модуляционных параметров, полученных в схеме с банком фильтров, выражается в том, что с увеличением числа признаков точность классификации возрастает быстрее, чем в случае использования модуляционных параметров, оцененных в схеме на основе ДПФ. Так, например, для достижения точности 93,4% классификатору требуется 19 модуляционных параметров, полученных в

Таблица 1. Точность классификации в зависимости от используемого числа признаков (p) для базы голосов [37]. Для каждого интервала в скобках указано число признаков, при котором достигается наибольшая точность

	Точность классификации, %						
	$p \leq 10$	$p \leq 20$	$p \leq 30$	$p \leq 40$	$p \leq 50$	$p \leq 60$	$p \leq 70$
Схема на основе ДПФ, %	82,6 (10)	87,1 (20)	89,6 (24)	92,0 (39)	93,5 (48)	96,1 (58)	97,0 (66)
Схема на основе банка фильтров, %	85,7 (10)	93,4 (19)	94,4 (24)	96,9 (37)	97,5 (49)	97,5 (49)	97,9 (64)

схеме на основе банка фильтров. Аналогичная точность классификации достигается лишь при использовании 48 модуляционных параметров из схемы на основе ДПФ.

Второй эксперимент заключался в построении классификаторов для решения задачи детектирования патологии голосового аппарата на основе анализа речевых сигналов. Использовалась база речевых сигналов из работы [44], которая содержала 15 записей речи пациентов с БАС и 15 записей речи здоровых людей. Каждая запись представляла собой последовательность из трех слов «раз, два, три». Речь пациентов с БАС обладала хорошей разборчивостью, но имела признаки заболевания, слышимые для врача-специалиста, но слабо ощутимыми для неподготовленного слушателя. В результате перевода речевой базы в модуляционные параметры получена выборка из 221 обучающего вектора (106 – группа здоровых, 115 – группа с БАС). На рисунке 11 показан график изменения точности классификации при увеличении числа модуляционных параметров. В таблице 2 приведена точность классификации при ограничении числа признаков, полученных в схемах на основе ДПФ и банка фильтров.

Анализируя график на рисунке 11, можно заметить, что признаки, полученные в схеме на основе ДПФ, обеспечивают лучшую точность. Тем не менее, при числе признаков $p \geq 67$ классификаторы имеют приблизительно равную точность.

В третьем эксперименте строился классификатор для выявления патологии гортани на основе анализа голосового сигнала (протяжного произнесения звука [а]). Использовалась база голосов из работы [40], содержащая 30 записей голосов с различными видами патологии гортани и 30 записей голосов здоровых людей. В результате перевода звуковой базы в модуляционные параметры получена выборка из 280 обучающих векторов (185 – группа здоровых, 95 – группа с патологиями гортани).

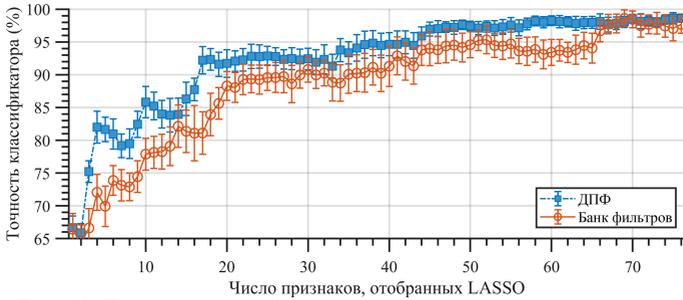


Рис. 11. Точность классификаторов, при использовании параметров модуляционного спектра, полученных в схемах основе ДПФ и банка фильтров

Таблица 2. Точность классификации в зависимости от используемого числа признаков (p) для речевой базы [44]. Для каждого интервала в скобках указано число признаков, при котором достигается наибольшая точность

	Точность классификации, %						
	$p \leq 10$	$p \leq 20$	$p \leq 30$	$p \leq 40$	$p \leq 50$	$p \leq 60$	$p \leq 70$
Схема на основе ДПФ, %	85,8 (10)	92,3 (18)	92,9 (23)	94,8 (39)	97,6 (49)	98,2 (60)	98,5 (70)
Схема на основе банка фильтров, %	77,9 (10)	88,3 (20)	90,8 (30)	91,3 (40)	94,6 (50)	95,3 (52)	98,6 (69)

На рисунке 12 показан график точности полученных классификаторов. Точность классификации в зависимости от числа признаков и схемы их извлечения приведена в таблице 3.

Анализируя график на рисунке 12, можно заметить, что признаки, полученные в схеме на основе банка фильтров, во всех случаях обеспечивают большую точность. Однако при числе признаков $p \geq 58$ классификаторы имеют приблизительно равную точность.

7. Обсуждение результатов. Важным практическим результатом проведенных экспериментов является то, что достигаемая в них точность классификации, выполненная на основе параметров модуляционного спектра, выше точности классификаторов, описанных в исходных работах, откуда взяты базы голосов. Это говорит о том, что параметры модуляционного спектра являются важными признаками для задач выявления патологий голосового аппарата. Полученные результаты согласуются с предшествующими работами в данной области. Так, в [19] отмечалось,

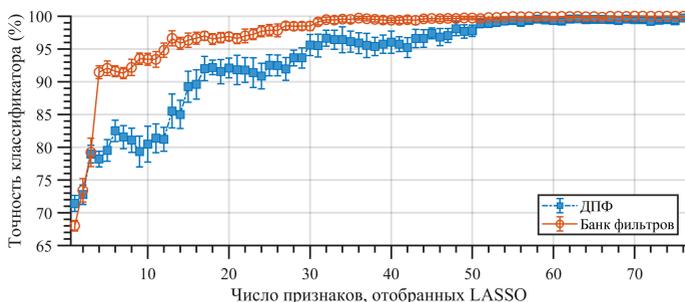


Рис. 12. Точность классификаторов, при использовании параметров модуляционного спектра, полученных при помощи ДПФ и на основе банка фильтров. Использована база голосов для детектирования заболеваний гортани [40]

Таблица 3. Точность классификации в зависимости от используемого числа признаков (p) для базы голосов [40]. Для каждого интервала в скобках указано число признаков, при котором достигается наибольшая точность

	Точность классификации, %						
	$p \leq 10$	$p \leq 20$	$p \leq 30$	$p \leq 40$	$p \leq 50$	$p \leq 60$	$p \leq 70$
Схема на основе ДПФ, %	82,3 (6)	92,2 (18)	95,6 (30)	96,6 (32)	98,0 (48)	99,6 (58)	99,6 (63)
Схема на основе банка фильтров, %	93,5 (9)	97,0 (17)	98,5 (27)	99,7 (36)	99,7 (49)	99,9 (55)	100,0 (70)

что параметры модуляционного спектра хорошо подходят для оценки и классификации патологий гортани. Также в работе [35] отмечалось, что наиболее информативными признаками для выявления заболевания БАС по голосу (как мужчин, так и женщин) являлись признаки, полученные на основе RASTA анализа.

Сравнивая две рассмотренных в работе схемы извлечения параметров модуляционного спектра, нельзя сделать вывод, что какая-то из них однозначно лучше или хуже. Так, в случае детектирования болезни БАС по речи (эксперимент 2) параметры, полученные в схеме на основе ДПФ, при меньшем числе признаков позволяли более точно выполнять классификацию. Отсюда следует вывод, что использование схемы на основе ДПФ предпочтительнее в случае, когда анализируемый сигнал является речью. Возможно, что в случае речевого сигнала параметры,

получаемые в схеме на основе банка фильтров, имеют большую вариацию и поэтому хуже подходят для детектирования патологии. Однако в случае, когда анализируемым сигналом являлось протяжное произнесение звука [a] (эксперименты 1 и 3) признаки, полученные в схеме на основе банка фильтров, позволили выполнять классификацию более эффективно (большая точность, при меньшем числе признаков). Таким образом, можно сделать вывод, что схема извлечения модуляционных параметров на основе банка фильтров лучше подходит для описания процесса фонации в задаче детектирования патологии голосового аппарата, чем схема на основе ДПФ.

В таблице 4 приводятся результаты сравнения точности классификации, достигнутые в исходных работах, откуда были взяты речевые базы с точностью, полученной в данной работе. В качестве точности, достигнутой в данной работе, бралась максимальная точность, полученная при использовании параметров из схемы на основе банка фильтров (правый столбец последней строки в таблицах 1–3). Низкая точность классификации в оригинальных статьях объясняется тем, что в них использовались относительно простые акустические признаки, которые не позволяли точно разделить голоса на норму и патологию.

Таблица 4. Сравнение точности классификации

Речевая база данных	Оригинальная работа	Данная работа
База голосов пациентов с БАС [37]	91,6± 2,3 %	97,9± 1,5 %
Речевая база пациентов с БАС [44]	84,8± 3,5 %	98,6± 1,2 %
База голосов пациентов с патологиями гортани [40]	83,3± 1,2 %	100,0± 0,1 %

8. Заключение. Исследован вопрос анализа модуляционного спектра звукового сигнала на основе неравнополосной обработки. Рассмотрены две схемы получения параметров модуляционного спектра, отличающиеся в части анализа акустических частот. В первом случае использовалось ДПФ с объединением каналов, а во втором – неравнополосный ДПФ-модулированной банк фильтров. Показаны особенности анализа сигнала обеими предложенными схемами. В экспериментальном исследовании выполнено применение разработанных схем анализа для извлечения параметров модуляционного спектра в задаче детектирования патологии голосового аппарата. Для эксперимента использовались три различные речевые базы. Оказалось, что параметры модуляционного спектра, полученные в схеме на основе ДПФ, более предпочтительны для выявления патологии по речевому сигналу. Напротив, параметры, полученные в схеме

на основе банка фильтров, более эффективны в задаче детектирования патологии на основе анализа голосового сигнала (протяжного произнесения звука [a]). Во всех случаях полученные классификаторы имели высокую точность >97%, что свидетельствует о несомненной практической значимости параметров модуляционного спектра для построения медицинских систем анализа и оценки патологических изменений в голосе.

Авторы благодарят главного научного сотрудника неврологического отдела РНПЦ неврологии и нейрохирургии (г. Минск), д.м.н. Ю.Н. Рушкевич, а также заведующую фониатрическим отделением РНПЦ оториноларингологии (г. Минск) Н.С. Конойко за доступ к базам речевых сигналов.

Литература

1. *Atlas L., Shamma S.A.* Joint acoustic and modulation frequency // *EURASIP Journal on Applied Signal Processing*. 2003. vol. 7. pp. 668–675.
2. *Ding N. et al.* Temporal modulations in speech and music // *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*. 2017. vol. 81. pp. 181–187.
3. *Elhilali M.* Modulation Representations for Speech and Music // *Timbre: Acoustics, Perception, and Cognition*. 2019. pp. 335–359.
4. *Arai T. et al.* Syllable intelligibility for temporally filtered LPC cepstral trajectories // *The Journal of the acoustical society of America*. 1999. vol. 105. no. 5. pp. 2783–2791.
5. *Greenberg S., Kingsbury B.E.D.* The modulation spectrogram: In pursuit of an invariant representation of speech // *Proceedings of IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP)*. 1997. vol. 3. pp. 1647–1650.
6. *Tyagi V. et al.* Mel-cepstrum modulation spectrum (MCMS) features for robust ASR // *2003 IEEE Workshop on automatic speech recognition and understanding*. 2003. pp. 399–404.
7. *Рылов А.С.* Анализ речи в распознающих системах // Бестпринт. 2003. 264 с.
8. *Yan B. C. et al.* Exploring Low-Dimensional Structures of Modulation Spectra for Robust Speech Recognition // *INTERSPEECH*. 2017. pp. 3637–3641.
9. *Moritz N. et al.* Multi-channel speech enhancement and amplitude modulation analysis for noise robust automatic speech recognition // *Computer Speech & Language*. 2017. vol. 46. pp. 558–573.
10. *Hermansky H., Morgan N.* RASTA processing of speech // *IEEE Transactions on speech and audio processing*. 1994. vol. 2. no. 4. pp. 578–589.
11. *Nidhyananthan S. S., Kumari R. S. S., Selvi T. S.* Noise robust speaker identification using RASTA–MFCC feature with quadrilateral filter bank structure // *Wireless Personal Communications*. 2016. vol. 91. no. 3. pp. 1321–1333.
12. *Петровский А.А., Башун Я.М.* Пре-процессор повышения качества зашумленной и ревербирующей речи для систем улитковой имплантации // *Цифровая обработка сигналов*. 2002. № 2. С. 48–61.
13. *Mowlae P., Blass M., Kleijn W. B.* New results in modulation-domain single-channel speech enhancement // *IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*. 2017. vol. 25. no. 11. pp. 2125–2137.
14. *Sukittanon S., Atlas L.E., Pitton J.W.* Modulation-scale analysis for content identification // *IEEE Transactions on signal processing*. 2004. vol. 52. no. 10. pp. 3023–3035.
15. *Avila A. R. et al.* Feature pooling of modulation spectrum features for improved speech emotion recognition in the wild // *IEEE Transactions on Affective Computing*. 2018.

16. *Dau T.* Predicting speech intelligibility based on the modulation spectrum and modulation frequency selectivity // *The Journal of the Acoustical Society of America.* 2018. vol. 143. no. 3. pp. 1916–1916.
17. *Smith C. L. et al.* Extracting dynamic parameters from speech movement data // *The Journal of the acoustical society of America.* 1993. vol. 93. no. 3. pp. 1580–1588.
18. *Giraud A.L. et al.* Representation of the temporal envelope of sounds in the human brain // *Journal of neurophysiology.* 2000. vol. 84. no.3. pp. 1588–1598.
19. *Markaki M., Stylianou Y.* Voice pathology detection and discrimination based on modulation spectral features // *IEEE Transactions on audio, speech, and language processing.* 2011. vol. 19. no. 7. pp. 1938–1948.
20. *Moro-Velázquez L. et al.* Modulation spectra morphological parameters: a new method to assess voice pathologies according to the GRBAS Scale // *BioMed Research International.* 2015. vol. 2015. 13 p.
21. *Benba A. et al.* Using RASTA-PLP for discriminating between different neurological diseases // 2016 International Conference on Electrical and Information Technologies (ICEIT). pp. 406–409.
22. *Moro-Velázquez L., Gómez-García J.A., Godino-Llorente J.I.* Voice pathology detection using modulation spectrum-optimized metrics // *Frontiers in bioengineering and biotechnology.* 2016. vol. 4. pp. 1–13.
23. *Петровский А.А.* Анализаторы речевых и звуковых сигналов: Методы, алгоритмы и практика // Бестпринт. 2009. 456 с.
24. *Kappelan M., Strauss B., Vary P.* Flexible nonuniform filter banks using allpass transformation of multiple order // *Proceedings of 8th european signal processing conference (EUSIPCO).* 1996. pp. 1–4.
25. *Moritz, N., Anemuller J., Kollmeier B.* An auditory inspired amplitude modulation filter bank for robust feature extraction in automatic speech recognition // *IEEE Transactions on audio, speech, and language processing.* 2015. vol. 23. no. 11. pp. 1926–1937.
26. *Оппенгейм А., Джонсон Д., Штейнлиц К.* Вычисление спектров с неравномерным разрешением посредством быстрого преобразования Фурье // *ТИИЭР.* 1971. Т. 59. № 2. С. 138–139.
27. *Galijasevic E., Klierer J.* Design of allpass-based non-uniform oversampled DFT filter banks // *Proceedings of IEEE International conference on acoustics, speech, and signal Processing (ICASSP).* 2002. vol. 2. pp. 1181–1184.
28. *Smith J.O., Abel J.S.* Bark and ERB bilinear transforms // *IEEE Transactions on speech and audio processing.* 1999. vol. 7. no. 6. pp. 697–708.
29. *Lin Y.P., Vaidynathan P.P.* A kaiser window approach for the design of prototype filters of cosine modulated filterbanks // *IEEE signal processing letters.* 1998. vol. 5. no 6. pp. 132–134.
30. *Gülzow T., Engelsberg A., Heute U.* Comparison of a discrete wavelet transformation and a nonuniform polyphase filterbank applied to spectral-subtraction speech enhancement // *Signal processing.* 1998. vol. 64. no. 1. pp. 5–19.
31. *Картов А. А., Кайа Х., Салах А. А.* Актуальные задачи и достижения систем паралингвистического анализа речи // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики.* 2016. Т. 16. №. 4. С. 581–591.
32. *Benba A., Jilbab A., Hammouch A.* Discriminating between patients with Parkinson’s and neurological diseases using cepstral analysis // *IEEE transactions on neural systems and rehabilitation engineering.* 2016. vol. 24. no. 10. pp. 1100–1108.
33. *Soumaya Z. et al.* A hybrid method for the diagnosis and classifying parkinson’s patients based on time–frequency domain properties and K-nearest neighbor // *Journal of Medical Signals and Sensors.* 2020. Т. 10. №. 1. pp. 60–66.

34. *Гвоздович А.Д., Рушкевич Ю.Н., Вашкевич М.И.* Детектирование бульбарных нарушений при боковом амиотрофическом склерозе на основе анализа речевого сигнала // Доклады Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. 2018. Т. 116. № 6. С. 52–58.
35. *Norel R. et al.* Detection of Amyotrophic Lateral Sclerosis (ALS) via Acoustic Analysis // Proceedings of Interspeech'2018. 2018. pp. 377–381.
36. *Куль Т. П. и др.* Методическое и аппаратно-программное обеспечение для регистрации и обработки речевых сигналов с целью диагностики неврологических заболеваний // Информатика. 2019. Т. 16. № 2. С. 27–39.
37. *Vashkevich M., Petrovsky A., Rushkevich Y.* Bulbar ALS detection based on analysis of voice perturbation and vibrato // Proceedings of international conference Signal Processing: Algorithms, Architectures, Arrangements, and Applications (SPA'2019). 2019. pp. 267–272.
38. *Hlavnička J. et al.* Characterizing vocal tremor in progressive neurological diseases via automated acoustic analyses // Clinical Neurophysiology. 2020.
39. *Кожанов А. Л. и др.* Функциональные результаты после открытых вертикальных резекций гортани // Вестник оториноларингологии. 2019. Т. 84. № 1. С. 46–50.
40. *Вашкевич М.И. и др.* Анализ акустических параметров голоса для выявления заболеваний гортани // Информатика. 2020. Т. 17. № 1. С. 78–86.
41. *Лысак А.П.* Акустический анализ голоса в норме и патологии // Речевые технологии. 2012. № 4. С. 68–82.
42. *Тычков А. Ю., Алимуратов А. К., Чураков П. П.* Метод адаптивной обработки сигналов для диагностики органов речевого аппарата // Измерительная техника. 2016. № 5. С. 26–29.
43. *Свистушкин В.М. и др.* Изменения акустических параметров голоса после хирургического лечения хронического тонзиллита // Folia Otorhinolaryngologiae et Pathologiae Respiratoriae. 2018. Т. 24. № 2. С. 46–55.
44. *Vashkevich M., Gvozдович А., Rushkevich Y.* Detection of bulbar dysfunction in ALS patients based on running speech test // Communications in Computer and Information Science. 2019. vol. 1055. pp. 192–204.
45. *Флах П.* Машинное обучение. Наука и искусство построения алгоритмов, которые извлекают знания из данных // М.: ДМК Пресс. 2015. 400 с.
46. *Tsanas A., Little M.A., McSharry P.E.* A methodology for the analysis of medical data // Handbook of Systems and Complexity in Health. 2013. pp. 113–125.
47. *Джеймс Г. и др.* Введение в статистическое обучение с примерами на языке R // М.: ДМК Пресс. 2016. 450 с.
48. *Liu R., Gillie D.F.* Feature selection using order statistics // Proceedings of international conference on Pattern Recognition and Information Processing (PRIP). 2011. pp. 195–199.

Вашкевич Максим Иосифович — канд. техн. наук., доцент; доцент кафедры электронных вычислительных средств Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники (БГУИР). Область научных интересов: методы и алгоритмы цифровой обработка звуковых и речевых сигналов, применение методов математики и информатики в сфере медицинской диагностики. Число научных публикаций — 75. vashkevich@bsuir.by; БГУИР, ул. П. Бровки 6, г. Минск, 220013, РБ; р.т. +37517-2-93-8478.

Азаров Илья Сергеевич — д-р техн. наук., доцент; заведующий кафедры электронных вычислительных средств БГУИР. Область научных интересов: цифровая обработка певческого голоса, системы конверсии голоса, распознавание речи, идентификация диктора, синтез речи по тексту. Число научных публикаций — 90. azarov@bsuir.by; БГУИР, ул. П. Бровки 6, г. Минск, 220013, РБ; р.т. +37517-2-93-8805.

M. VASHKEVICH, I. AZAROV
**VOICE PATHOLOGY DETECTION BASED ON ANALYSIS OF
MODULATION SPECTRUM IN CRITICAL BANDS**

Vashkevich M., Azarov I. Voice Pathology Detection based on Analysis of Modulation Spectrum in Critical Bands.

Abstract. The paper presents an approach to the analysis of the modulation spectrum of a voice signal, in which the primary acoustic analysis is performed in bands of unequal width. Nonuniform analysis corresponds to the psychoacoustic laws of human perception of sound information. In the context of the analysis of the modulation spectrum, the considered approach can significantly reduce the resulting number of parameters, which greatly simplifies the task of detecting pathological changes in the voice signal based on the analysis of the parameters of the modulation spectrum. For frequency decomposition of a signal into bands of unequal width, two methods are considered: 1) DFT with channel combination and 2) the use of a nonuniform filter bank. The first method is characterized by a fixed time window for the analysis of all frequency components, while in the second method the time-frequency analysis plan is consistent with the critical frequency scale of the barks. For each method, a practical signal analysis circuit has been developed and described. The paper presents the experimental data on the application of the developed schemes for the analysis of the modulation spectrum to the problem of detecting pathology in a speech signal. The parameters of the modulation spectrum acted as information signs for a classifier built on the basis of linear discriminant analysis. Three different voice bases were used in the experiment (in two cases, the pathology was neurological ALS disease (amyotrophic lateral sclerosis), and in the third case, diseases of the larynx). The parameters of the modulation spectrum obtained in the DFT-based scheme with channel combining turned out to be more preferable for classification with a small number of features, however, greater accuracy (with an increase in the number of features) made it possible to obtain the parameters obtained in the scheme based on an unequal filter bank. In all cases, the obtained classifiers were highly accurate (more than 97%). The obtained results show that the use of nonuniform time-frequency representation is preferable in the case when the analyzed signal is a sustained vowel phonation, since it provides higher accuracy of pathology detection using fewer modulation parameters.

Keywords: speech signal analysis, critical bands, modulation spectra, feature extraction, voice pathology detection

Vashkevich Maksim — Ph.D., Associate Professor, Associate Professor, Computer Engineering Department, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (BSUIR). Research interests: methods and algorithms of digital signal processing, application of mathematics and computer science methods in the medical diagnostics. The number of publications — 75. vashkevich@bsuir.by; BSUIR, P. Brovkiy str. 6, Minsk, 220013, Belarus; office phone +37517-2-93-8478.

Azarov Ilya — Ph.D., Dr.Sci., Associate Professor, Head of Department, Computer Engineering Department, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (BSUIR). Research interests: digital processing of singing voice, voice conversion systems, speech recognition, speaker identification, text to speech synthesis. The number of publications — 95. azarov@bsuir.by; 6, P.Brovkiy str. Minsk, 220013, Belarus; office phone: +37517293-23-40

References

1. Atlas L., Shamma S.A. Joint acoustic and modulation frequency. *EURASIP Journal on Applied Signal Processing*. 2003. vol. 7. pp. 668–675.
2. Ding N. et al. Temporal modulations in speech and music. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*. 2017. vol. 81. pp. 181–187.
3. Elhilali M. Modulation Representations for Speech and Music. *Timbre: Acoustics, Perception, and Cognition*. 2019. pp. 335–359.
4. Arai T. et al. Syllable intelligibility for temporally filtered LPC cepstral trajectories. *The Journal of the acoustical society of America*. 1999. vol. 105. no. 5. pp. 2783–2791.
5. Greenberg S., Kingsbury B.E.D. The modulation spectrogram: In pursuit of an invariant representation of speech. *Proceedings of IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP)*. 1997. vol. 3. pp. 1647–1650.
6. Tyagi V. et al. Mel-cepstrum modulation spectrum (MCMS) features for robust ASR. *2003 IEEE Workshop on automatic speech recognition and understanding*. 2003. pp. 399–404.
7. Rilov A.S. *Analiz rechi v raspoznajushhiih sistemah*[Speech analysis in recognition systems]. Minsk: Bestprint, 2003. 264 p. (in Russian)
8. Yan B.C. et al. Exploring Low-Dimensional Structures of Modulation Spectra for Robust Speech Recognition. *INTERSPEECH*. 2017. pp. 3637–3641.
9. Moritz N. et al. Multi-channel speech enhancement and amplitude modulation analysis for noise robust automatic speech recognition. *Computer Speech & Language*. 2017. vol. 46. pp. 558–573.
10. Hermansky H., Morgan N. RASTA processing of speech // *IEEE Transactions on speech and audio processing*. 1994. vol. 2. no. 4. pp. 578–589.
11. Nidhyanathan S. S., Kumari R. S. S., Selvi T. S. Noise robust speaker identification using RASTA–MFCC feature with quadrilateral filter bank structure. *Wireless Personal Communications*. 2016. vol. 91. no. 3. pp. 1321–1333.
12. Petrovsky A.A., Bashun Ya.M. [Pre-processor for improving the quality of noisy and reverberant speech for cochlear implant systems]. *Cifrovaja obrabotka signalov - Digital Signal Processing*. 2002. no. 2. pp. 48–61.
13. Mowlaee P., Blass M., Kleijn W. B. New results in modulation-domain single-channel speech enhancement. *IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*. 2017. vol. 25. no. 11. pp. 2125–2137.
14. Sukittanon S., Atlas L.E., Pitton J.W. Modulation-scale analysis for content identification. *IEEE Transactions on signal processing*. 2004. vol. 52. no.10. pp. 3023–3035.
15. Avila A. R. et al. Feature pooling of modulation spectrum features for improved speech emotion recognition in the wild. *IEEE Transactions on Affective Computing*. – 2018.
16. Dau T. Predicting speech intelligibility based on the modulation spectrum and modulation frequency selectivity. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2018. vol. 143. no. 3. pp. 1916–1916.
17. Smith C. L. et al. Extracting dynamic parameters from speech movement data. *The Journal of the acoustical society of America*. 1993. vol. 93. no. 3. pp. 1580–1588.
18. Giraud A.L. et al. Representation of the temporal envelope of sounds in the human brain. *Journal of neurophysiology*. 2000. vol. 84. no.3. pp. 1588–1598.
19. Markaki M., Stylianou Y. Voice pathology detection and discrimination based on modulation spectral features. *IEEE Transactions on audio, speech, and language processing*. 2011. vol. 19. no. 7. pp. 1938–1948.
20. Moro-Velázquez L. et al. Modulation spectra morphological parameters: a new method to assess voice pathologies according to the GRBAS Scale. *BioMed Research International*. 2015. vol. 2015. 13 p.

21. Benba A. et al. Using RASTA-PLP for discriminating between different neurological diseases *Proceedings of International Conference on Electrical and Information Technologies (ICEIT)*. 2016. pp. 406-409.
22. Moro-Velázquez L., Gómez-García J.A., Godino-Llorente J.I. Voice pathology detection using modulation spectrum-optimized metrics. *Frontiers in bioengineering and biotechnology*. 2016. vol. 4. pp. 1–13.
23. Petrovsky A.A. *Analizatory rechevyh i zvukovyh signalov: metody, algoritmy i praktika* [Analyzers of speech and audio signals: methods, algorithms and practices]. Bestprint. 2009. 455 p. (In Russ.).
24. Kappelan M., Strauss B., Vary P. Flexible nonuniform filter banks using allpass transformation of multiple order. *Proceedings of 8th european signal processing conference (EUSIPCO)*. 1996. pp. 1-4.
25. Moritz N., Anemuller J., Kollmeier B. An auditory inspired amplitude modulation filter bank for robust feature extraction in automatic speech recognition. *IEEE Transactions on audio, speech, and language processing*. 2015. vol. 23. no. 11. pp. 1926-1937.
26. Oppenheim A., Johnson D., Steiglitz K. Computation of spectra with unequal resolution using the fast Fourier transform. *Proceedings of the IEEE*. 1971. vol. 59, no. 2. pp. 299–301. (Russ. ed.: Oppengejm A., Dzhonson D., SHtejglic K. *Vychislenie spektrov s neravnomernym razresheniem posredstvom bystrogo preobrazovaniya Fur'e*. TIIER. 1971. vol. 59. no. 2. pp. 138–139).
27. Galijasevic E., Kliewer J. Design of allpass-based non-uniform oversampled DFT filter banks. *Proceedings of IEEE International conference on acoustics, speech, and signal processing (ICASSP)*. 2002. pp. 1181–1184.
28. Smith J.O., Abel J.S. Bark and ERB bilinear transforms. *IEEE Transactions on speech and audio processing*. 1999. vol. 7. no. 6. pp. 697-708.
29. Lin Y.P., Vaidynathan P.P. A kaiser window approach for the design of prototype filters of cosine modulated filterbanks. *IEEE signal processing letters*. 1998. vol. 5. no 6. pp. 132-134.
30. Gülzow T., Engelsberg A., Heute U. Comparison of a discrete wavelet transformation and a nonuniform polyphase filterbank applied to spectral-subtraction speech enhancement. *Signal processing*. 1998. vol. 64. no. 1. pp. 5-19.
31. Karpov A. A. et al. [State-of-the-Art Tasks and Achievements of Paralinguistic Speech Analysis Systems]. *Nauchno-texnicheskij vestnik informacionny'x texnologij, mexaniki i optiki – Journal Scientific and Technical Of Information Technologies, Mechanics and Optics*. 2016. vol. 104. no. 4. pp. 581–592. (In Russ.).
32. Benba A., Jilbab A., Hammouch A. Discriminating between patients with Parkinson's and neurological diseases using cepstral analysis. *IEEE transactions on neural systems and rehabilitation engineering*. 2016. vol. 24. no. 10. pp. 1100–1108.
33. Soumaya Z. et al. A hybrid method for the diagnosis and classifying parkinson's patients based on time–frequency domain properties and K-nearest neighbor. *Journal of Medical Signals and Sensors*. 2020. T. 10. №. 1. pp. 60–66.
34. Gvozdoch A.D., Rushkevich Yu.N., Vashkevich M.I. [Detection of bulbar amyotrophic lateral sclerosis based on speech analysis]. *Doklady Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta informatiki i radioelektroniki - Reports of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics*. 2018. vol. 116. no 6. pp. 52–58. (In Russ.).
35. Norel R. et al. Detection of Amyotrophic Lateral Sclerosis (ALS) via Acoustic Analysis. *Proceedings of Interspeech'2018*. 2018. pp. 377–381.
36. Kul T. P. et al. [Methodical and hardware-software for recording and processing speech signals for diagnosis of neurological diseases]. *Informatika - Informatics*. 2019. vol. 16, no. 2, pp. 27–39. (In Russ.).

37. Vashkevich M., Petrovsky A., Rushkevich Y. Bulbar ALS detection based on analysis of voice perturbation and vibrato. *Proceedings of international conference Signal Processing: Algorithms, Architectures, Arrangements, and Applications (SPA)*. 2019. pp. 267–272.
38. Hlavnička J. et al. Characterizing vocal tremor in progressive neurological diseases via automated acoustic analyses // *Clinical Neurophysiology*. – 2020.
39. Kozhanov A. L. et al [The functional outcomes of open vertical resections of the larynx]. *Vestnik otorinolaringologii - Bulletin of Otorhinolaryngology*. 2019. vol. 84. no. 1. pp. 46–50. (In Russ.).
40. Vashkevich M. et al. [Analysis of acoustic voice parameters for larynx pathology detection]. *Informatika - Informatics*. 2020. vol.17. no 1. pp. 78–86. (In Russ.).
41. Lysak A. P. [Acoustic voice analysis in normal condition and pathologies]. *Rechevye tekhnologii - Speech Technologies*. 2012. no. 4. pp. 68–82.
42. Tychkov A. Yu., Alimuradov A. K., Churakov P. P. [Adaptive signal processing method for the diagnosis of organs of the speech apparatus] *Izmeritel'naya tekhnika. - Measurement Techniques* 2016. no. 5. pp. 26–29.
43. Svistushkin V.M. et al [Changes in the acoustic parameters of the voice after the surgical treatment of the chronic tonsillitis] // *Folia otorhinolaryngologiae et pathologiae respiratoriae*. 2018. vol. 24. no 2. pp. 46-55. (In Russ.).
44. Vashkevich M., Gvozdovich A., Rushkevich Y. Detection of bulbar dysfunction in ALS patients based on running speech test. *Communications in Computer and Information Science*. 2019. vol. 1055. pp. 192–204.
45. Flach P. *Machine learning: The art and science of algorithms that make sense of data*. Cambridge University Press. 2012. 409 p. (Russ. ed.: Flah P. *Mashinnoe obuchenie. Nauka i iskusstvo postroeniya algoritmov, kotorye izvlekayut znaniya iz dannyh*. M.: DMK Press. 2015. 400 p.).
46. Tsanas A., Little M.A., McSharry P.E. A methodology for the analysis of medical data // *Handbook of Systems and Complexity in Health*. 2013. pp. 113–125.
47. James G. et al. *An introduction to statistical learning with applications in R*. – New York : Springer, 2013. p. 426. (Russ. ed.: Dzhejms G. et al. *Vvedenie v statisticheskoe obuchenie s primerami na yazyke R*. M.: DMK Press. 2016. 450 p.).
48. Liu R., Gillie D.F. Feature selection using order statistics *Proceedings of international conference on Pattern Recognition and Information Processing (PRIP)*. 2011. pp. 195-199.

Ф.В. ГУНДЕЛАХ, Л.А. СТАНКЕВИЧ, К.М. СОНЬКИН, Ж.В. НАГОРНОВА,
Н.В. ШЕМЯКИНА

ПРИМЕНЕНИЕ ИНТЕРФЕЙСОВ «МОЗГ-КОМПЬЮТЕР» В АССИСТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ

Гунделах Ф.В., Станкевич Л.А., Соськин К.М., Нагорнова Ж.В., Шемякина Н.В.

Применение интерфейсов «мозг-компьютер» в ассистивных технологиях.

Аннотация. Рассматриваются вопросы применения интерфейсов мозг-компьютер в ассистивных технологиях, в частности для управления роботизированными устройствами. Неинвазивные интерфейсы мозг-компьютер строятся на основе обработки и классификации электроэнцефалографических сигналов, показывающих биоэлектрическую активность в различных зонах мозга. Системы на основе неинвазивных интерфейсов мозг-компьютер после обучения способны декодировать электроэнцефалографические паттерны, соответствующие разным воображаемым движениям человека, а также паттерны, соответствующие различным аудиовизуальным стимулам. Сформулированы и приведены требования, которым должны отвечать интерфейсы мозг-компьютер, работающие в режиме реального времени, чтобы биологическая обратная связь была эффективна и мозг пользователя смог правильно ассоциировать ответы с событиями. Рассматривается процесс обработки электроэнцефалографических сигналов в неинвазивных интерфейсах мозг-компьютер, включающий пространственную и временную фильтрацию, удаление двигательных артефактов, выделение признаков и классификацию. Описываются и сравниваются классификаторы, основанные на методе опорных векторов, искусственных нейронных сетях и римановой геометрии. Показано, что такие классификаторы могут обеспечить точность 60-80% при распознавании от двух до четырех классов воображаемых движений в режиме реального времени по одной пробе. Приведены примеры использования таких классификаторов для управления роботизированными устройствами, помогающими здоровым людям лучше выполнять повседневные функции и улучшающими качество жизни людей с ограниченными возможностями. Проведены эксперименты по управлению роботизированной рукой с пятипалой кистью, мобильной сенсорной платформой и антропоморфным роботом.

Ключевые слова: ассистивные технологии, роботизированные устройства, интерфейсы мозг-компьютер, электроэнцефалография, воображаемые движения, методы классификации, нейронные сети, метод опорных векторов, риманова геометрия.

1. Введение. В настоящее время большое внимание уделяется ассистивным технологиям, которые могут обеспечить людям с ограниченными возможностями лучшее качество жизни, а также могут расширить возможности здоровых людей [1, 2]. В ассистивных технологиях широко используются роботизированные устройства, выполняющие за людей, но по их командам, разнообразные работы и действия (аватары). Такие ассистивные устройства могут управляться непосредственно или удаленно человеком-оператором, а также функционировать автономно. В качестве роботизированных устройств в ассистивных технологиях для обездвиженных людей созданы механизированные инвалидные

кресла, специализированные мобильные платформы с интеллектуальным управлением, а также умные протезы и манипуляционные устройства типа третьей руки. Разрабатываются также экзоскелеты и мобильные антропоморфные роботы [3]. Согласно прогнозам [4], экзоскелеты и антропоморфные роботы должны в ближайшем будущем широко применяться для помощи обездвиженным людям в больницах и дома.

Роботизированные устройства могут быть помощниками не только больных, но и здоровых людей. Примерами являются роботизированные бытовые приборы, такие как уборщики мусора и пылесосы, стиральные машины и прочее. XXI век – это век роботов, и большим потенциалом в сфере обслуживания обладают роботы-гуманоиды. Такие роботы не только имеют человекоподобную форму, но также демонстрируют паттерны поведения, присущие людям. В будущем они могут стать полноценными помощниками людей в быту, сервисе и производстве.

Удаленное непосредственное управление роботизированными устройствами может быть реализовано различными способами, но при работе с обездвиженными людьми необходимы средства коммуникации человека и робота, не требующие движения для управления. Таким же образом может быть реализовано удаленное командное (супервизорное) управление автономными роботизированными устройствами.

Естественное взаимодействие между людьми и электронными машинами, включая роботов, организуется при помощи интеллектуальных пользовательских интерфейсов: графических, речевых, жестовых, многомодальных и так далее [5]. Одним из перспективных способов реализации коммуникаций человека с ограниченными двигательными способностями и робота является использование, так называемых, интерфейсов «мозг-компьютер» (ИМК). ИМК – современная технология и средство, способное обеспечивать взаимодействие человека с внешними цифровыми и электромеханическими устройствами на основе регистрации и декодирования сигналов электрической активности головного мозга [6]. Для обездвиженных людей, которым необходимо самостоятельно управлять сервисными роботизированными устройствами, может быть полезен ИМК, основанный на распознавании воображаемых человеком движений [7, 8].

В качестве средства получения информации о биоэлектрической активности мозга, соответствующей моторным командам, часто используется электроэнцефалография (ЭЭГ). Современные исследования показывают, что ЭЭГ, как неинвазивная и недорогая технология, имеет значительный потенциал для создания ИМК. Однако фактором, ограничивающим практическое применение ИМК на основе сигналов ЭЭГ, является

сложность надежной и воспроизводимой интерпретации (декодирования) сигналов мозга. Другим фактором является сложность классификации ЭЭГ-паттернов вообразаемых движений в реальном времени.

Развитие неинвазивных ИМК идет по пути создания гибридных ИМК, которые основаны на слиянии разных модальностей или смешивании различных паттернов нейрональных ответов одной модальности [9]. Гибридные ИМК позволяют улучшить точность классификации вообразаемых моторных команд и понизить уровень рабочей нагрузки на оператора при управлении роботизированными устройствами [10]. При создании гибридных ИМК могут комбинироваться различные методы, например ЭЭГ и сигналы инфракрасного излучения (fNIRS, functional near-infrared spectroscopy) [11], или вызванные потенциалы P300 и SSVEP (steady state visually evoked potentials — зрительные вызванные потенциалы устойчивого состояния) [12, 13]. Исследования в этом направлении показывают, что гибридные ИМК могут эффективно использоваться во многих приложениях, связанных с управлением инвалидными креслами и другими роботизированными ассистивными устройствами [14].

В определенной степени конкурентом ИМК на базе ЭЭГ в системах управления роботизированными устройствами являются интерфейсы на базе электроокулографических (EOG) сигналов, которые регистрируются при движении глаз специальными наклеенными датчиками в определенных точках лица. Недавно в таких интерфейсах стали использоваться новые гибкие биоэлектроды, подобные коже лица, что значительно повысило их эффективность [15].

В настоящее время некоторые российские научные группы и организации, многие из которых известны на международном уровне, проводят исследования, связанные с созданием ИМК [16-18], что говорит о попытке создать интерфейс «человек-компьютер» с использованием ИМК на основе сигналов ЭЭГ. В общем случае такие средства позволяют обнаруживать некоторые ментальные команды человека, используя, например, вызванные событием потенциалы P300 [19]. Однако такие интерфейсы ограничены количеством степеней свободы и могут использоваться лишь для базового управления устройством с низким быстродействием.

Целью данной работы является разработка системы управления ассистивными роботизированными устройствами на базе ИМК, выполняющего классификацию вообразаемых движений по сигналам ЭЭГ. В разделе 2 определены ассистивные технологии и роботизированные устройства с такими системами управления, которые могут быть использованы, например, для помощи людям с ограниченными

двигательными способностями в условиях клиник и на дому. В разделе 3 кратко представлены неинвазивные ИМК. Раздел 4 описывает структуру и методiku применения ИМК в ассистивных технологиях. В разделе 5 представлен главный компонент ИМК – машинный классификатор, описаны методы классификации сигналов ЭЭГ и проведено сравнение методов с целью выбора оптимальных вариантов классификаторов. Примерами применения ИМК для управления ассистивными роботами, которые рассматриваются в разделе 6, являются: манипулятор типа третьей руки, роботизированная платформа и антропоморфный робот. В заключении даны рекомендации по разработке ИМК для ассистивных технологий и намечены будущие исследования по совершенствованию системы.

2. Ассистивные технологии. Современные ассистивные технологии базируются на использовании роботизированных устройств, таких как манипуляторы, автоматические тележки для перевозки мелких грузов, инвалидные коляски, экзоскелеты, исполнительные устройства «умного» дома и прочее. Эти устройства могут непосредственно или удаленно управляться людьми, например, через кнопочные пульта или джойстики. Однако в случае людей с ограниченными возможностями часто требуется использовать дистанционные средства коммуникации, например аудиовизуальные интерфейсы, позволяющие передавать голосовые или жестовые команды. В последнее время в ассистивных технологиях начали разрабатываться и применяться средства управления на базе ИМК. Обычные здоровые люди могут использовать ИМК для расширения канала управления электроникой «умного» дома, контроля состояния водителя или пилота, совершенствования когнитивных навыков, медитации, а также в сфере развлечений, например, для управления компьютерами или персонажами игр. Люди с ограниченной подвижностью по причине инсультов или травм могут управлять ассистивными роботизированными устройствами через ИМК, которые используют биоэлектрические сигналы мозга, возникающие, например, при появлении на экране монитора ожидаемых образов или в результате воображения желаемых движений. ИМК декодируют эти сигналы и формируют управляющие команды, позволяющие роботизированным устройствам выполнять определенные задачи по перемещению человека, манипулированию объектами или управлению протезами.

3. Интерфейсы «мозг-компьютер». Развитие нейрофизиологии, психологии и искусственного интеллекта, а также методов и устройств регистрации биоэлектрических сигналов привело к возможности создания ИМК как новых средств человеко-машинных коммуникаций на ос-

нове прямого восприятия сигналов нервной системы. Наиболее распространены ИМК, получающие сигналы биоэлектрической активности мозга через ЭЭГ.

ИМК на основе ЭЭГ включают в себя устройство регистрации и предварительной обработки сигналов ЭЭГ для нахождения ЭЭГ-паттернов, соответствующих воображаемым командам, извлечения признаков в спектральных или временных областях, классификации ЭЭГ-паттернов воображаемых команд и формирования решения по классу распознанной команды (рис. 1).



Рис. 1. Общая структура ИМК на основе ЭЭГ

Существуют два варианта ИМК на основе ЭЭГ: (1) инвазивные, которые для регистрации биоэлектрической активности различных зон мозга используют вживляемые в мозг электроды; и (2) неинвазивные, которые считывают сигналы ЭЭГ через мокрые или сухие электроды непосредственно со скальпа головы. Второй нетравматический вариант ИМК имеет широкое применение в системах управления внешними устройствами. В таких системах ИМК получают на входе сигналы ЭЭГ, соответствующие воображаемому моторным командам, которые человек генерирует, чтобы управлять движущимися частями тела, крупными (руки и ноги) и мелкими органами (кисти и пальцы рук), и выдает на выходе сигналы управления. Неинвазивные ИМК на основе ЭЭГ в основном реализуются для декодирования воображаемых и реальных движений крупных частей тела. Однако такие ИМК не эффективны для декодирования мелкой моторики, например движений пальцев одной руки. Эта проблема трудно решается из-за анатомической близости структур мозга, участвующих в реализации воображаемых движений, и незначительных различиях в сигналах ЭЭГ при воображении движений мелкими частями тела, и требует больших вычислительных ресурсов для анализа данных. Кроме того, ИМК должны работать в реальном времени, то есть формировать сигналы управления с минимальной задержкой, определяемой скоростью работы внешних устройств.

4. Методика применения ИМК в ассистивных технологиях.

При управлении ассистивными роботизированными устройствами, такими как инвалидная коляска, робот-манипулятор, протез, экзоскелет и прочее, парализованный человек должен иметь возможность отдавать

команды, позволяющие этим устройствам выполнять определенные задачи по перемещению человека, манипулированию объектами или управлению протезами. Неинвазивный ИМК, декодирующий сигналы ЭЭГ, позволяет формировать команды прямого управления элементами роботизированных устройств, а также супервизорные команды на выполнение заранее определенных сложных действий устройств в целом. Для практической реализации системы управления на основе ИМК необходимо использовать биологическую обратную связь (БОС), например через зрение, которая позволяет мозгу адаптироваться, чтобы усилить сигналы ЭЭГ, соответствующие воображаемым командам человека [9]. Задержки вычисления ответа при этом должны быть достаточно малы, чтобы в сознании пользователя воображаемая команда и реализуемое действие были однозначно связаны.

Можно сформировать следующие принципы построения систем, позволяющих человеку управлять роботизированными устройствами через ИМК: (1) достижение высокой точности и скорости классификации паттернов ЭЭГ до уровней, приемлемых для использования ИМК при управлении роботизированными устройствами (более 70% правильных распознаваний при задержках обратной связи не более 150 мс); (2) обеспечение достаточных степеней свободы ИМК, то есть количества распознанных воображаемых команд, 4 и более; (3) оптимизация вычислительных ресурсов для сокращения времени работы ИМК при сохранении точности распознавания, включая классификацию воображаемых команд по одной попытке воображения.

Для управления роботизированными устройствами в данной работе предложено использовать неинвазивный ИМК, декодирующий сигналы биоэлектрической активности мозга и формирующий на выходе команды прямого или супервизорного управления. Для практической реализации такой системы необходимо использовать БОС в визуальной или звуковой форме, которая позволяет пользователю научиться в процессе тренинга управлять роботизированным устройством путем генерации воображаемых моторных команд [8]. При этом для эффективного использования БОС требуется, чтобы задержки ответов системы были не более 150 мс, и мозг пользователя смог правильно ассоциировать ответы с событиями.

На рисунке 2 представлена структура предлагаемой системы с ИМК для управления универсальным ассистивным роботизированным устройством, имеющим движущуюся платформу и установленный на ней манипулятор со схватом. Ядром системы является неинвазивный ИМК, который регистрирует текущие сигналы ЭЭГ по выбранным ка-

налам, выполняет их предобработку для выделения ЭЭГ-паттернов воображаемых команд, вычисляет признаки этих паттернов в спектральной или временной областях и выполняет их классификацию, формируя на выходе класс воображаемой команды. В данном варианте предлагается реализовать отдельное управление движениями платформы и работой манипулятора со схватом с предметами, которые требуется взять, перенести и положить в определенное место. Сигналы ИМК, соответствующие распознанным командам, подаются на блок управления (БУ) роботизированной платформой, которая может перемещаться (Вперед, Назад, Влево, Вправо), и манипулятором, который может работать с предметами (Взять, Положить), используя схват (Заккрыть, Открыть).



Рис. 2. Структура системы управления перспективным роботом на основе ИМК

Далее в качестве примеров в разделе 6 рассматривается управление от ИМК реальной роботизированной мобильной платформой и отдельно схватом в виде пятипалой кисти руки. Стоит отметить, что таким же образом можно управлять роботизированным устройством не только в прямом, но и в супервизорном режиме, где воображаемые команды нажатия пальцев на кнопки соответствуют включению заранее подготовленных сценарных действий устройства в целом.

Для исследований возможности реализации такой системы управления роботизированными устройствами использован классификатор воображаемых движений пальцев одной руки, разработанный авторами ра-

нее [18-20]. Адаптация этого варианта ИМК к распознаванию команд, соответствующих воображаемым движениям, была выполнена путем разработки специальной программы и методики [21, 22].

При проведении экспериментов для сравнения с другими типами классификаторов пришлось модифицировать разработанную ранее методику: пользователям предлагалось последовательно представлять 2 типа воображаемых движений (сжатие кистей левой и правой рук) в соответствии с присвоенными им командами управления поведением роботизированного устройства. При тренировке пользователи сначала должны сжимать кисть руки, назначенную для управления необходимым поведением, в заданном звуками ритме и после выключения звука продолжать представлять себе то же движение. Тренировка была ориентирована на воображение движений по кинестетическим ощущениям пользователя. Тестовая серия реальных и мнимых движений повторялась несколько раз. В результате пользователь должен был выполнить не менее ста реальных и ста воображаемых движений в заданном ритме в одном блоке теста. Количество блоков теста должно соответствовать количеству типов выполняемых движений (реальные/воображаемые движения пальцами). Таким образом, имитировалось прямое управление элементами роботизированного устройства с помощью кнопочного переключателя команд.

Регистрация сигналов ЭЭГ выполнялась с помощью ЭЭГ-устройства «SmartBCI» компании «Мицар» (<http://www.mitsareeg.ru/page.php?id=smartbci>). Использовался 21 электрод, которые были расположены по системе 10-20. Сигналы ЭЭГ длительностью 1200 мс регистрировались в полосе частот 0,53 Гц – 30 Гц. Частота дискретизации составляла 250 Гц. При анализе записей ЭЭГ были исключены артефакты, такие как движения глаз, медленные и быстрые волны, фрагменты сигналов ЭЭГ с амплитудой более 100 мкВ. Для анализа и последующей классификации использовались безартефактные записи сигналов ЭЭГ, зарегистрированные с сенсомоторной области коры головного мозга: участки F3, Fz, F4, C3, Cz, C4, P3, Pz, P4.

Для классификации воображаемых команд были использованы два принципиально отличных подхода машинного обучения – во-первых, методы, которые основаны на предварительном вычислении характерных признаков ЭЭГ-паттернов, соответствующих командам (реализованы в комитете классификаторов); во-вторых, методы прямой классификации по сырым сигналам ЭЭГ (реализованы в классификаторах на сверточной сети и римановой геометрии).

В первом случае анализ сигналов ЭЭГ проводился во временной и частотной областях. Для обеспечения необходимой скорости

вычисления функции системы анализировалась и распознавалась каждая отдельная команда без накопления. Использовался алгоритм совместного учета двух пространств признаков, например во временной и частотной областях. Данные функции вычислялись в скользящем окне, что позволило выбрать наиболее информативные окна. Важным для повышения точности классификации является выбор размера окна анализа. Ранее было показано, что подбор оптимальных значений ширины окна анализа может существенно повысить точность классификации воображаемых движений. На базе проведенных ранее исследований [18] была выбрана ширина окна анализа 100 мс со сдвигом в 50%.

Во втором случае сигналы ЭЭГ предварительно очищались от помех путем фильтрации и от артефактов путем удаления проб при превышении сигналом установленного порога.

5. Сравнение различных машинных классификаторов воображаемых движений. Классификация воображаемых команд по предварительно найденным наборам признаков ЭЭГ-паттернов выполняется комитетом классификаторов. Классификация непосредственно по сырым сигналам ЭЭГ выполнялась с использованием нейронных сетей с глубоким обучением и римановой геометрии. В данной работе был проведен сравнительный анализ разных методов классификации с целью выбора наиболее подходящих классификаторов для использования в системах управления роботизированными устройствами.

Первым вариантом был комитет классификаторов, основанный на искусственных нейронных сетях (ANN) и методе опорных векторов (SVM) [19, 20]. Исследования показали, что они являются эффективными средствами классификации, в том числе и ЭЭГ-паттернов воображаемых движений. В этом классификаторе реализованы нейронные сети типа многослойного персептрона с тремя слоями: двумя скрытыми и выходным. В качестве функций активации в скрытых слоях использовалась сигмоидальная функция, а в выходном слое – линейная функция.

Метод опорных векторов основан на линейной классификации. Суть метода заключается в разделении выборки на классы при помощи оптимальной разделяющей плоскости. Преобразование данных определяется функцией ядра преобразования. На основании результатов исследований по выбору наиболее подходящих типов SVM в данной работе для классификации ЭЭГ сигналов был выбран SVM с ядром в виде радиально-базисной функции.

Для исследований использовался двухуровневый комитет классификаторов. Первый уровень состоит из двух искусственных нейронных сетей (ANN (C) и ANN (L)) и двух классификаторов на

основе метода опорных векторов (SVM (C) и SVM (L)), а второй уровень – искусственная нейронная сеть (ANN (T)) для объединения результатов классификаторов первого уровня. Классификаторы первого уровня анализируют отдельные векторы признаков (длина L кривой и кепстральные коэффициенты C), полученные для 20 сегментов сигнала ЭЭГ (20 признаков на L и 20 признаков на C) и выдают ответы принадлежности сигнала пробы тому или иному классу (2 ответа). На основе этих сигналов формируется вектор признаков (8 компонентов) для ANN (T) второго уровня (Total), который принимает окончательное решение о принадлежности данного сигнала ЭЭГ к определенному классу воображаемых команд управления (рис. 3).



Рис. 3. Структура двухуровневого комитета классификаторов

При работе ИМК в режиме реального времени предполагается непрерывное чтение данных ЭЭГ. Для обеспечения непрерывности приема входных данных и их параллельной обработки использовался метод многопоточного программирования [21, 22]. Схема обработки следующая: как только заканчивается проба N и начинается проба N+1, поток данных 2 считывает данные, относящиеся к пробе N, делает предварительную обработку, извлекает признаки и классифицирует их, а затем выводит результат классификации (рис. 4).

Проведенные исследования прототипа ИМК показали, что его характеристики соответствуют требованиям реального времени. Временные задержки, необходимые для получения ответа от классификатора, находятся в пределах 150 мс, что является приемлемым для использования ИМК с биологически обратной связью. Согласно субъективному самоотчету испытуемого, он однозначно связывает воображаемый акт с полученным ответом системы.

Второй вариант классификатора был построен на базе специализированной сверточной нейронной сети (CNN) с глубоким обучением. Наиболее известным вариантом сверточной нейронной сети для класси-

фикации сигналов ЭЭГ является EEGNet [23]. В нашем случае для исследований была выбрана архитектура нейронной сети типа *Shallow ConvNet*, способная классифицировать сырые сигналы ЭЭГ [24]. Исследования показали, что такая сеть достаточно эффективно классифицирует ЭЭГ-паттерны, соответствующие воображаемым движениям. Сеть имела 4 слоя: два сверточных слоя (по времени и пространству), один слой с оконным усреднением (*mean pooling*) и выходной решающий слой (*softmax*). В качестве функции активации в скрытых и выходном слоях использована экспоненциальная линейная функция (*ELU*).

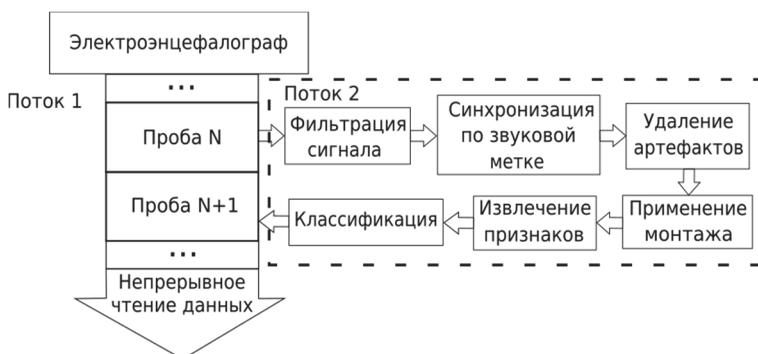


Рис. 4. Схема системы классификации, работающей в реальном времени

На вход сверточной сети подавались очищенные от артефактов сырые сигналы ЭЭГ от выбранных каналов. Используя эти сигналы, сеть настраивалась на классификацию воображаемых команд, которые соответствовали движениям 4 пальцев одной руки или сжатую и разжатую кисти левой и правой рук (рис. 5). Слои описываются следующим образом.

1. Слой свертки во времени (*Temporal Convolution Layer*): форма входного сигнала 21×300 . Размер ядра – 1×25 , используется 40 фильтров. Окно в 25 отсчетов выбрано исходя из формы сигнала ЭЭГ.

2. Слой свертки в пространстве (*Spatial Convolution Layer*): размер входного тензора – 40 (фильтров) \times 21 (канал) \times 276 (отсчетов после свертки по времени), размер ядра – 40×21 , используется 40 фильтров.

3. Усреднение в окне (*Mean Pooling*): размер входной матрицы – 40×276 , размера ядра – 1×75 .

4. Классификация: размер входной матрицы после *Mean Pooling* 40×14 .

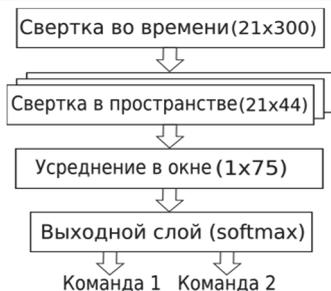


Рис. 5. Схема классификатора на основе сверточной нейронной сети

Представленная нейронная сеть выполняет последовательно два вида свертки: по времени (300 отсчетов) и пространству (21 канал). После свертки применяется процедура Square: все значения матрицы поэлементно возводятся в квадрат. Далее производится усреднение во всех окнах входной матрицы и выполняется операция Log: от каждого элемента берется его натуральный логарифм. Задачу классификации решает комбинация из полносвязного и softmax слоев. На выходе сети формируется команда, соответствующая распознанному воображаемому движению.

В качестве альтернативы метода на сверточной нейронной сети был разработан классификатор на основе римановой геометрии, который, как и классификатор на сверточных сетях, не требует предварительного вычисления признаков, так как они вычисляются автоматически внутри классификаторов как составной элемент процесса анализа и классификации [25-27].

Классификатор на римановой геометрии использует специфичное определение расстояния для сравнения ковариационных матриц, благодаря которой матрицы проб, относящихся к одному классу, оказываются ближе друг к другу, нежели матрицы проб из разных классов. Подобные классификаторы неоднократно показывали высокие значения точности классификации на публично доступных наборах данных. Помимо этого, классификатор способен адаптироваться к и изменениям ЭЭГ, возникающих в разных сессиях или для различных пользователей.

Этот метод классификации основан на использовании симметричных положительно-определенных матриц, являющихся обобщением квадратов целых чисел для случая нескольких измерений. Так, дисперсия одномерной случайной величины задается положительным числом – суммой квадратов отклонений от среднего значения, в то время как дисперсия многомерной величины, коей является проба

$X_i \in \mathfrak{R}^{E \times T}$, представляет собой положительно-определенную ковариационную матрицу C_i , определяемую согласно выражению:

$$C = \frac{1}{T-1} \times (X_i - M[X_i]) \cdot (X_i - M[X_i])^T,$$

где $M[X_i]$ – вектор длины E , состоящий из средних по всем пробам значений сигнала для каждого канала.

Диагональные элементы ковариационной матрицы при условии равенства средних значений нулю соответствуют дисперсии сигнала для каждого канала в отдельности. При этом уменьшение дисперсии может свидетельствовать об уменьшении амплитуды сигнала, то есть являться признаком десинхронизации. Аналогично значения элементов, не находящихся на главной диагонали – ковариации показаний двух каналов, – тоже будут уменьшаться при десинхронизации в соответствующих областях коры головного мозга. Таким образом, использование ковариационных матриц в качестве признаков позволяет определять класс, к которому относится проба, основываясь на явлении десинхронизации.

Одним из наиболее простых и интуитивно понятных методов классификации является *метод ближайших соседей* (k-nearest neighbors, kNN), в котором класс для элемента определяется на основе того, к какому классу относятся его k -ближайших соседей. При рассмотрении множества объектов X ключевым понятием является метрика – числовая функция d , определенная на декартовом произведении $X \times X$ и удовлетворяющая следующим свойствам:

1. $d(x, y) = 0 \Leftrightarrow x = y$ (аксиома тождества);
2. $d(x, y) = d(y, x)$ (аксиома симметрии);
3. $d(x, y) + d(y, z) > d(x, z)$ (неравенство треугольника).

Пара (X, d) называется метрическим пространством. Примером такого пространства может служить евклидово пространство \mathfrak{R} с метрикой, задаваемой выражением:

$$d(x, y) = |x - y|.$$

Концепция римановой геометрии предполагает введение другой метрики, которая позволит лучше различать ковариационные матрицы:

матрицы одного класса должны оказаться ближе друг к другу, чем матрицы, принадлежащие к разным классам. При этом класс задается некой средней ковариационной матрицей, определяемой по принципам, идентичным для одномерного случая. Для определения средней матрицы используется вариационный принцип Фреше: для заданного метрического пространства (X, d) и множества $\{C_1, \dots, C_k\}$ точек в нем средним является точка x , минимизирующая дисперсию $\frac{1}{k} \sum_k d^2(x, C_k)$.

В рассматриваемом метрическом пространстве ковариационных матриц между двумя точками может быть больше одного пути, поэтому среди всех возможных путей рассматривается тот, чья длина минимальна. Такой путь называется геодезическим, а его длина, или риманово расстояние, выражается как:

$$\delta(C_1, C_2) = \left\| \text{Log} \left(C_1^{-\frac{1}{2}} C_2 C_1^{-\frac{1}{2}} \right) \right\|_F = \sqrt{\sum_{i=1}^n \log \lambda_i}.$$

При этом геометрическое среднее набора ковариационных матриц может быть подсчитано в соответствии с подходом Фреше с помощью итерационного алгоритма [27].

Алгоритм Minimum Distance to Mean (MDM) является обобщением метода ближайших соседей для случая ковариационных матриц, он приведен в [25]. На первом шаге производится подсчет средних ковариационных матриц для каждого класса на основе данных из обучающей выборки, далее каждой новой пробе присваивается класс, средняя ковариационная матрица которого оказалась ближе всего. На рисунке 6 показаны пробы, соответствующие воображаемым сжатиям кисти левой и правой рук. Можно заметить, что введенная метрика действительно удовлетворяет требуемым свойствам: пробы, соответствующие сжатию правой руки, оказываются ближе к средней ковариационной матрице класса «Правая рука», нежели класса «Левая рука».

Однако многие популярные и эффективные методы машинного обучения (LDA, SVM, нейронные сети) рассчитаны на применение в пространстве \mathfrak{R}^n , но не во введенном метрическом пространстве. Тем не менее, поскольку ковариационные матрицы являются симметричными и положительно определенными, введенное пространство локально похоже, то есть может быть отображено на касательное евклидово пространство, как показано на рисунке 7.

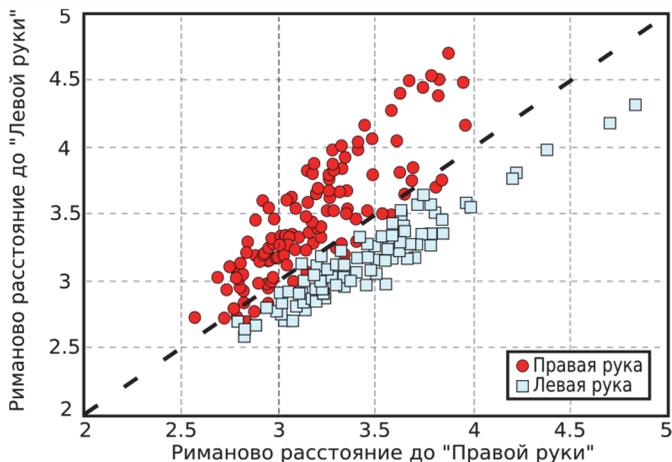


Рис. 6. Риманово расстояние между пробами

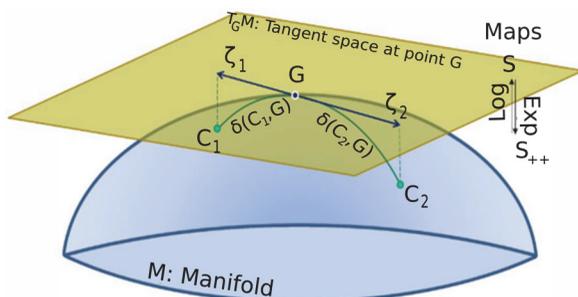


Рис. 7. Построение касательного пространства

Касательное пространство может быть построено в любой точке риманова многообразия, при этом векторы на гиперплоскости, соответствующие ковариационным матрицам, будут определяться выражением [26]:

$$S_i = \text{Log}_c(C_i) = C^{-\frac{1}{2}} \log m(C^{-\frac{1}{2}} C_i C^{-\frac{1}{2}}) C^{\frac{1}{2}},$$

где C – точка (ковариационная матрица), в которой строится касательное пространство; $\log m$ – матричный логарифм.

В построенном касательном пространстве для классификации паттернов ЭЭГ можно использовать типичные классификаторы, например, метод опорных векторов (Support Vector Machine – SVM). Чтобы

сохранить структуру риманова многообразия, необходимо в SVM использовать ядро, задаваемое выражением:

$$k(\text{vecm}(C_i), \text{vecm}(C_j)) = \text{tr}(\log m(C_i) \log m(C_j)).$$

Для реализации классификатора на основе римановой геометрии в данной работе использован подход MDM, в котором подсчитывается средняя точка в пространстве признаков для каждого из классов. Данный подход интересен тем, что он работает одинаково для любого количества классов.

6. Результаты экспериментальных исследований. В тестировании ИМК принимали участие 10 пациентов (в среднем по 10 сессий на пациента), перенесших инсульт, и проходящих курс реабилитации. Из результатов видно, что некоторые пациенты не смогли обучиться работе с ИМК, в то время как у других пациентов виден ярко выраженный прогресс (рис. 8). На графике приведено изменение точности классификации у пациентов с течением времени. Отображен пример положительной динамики (пациент MAX) и пример отсутствия динамики (пациент SON). Показательно, что пациенты, у которых наблюдалось улучшение точности классификации, также показывали прогресс в восстановлении, в то время как у пациентов, имеющих уровень классификации на уровне случайного порога, прогресс восстановления не наблюдался. Однако, чтобы сделать однозначные выводы, нужно провести дополнительные исследования. Важно отметить, что пациенты, имеющие уровень классификации на уровне случайного порога, могли не понять задание и выполнять его неправильно либо не выполнять его совсем.

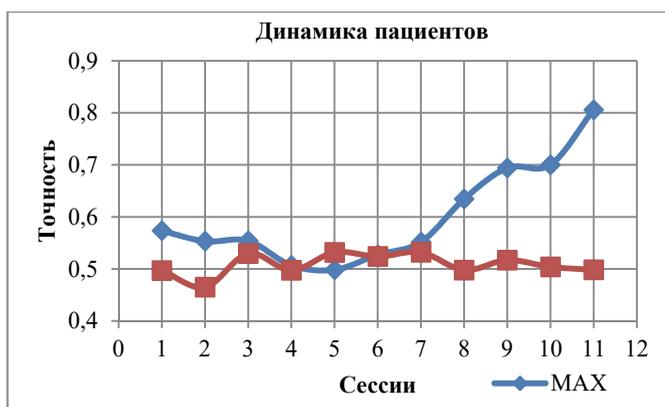


Рис. 8. Изменение точности классификации со временем

В каждом случае обучение классификатора производилось на данных за последние три сессии, поэтому улучшения точности в последних сессиях не связаны с большим количеством данных.

При тестировании ИМК на описанном комитете классификаторов были получены следующие результаты. В автономных сеансах при классификации паттернов ЭЭГ воображаемых команд без накопления проб вероятность успешной классификации 2 типов воображаемых команд для испытуемых, обучившимся использованию ИМК превышала случайный порог в 50% и в среднем составляла $63 \pm 9\%$. Если считать только сессии, выполненные после овладения испытуемым навыком обращения с ИМК, то средняя точность составляла $70 \pm 10\%$. В процессе тестирования системы максимальная точность классификации составила 93%. В то же время исследования показали, что небольшая часть испытуемых (около 30%) не способна научиться эффективно работать с ИМК на основе сигналов ЭЭГ.

Тестирование классификаторов на основе римановой геометрии показало результаты несколько ниже, чем у комитета классификаторов. В автономных сессиях, когда классификация ЭЭГ-паттернов воображаемых команд проводилась по одной попытке, вероятность успешной классификации 2 типов команд при случайном пороге 50% в среднем составила $60 \pm 8\%$. После овладения испытуемым навыком обращения с ИМК средняя точность составляла $64 \pm 8\%$, тогда как максимальная точность классификации составила 83%.

Тестирование классификаторов на основе сверточной сети показало самую низкую точность классификации. В автономных сессиях, когда классификация ЭЭГ-паттернов воображаемых команд проводилась по одной попытке, вероятность успешной классификации 2 типов команд при случайном пороге 50% в среднем составила $54 \pm 10\%$. После овладения испытуемым навыком обращения с ИМК средняя точность составляла $63 \pm 6\%$, а максимальная 72% (табл. 1).

Таблица 1. Результаты тестирования ИМК с разными классификаторами

Классификатор	Комитет классификаторов	Сверточные нейросети	Риманова геометрия (MDM)
Средняя Точность	$70 \pm 10\%$	$63 \pm 6\%$	$64 \pm 8\%$
Максимальная точность	93%	72%	83%

Полученные данные по точности классификации свидетельствуют о том, что, если пациент освоил навык работы с ИМК, он сможет управлять ассистивными устройствами. Можно утверждать, что с накоплением опыта точность классификации будет расти, и управление станет более эффективным. Стоит отметить, что при накоплении проб для классификации можно получить более высокую точность, чем при работе с одной пробой, однако тогда может утратиться восприятие обратной связи в реальном времени.

7. Примеры применения системы управления на основе ИМК. В рамках проведенного исследования показано, что ИМК на комитете классификаторов позволяют распознавать 2 типа воображаемых команд с точностью до 80%, что в принципе дает возможность удаленно управлять ассистивными роботизированными устройствами. Чтобы управлять устройствами с помощью такого ИМК формируя, например, воображаемые команды для перемещения и поворотов, требуется 4 класса команд. Поэтому был использован каскадный метод классификации, при котором сначала выбирался тип движения (перемещение или повороты), а затем конкретное действие этого типа движения (вперед-стоп или направо-налево).

С использованием такого подхода были проведены эксперименты по управлению роботизированной рукой с пятипалой кистью, мобильной сенсорной платформой и антропоморфным роботом с помощью описанного неинвазивного ИМК с системой классификации ЭЭГ-паттернов воображаемых движений.

Роботизированная рука с пятипалой кистью имеет 4 приводов для обеспечения движения пальцев и кисти в целом. Макет такой руки был выполнен на 3D принтере по открытому проекту InMoov, представленному в Интернете [28].

Мобильная сенсорная платформа имеет 4 управляемых привода: 2 для перемещения платформы и 2 для ориентации сенсорного блока для направленного стереонаблюдения (рис. 9). Эта платформа была специально разработана и реализована для проведения экспериментов по обслуживанию обездвиженных пациентов в медицинских учреждениях или в домашних условиях [21]. На платформе может устанавливаться манипулятор, имеющий 2 привода для переноса предмета (подъем-опускание и поворот вправо-влево) и 1 привод для его захвата (взятия и отпускания). В целом такое роботизированное устройство может использоваться для выполнения простых действий по обслуживанию обездвиженных пациентов. Аналогичные функции перемещения и манипуляции имеет антропоморфный робот типа NAO, имеющий 23 привода на ногах, руках, корпусе и голове [29].



Рис. 9. Мобильная сенсорная платформа

Эти мобильные роботизированные устройства управлялись путем формирования с помощью ИМК подачи команд непосредственно на приводы его элементов (прямое управление) или командных сигналов высокого уровня (супервизорное управление). При прямом управлении путем имитации нажатия разными пальцами управляющих клавиш, формировались команды четырех классов: «Вперед», «Стоп», «Направо», «Налево». Эксперимент показал возможность обучения классификатора ИМК этим командам и управления по ним мобильной платформой или манипулятором с пятипалой кистью. Поскольку и на платформе имелась система технического зрения и собственная система узнавания и обхода препятствий, такого управления оказалось достаточно для практического применения этих роботизированных устройств. Таким образом, роботизированная платформа может использоваться для подвоза по командам лежачего человека лекарства и воды и отвоза использованных приборов. Оснащение платформы искусственной рукой позволило реализовать погрузку и разгрузку требуемых предметов. Однако, поскольку роботизированное устройство имеет интеллектуальную систему управления, его можно использовать для обслуживания лежачих пациентов, выдающих через ИМК запросы типа «Хочу пить» или «Включите свет» и прочее, которые формируются как супервизорные команды.

8. Заключение. Для построения эффективных неинвазивных ИМК проведено сравнительное исследование различных типов классификации ЭЭГ-паттернов, соответствующих воображаемым командам

человека. Все исследованные классификаторы (на основе сверточной нейросети, римановой геометрии и комитета классификаторов) способны обучаться восприятию воображаемых моторных команд.

Показано, что классификатор ЭЭГ-паттернов 2 классов воображаемых движений, выполненный на комитете классификаторов, может обеспечить в ИМК точность классификации до 80% без накопления попыток. Это позволяет использовать его в системах управления различными робототехническими устройствами, такими как, например, роботизированная платформа с техническим зрением, в том числе и манипулятором типа искусственной руки с пятипалой кистью.

Экспериментальные исследования разработанного ИМК показали, что он соответствует требованиям практического применения в системах реального времени. Так, максимальный период задержки при формировании сигналов управления не превышает 150 мс, что позволяет использовать биологическую обратную связь. Реализованная в системе многопоточность дает возможность записывать и обрабатывать одновременно сигнал ЭЭГ без потери данных и выполнять онлайн классификацию.

Средства управления, построенные на базе неинвазивных ИМК, могут помочь обездвиженным людям выполнять некоторые утраченные жизненно важные функции, требующие помощи со стороны других людей. Проведены эксперименты по управлению роботизированной рукой с пятипалой кистью, мобильной сенсорной платформой и антропоморфным роботом с помощью описанного неинвазивного ИМК с системой классификации ЭЭГ-паттернов воображаемых движений. Внедрение таких средств управления позволит создать более эффективные ассистивные устройства, которые обеспечат людям с ограниченными двигательными функциями возможность управления роботизированными устройствами, используя сигналы мозга, что может значительно улучшить качество их жизни в мире здоровых людей.

В рамках развития исследований по тематике статьи предполагается применить метод символического кодирования ЭЭГ, предложенный Р.И. Полонниковым [30], что может позволить распознавать ЭЭГ-паттерны воображаемых команд на непрерывно читаемой энцефалограмме в реальном времени.

Литература

1. *Карнов А.А.* Ассистивные информационные технологии на основе аудиовизуальных речевых интерфейсов // Труды СПИИРАН. 2013. Вып. 4(27). С. 114–128.
2. *Карпов А., Ronzhin A.* A Universal Assistive Technology with Multimodal Input and Multimedia Output Interfaces // International Conference on Universal Access in Human-Computer Interaction. 2014. pp. 369–378.
3. *Карнов А.А., Юсупов Р.М.* Многомодальные интерфейсы человеко-машинного взаимодействия // Вестник Российской академии наук. 2018. Т. 88. № 2. С. 146–155.

4. Аналитический обзор мирового рынка робототехники. URL: <https://www.sberbank.ru/common/img/uploaded/analytics/2018/analiticeskij-obzor-mirovogo-rynka-robototehniki.pdf> (дата обращения: 03.01.2020).
5. *Казуров И.А. и др.* Интеллектуальный интерфейс для управления роботизированным медицинским экзоскелетом нижних конечностей Remotion // *Авиакосмическая и экологическая медицина*. 2019. Т. 53. № 5. С. 92–98.
6. *Diez P.* Smart Wheelchairs and Brain-computer Interfaces: Mobile Assistive Technologies // *Academic Press*. 2018. 492 p.
7. *Wolpaw J., Wolpaw E.W.* Brain-computer interfaces: principles and practice // *Oxford University Press*. 2012. 400 p.
8. *Daly I. et al.* On the control of brain-computer interfaces by users with cerebral palsy // *Clinical Neurophysiology*. 2013. vol. 124. no. 9. pp. 1787–1797.
9. *Banville H., Falk T.H.* Recent advances and open challenges in hybrid brain-computer interfacing: a technological review of non-invasive human research // *Brain-Computer Interfaces*. 2016. vol. 3(1). pp. 9–46.
10. *Choi I. et al.* A systematic review of hybrid brain-computer interfaces: taxonomy and usability perspectives // *PLoS One*. 2017. vol. 12(4). pp. e0176674.
11. *Yin E. et al.* A hybrid BCI based on EEG and fNIRS signals improves the performance of decoding motor imagery of both force and speed of hand clenching // *Journal of Neural Engineering*. 2015. vol. 12(3). pp. 036004.
12. *Yin E. et al.* A hybrid BCI based on fusion of P300 and SSVEP scores // *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*. 2015. vol. 23(4). pp. 693–701.
13. *Chang M.H. et al.* Eliciting dual-frequency SSVEP using a hybrid SSVEP-P300 BCI // *Journal of Neuroscience Methods*. 2016. vol. 258. pp. 104–113.
14. *Obeidat Q.T., Campbell T.A., Kong J.* Spelling with small mobile brain-computer interface in a moving wheelchair // *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*. 2017. vol. 25(11). pp. 2169–2179.
15. *Mishra S. et al.* Soft, conformal bioelectronics for a wireless human-wheelchair interface // *Biosensors and Bioelectronics*. 2017. vol. 91 pp. 796–803.
16. *Фролов А.А., Роцин В.Ю.* Интерфейс «мозг-компьютер». Реальность и перспективы // *Научная конференция по нейроинформатике МИФИ*. 2008. р. 2008.
17. *Каплан А.Я. и др.* Экспериментально-теоретические основы и практические реализации технологии «Интерфейсы мозг-компьютер» // *Бюллетень сибирской медицины*. 2013. Т. 12. № 2. С. 21.
18. *Sonkin K.M. et al.* Development of electroencephalographic pattern classifiers for real and imaginary thumb and index finger movements of one hand // *Artificial Intelligence in Medicine*. 2015. vol. 63(2). pp. 107–117.
19. *Станкевич Л.А. и др.* Классификация электроэнцефалографических паттернов вообразаемых движений пальцами руки для разработки интерфейса мозг-компьютер // *Труды СПИИРАН*. 2015. Вып. 3(40). С. 163–182.
20. *Stankevich L.A. et al.* EEG Pattern Decoding of Rhythmic Individual Finger Imaginary Movements of one Hand // *Human Physiology*. 2016. vol. 42(1). pp. 32–42.
21. *Stankevich L., Sonkin K.* Human-Robot Interaction Using Brain-Computer Interface Based on EEG Signal Decoding // *International Conference on Interactive Collaborative Robotics*. 2016. pp. 99–106.
22. *Станкевич Л.А., Гунделак Ф.В.* Управление роботом с использованием интерфейса «мозг-компьютер» // *Робототехника и техническая кибернетика*. 2017. № 2. С. 52–56.
23. *Lawhern V.J. et al.* EEGNet: a compact convolutional network for EEG-based brain-computer interfaces // *Journal of neural engineering*. 2018. vol. 15. no. 5. pp. 056013.
24. *Schirrmeyer R.T. et al.* Deep learning with convolutional neural networks for brain mapping and decoding of movement-related information from the human EEG // *arXiv preprint arXiv:1703.05051*.

25. *Lotte F. et al.* A Review of classification algorithms for EEG-based brain-computer interfaces: a 10-year Update // Journal of Neural Engineering. 2018. vol. 15. no. 3. pp. 55.
26. *Li Y., Wong K.M., de Bruin H.* EEG Signal Classification Based on a Riemannian Distance Measure // IEEE Toronto International Conference Science and Technology for Humanity (TIC-STH). 2009. pp. 268–273.
27. *Congedo M., Barachant A., Bhatia R.* Riemannian geometry for EEG-based brain-computer interfaces; a primer and review // Brain-Computer Interfaces. 2017. vol. 4(3). pp. 155–174.
28. Рука-робот InMoov. Проекты с Aurdino. 2012. URL: <http://arduino-projects.ru/projects/ruka-robot-inmoov/> (дата обращения: 05.01.2020).
29. Антропоморфный робот NAO. URL: <http://aldebaran-robotics.com/en> (дата обращения: 05.01.2020).
30. *Полонников Р.И.* Основные концепции общей теории информации // СПб.: Наука. 2006. 204 с.

Гунделах Филипп Викторович — аспирант, кафедра мехатроники и роботостроения, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ). Область научных интересов: робототехника, интеллектуальные системы управления, обработка данных, интерфейсы «мозг-компьютер». Число научных публикаций — 20. f.gundelakh@yandex.ru; ул. Политехническая, 21, 195251, Санкт-Петербург, Россия; р.т.: +79110281220; факс: +7(812)297-6780.

Станкевич Лев Александрович — канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник, лаборатория речевых и многомодальных интерфейсов, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук (СПИИРАН). Область научных интересов: искусственный интеллект, когнитивные системы, антропоморфная робототехника, интерфейсы «мозг-компьютер». Число научных публикаций — 263. Stankevich_lev@inbox.ru; 14-я линия В.О., 39, 199178, Санкт-Петербург, Россия; р.т.: +7(812)328-3337; факс: +7(812)328-4450.

Сонькин Константин Михайлович — канд. техн. наук, постдок, школа нейронаук, Тель-Авивский университет. Область научных интересов: искусственный интеллект, интерфейсы «мозг-компьютер», обработка биоэлектрических сигналов, нейронные сети, методы классификации. Число научных публикаций — 15. sonkink@gmail.com; Тель-Авивский университет, Health Professions Building, 6997801, Тель-Авив, Израиль; р.т.: +972546727555.

Нагорнова Жанна Владимировна — канд. биол. наук, научный сотрудник, лаборатория сравнительных эколого-физиологических исследований, Институт эволюционной физиологии и биохимии им. И.М. Сеченова Российской академии наук (ИЭФБ РАН). Область научных интересов: воображение, возрастная физиология, анализ сигналов ЭЭГ, интерфейсы «мозг-компьютер». Число научных публикаций — 19. nagornova_n@mail.ru; пр. Тореза, 44, 194233, Санкт-Петербург, Россия; р.т.: +79819449113; факс: +7(812)552-3012.

Шемякина Наталья Вячеславовна — канд. биол. наук, старший научный сотрудник, лаборатория сравнительных эколого-физиологических исследований, Институт эволюционной физиологии и биохимии им. И.М. Сеченова Российской академии наук (ИЭФБ РАН). Область научных интересов: методы анализа биоэлектрических сигналов, возрастная физиология, творческая деятельность и ассоциативное мышление, воображаемые движения, интерфейсы «мозг-компьютер». Число научных публикаций — 24. shemyakina_n@mail.ru; пр. Тореза, 44, 194233, Санкт-Петербург, Россия; р.т.: +7(911)224-8293; факс: +7(812)552-3012.

Поддержка исследований. Данное исследование выполнено в рамках гранта РФФИ официальной № 16-29-08296 и частично – в рамках бюджетной темы № 0073-2019-0005.

F. GUNDELAKH, L. STANKEVICH, K. SONKIN, G. NAGORNOVA,
N. SHEMYAKINA
**APPLICATION OF BRAIN-COMPUTER INTERFACES IN
ASSISTIVE TECHNOLOGIES**

Gundelakh F., Stankevich L., Sonkin K., Nagornova G., Shemyakina N. **Application of Brain-Computer Interfaces in Assistive Technologies.**

Abstract. In the paper issues of brain-computer interface applications in assistive technologies are considered in particular for robotic devices control. Noninvasive brain-computer interfaces are built based on the classification of electroencephalographic signals, which show bioelectrical activity in different zones of the brain. Such brain-computer interfaces after training are able to decode electroencephalographic patterns corresponding to different imaginary movements and patterns corresponding to different audio-visual stimulus. The requirements which must be met by brain-computer interfaces operating in real time, so that biological feedback is effective and the user's brain can correctly associate responses with events are formulated. The process of electroencephalographic signal processing in noninvasive brain-computer interface is examined including spatial and temporal filtering, artifact removal, feature selection, and classification. Descriptions and comparison of classifiers based on support vector machines, artificial neural networks, and Riemann geometry are presented. It was shown that such classifiers can provide accuracy at the level of 60-80% for recognition of imaginary movements from two to four classes. Examples of application of the classifiers to control robotic devices were presented. The approach is intended both to help healthy users to perform daily functions better and to increase the quality of life of people with movement disabilities. Tasks to increase the efficiency of technology application are formulated.

Keywords: Assistive Technologies, Robotic Devices, Brain-computer Interfaces, Electroencephalography, Imaginary Movements, Classification Methods, Artificial Neural Networks, Support Vector Machine, Riemann Geometry.

Gundelakh Filipp — Ph.D. student, Department of Mechatronics and Robotics, Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University (SPbPU). Research interests: robotics, intellectual control systems, data processing, brain-computer interfaces. The number of publications — 20. f.gundelakh@yandex.ru; 21, Politehnicheskaja str., 195251, St. Petersburg, Russia; office phone: +79110281220; fax: +7(812)297-6780.

Stankevich Lev — Ph.D., Leading Researcher, Laboratory of Speech and Multimodal Interfaces, St. Petersburg Institute for informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences (SPIIRAS). Research interests: artificial intelligence, cognitive systems, anthropomorphic robotics, brain-computer interfaces. The number of publications — 263. Stankevich_lev@inbox.ru; 39, 14-th Line V.O., 199178, St.Petersburg, Russia; office phone: +7(812)328-3337; fax: +7(812)328-4450.

Sonkin Konstantin — Ph.D., Postdoc, Sagol School of Neuroscience, Tel Aviv University. Research interests: artificial intelligence, brain-computer interfaces, bio-electrical signal processing, artificial neural networks, classification methods. The number of publications — 15. sonkink@gmail.com; Health Professions Building, Tel Aviv University, 6997801, Tel Aviv, Israel; office phone: +972546727555.

Nagornova Ganna — Ph.D., Researcher, Laboratory of Comparative Ecologo-Physiological Research, Sechenov Institute of Evolutionary Physiology and Biochemistry of the Russian Academy of Science (IEPhB RAS). Research interests: imagination, age physiology, the analysis of EEG signals, brain-computer interfaces. The number of publications — 19. nagornova_n@mail.ru; 44, pr. Thoreza, 194233, St. Petersburg, Russia; office phone: +79819449113; fax: +7(812)552-3012.

Shemyakina Natalia — Ph.D., Senior Researcher, Laboratory of Comparative Ecologo-Physiological Research, Sechenov Institute of Evolutionary Physiology and Biochemistry of the Russian Academy of Science (IEPhB RAS). Research interests: imagination, age physiology, the analysis of EEG signals, brain-computer interfaces. The number of publications — 24. shemyakina_n@mail.ru; 44, pr. Thoreza, 194233, St. Petersburg, Russia; office phone: +7(911)224-8293; fax: +7(812)552-3012.

Acknowledgements. This research is supported by grant of RFBR ofи-м # 16-29-08296 and partially by budget theme # 0073-2019-0005.

References

1. Karpov A.A. [Assistive information technologies based on audio-visual speech interfaces]. *Trudy SPIIRAN – SPIIRAS Proceedings*. 2013. vol. 4(27). pp. 114–128. (In Russ.).
2. Karpov A., Ronzhin A. A Universal Assistive Technology with Multimodal Input and Multimedia Output Interfaces. International Conference on Universal Access in Human-Computer Interaction. 2014. pp. 369–378.
3. Karpov A.A., Yusupov R.M. [Multimodal Interfaces of Human-Computer Interaction]. *Vestnik Rossijskoj akademii nauk – Herald of the Russian Academy of Sciences*. 2018. Issue 88. vol. 2. pp. 146–155. (In Russ.).
4. Analiticheskij obzor mirovogo rynka robototekhniki [Analytical review of the global robotics market]. Available at: <https://www.sberbank.ru/common/img/uploaded/analitics/2018/analiticheskij-obzor-mirovogo-rynka-robototekhniki.pdf> (accessed: 03.01.2020). (In Russ.).
5. Kagirow I.A. et al. [Intellectual interface for control of robotic medicine exoskeleton of low limbs Remotion]. *Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya medicina – Aerospace and Environmental Medicine*. 2019. Issue 53. vol. 5. pp. 92–98. (In Russ.).
6. Diez P. Smart Wheelchairs and Brain-computer Interfaces: Mobile Assistive Technologies. Academic Press. 2018. 492 p.
7. Wolpaw J., Wolpaw E.W. Brain-computer interfaces: principles and practice. Oxford University Press. 2012. 400 p.
8. Daly I. et al. On the control of brain-computer interfaces by users with cerebral palsy. *Clinical Neurophysiology*. 2013. vol. 124. no. 9. pp. 1787–1797.
9. Banville H., Falk T.H. Recent advances and open challenges in hybrid brain-computer interfacing: a technological review of non-invasive human research. *Brain-Computer Interfaces*. 2016. vol. 3(1). pp. 9–46.
10. Choi I. et al. A systematic review of hybrid brain-computer interfaces: taxonomy and usability perspectives. *PLoS One*. 2017. vol. 12(4). pp. e0176674.
11. Yin E. et al. A hybrid BCI based on EEG and fNIRS signals improves the performance of decoding motor imagery of both force and speed of hand clenching. *Journal of Neural Engineering*. 2015. vol. 12(3). pp. 036004.
12. Yin E. et al. A hybrid BCI based on fusion of P300 and SSVEP scores. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*. 2015. vol. 23(4). pp. 693–701.
13. Chang M.H. et al. Eliciting dual-frequency SSVEP using a hybrid SSVEP-P300 BCI. *Journal of Neuroscience Methods*. 2016. vol. 258. pp. 104–113.

14. Obeidat Q.T., Campbell T.A., Kong J. Spelling with small mobile brain-computer interface in a moving wheelchair. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation*. 2017. vol. 25(11). pp. 2169–2179.
15. Mishra S. et al. Soft, conformal bioelectronics for a wireless human-wheelchair interface. *Biosensors and Bioelectronics*. 2017. vol. 91 pp. 796–803.
16. Frolov A.A., Roshin V.U. [Brain computer interface. Reality and perspectives]. *Nauchnaya konferenciya po neiroinformatike MIFI* [Scientific conference on neuroinformatic MIFI]. 2008. pp. 2008. (In Russ.).
17. Kaplan A.Ya. et al. [Experimental-theoretic bases and practical realizations of technology “Brain computer interface”]. *Byulleten' sibirskoj mediciny – Bulletin of Siberian Medicine*. 2013. Issue 12. vol. 2. pp. 21. (In Russ.).
18. Sonkin K.M. et al. Development of electroencephalographic pattern classifiers for real and imaginary thumb and index finger movements of one hand. *Artificial Intelligence in Medicine*. 2015. vol. 63(2). pp. 107–117.
19. Stankevich L.A. et al. [Classification of electroencephalographic patterns of imaginary movements by fingers of one arm for development of brain-computer interface]. *Trudy SPIIRAN – SPIIRAS Proceedings*. 2015. vol. 3(40). pp. 163–182. (In Russ.).
20. Stankevich L.A. et al. EEG Pattern Decoding of Rhythmic Individual Finger Imaginary Movements of one Hand. *Human Physiology*. 2016. vol. 42(1). pp. 32–42.
21. Stankevich L., Sonkin K. Human-Robot Interaction Using Brain-Computer Interface Based on EEG Signal Decoding. International Conference on Interactive Collaborative Robotics. 2016. pp. 99–106.
22. Stankevich L.A., Gundelakh F.V. [Robot control with use brain-computer interface]. *Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika – Robotics and Technical Cybernetic.*, 2017. vol. 2. pp. 52–56. (In Russ.).
23. Lawhern V.J. et al. EEGNet: a compact convolutional network for EEG-based brain-computer interfaces. *Journal of neural engineering*. 2018. vol. 15. no. 5. pp. 056013.
24. Schirrmester R.T. et al. Deep learning with convolutional neural networks for brain mapping and decoding of movement-related information from the human EEG. arXiv preprint arXiv:1703.05051.
25. Lotte F. et al. A Review of classification algorithms for EEG-based brain-computer interfaces: a 10-year Update. *Journal of Neural Engineering*. 2018. vol. 15. no. 3. pp. 55.
26. Li Y., Wong K.M., de Bruin H. EEG Signal Classification Based on a Riemannian Distance Measure. IEEE Toronto International Conference Science and Technology for Humanity (TIC-STH). 2009. pp. 268–273.
27. Congedo M., Barachant A., Bhatia R. Riemannian geometry for EEG-based brain-computer interfaces; a primer and review. *Brain-Computer Interfaces*. 2017. vol. 4(3). pp. 155–174.
28. Ruka-robot InMoov. Proekty s Aurdino [Arm-Robot InMoov. Projects with Aurdino]. 2012. Available at: <http://arduino-projects.ru/projects/ruka-robot-inmoov/> (accessed: 05.01.2020).
29. Antropomorfnyj robot NAO [Anthropomorphic robot NAO]. Available at: <http://aldebaran-robotics.com/en> (accessed: 05.01.2020).
30. Polonnikov R.I. *Osnovnye koncepcii obshhej teorii informacii* [General Information Theory: Basic Concepts]. St.-Petersburg: Nauka. 2006. 204 p.

В.В. Евдокимова, Д.А. Кочаров, П.А. Скрелин
**МЕТОД ПОСТРОЕНИЯ ФОРМАНТНЫХ КАРТИН ДЛЯ
ИССЛЕДОВАНИЯ ФОНЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
ГЛАСНЫХ**

Евдокимова В.В., Кочаров Д.А., Скрелин П.А. Метод построения формантных картин для исследования фонетических характеристик гласных.

Аннотация. Представлены результаты применения метода получения формантных составляющих гласных фонем. Проведен обзор существующих направлений разработки методов получения формантных характеристик гласных для разных языков с момента возникновения метода и до недавнего времени. Также проведен обзор степени использования методов оценки формантных картин в речевых технологиях и при обработке естественного языка. На массиве корпуса профессионального чтения CORPRES были получены данные по формантным составляющим для 351929 реализаций гласных фонем на материале 8 дикторов. Полученные данные сгруппированы в соответствии с обозначениями в реальной транскрипции, которую проводили сегментаторы-фонетисты в рамках работы по разметке корпуса. На формантных плоскостях представлено распределение ударных аллофонов гласных для всех дикторов. На примере одного диктора-мужчины представлена вариативность формантных характеристик в корпусе для предударных и заударных аллофонов. Также представлены результаты, свидетельствующие о различиях огубленных безударных /i/ и /a/, которые воспринимаются как /u/ не только наивными носителями языка, так и фонетистами-экспертами. В качестве экспериментального материала использовались записи чтения одним диктором мужского пола специально подобранных предложений, которые учитывали различные лингвистические факторы. Результаты анализа показали, что высока вероятность огубленности безударного неогубленного гласного, если в следующем слогое есть безударный огубленный гласный. Анализ данных формантных составляющих этих гласных показал, что значения первой форманты этих гласных близки к значениям у ударного гласного /u/ для этого диктора. Артикуляторно подъем этих гласных соответствует подъему /u/. Значения второй форманты у гласных [u], которые должны были реализовываться как [i] и [a], различаются. Они в большей степени продвинуты вперед по сравнению с ударным /u/.

Ключевые слова: фонетика, фонология, акустический анализ речевого сигнала, формантные характеристики гласных, характеристики огубленности.

1. Введение. Современные методы обработки речевых сигналов предполагают использование речевых технологий, обеспечивающих обработку материала автоматически без постоянного контроля процедуры оператором.

Однако для решения ряда фонетических задач, связанных с речепорождением в различных специфических условиях и восприятием такой речи, целесообразно обращаться к методам, которые были разработаны еще во второй половине XX века.

Одним из ведущих методов исследования фонетических характеристик гласных остается формантный анализ. Он позволяет делать выводы из наблюдаемых различий между значениями формант, обу-

словленных как разными гласными фонемами, так и общими фонемами в разных диалектах, стилях и типах речи.

2. Методы определения формантных характеристик. Основы формантного анализа были заложены еще в XIX веке в трудах немецкого физика Германа Гельмгольца [1]. Разработанный им метод основывался на сравнении речи с набором сигналов камертонов и резонаторов, причем каждому тембру соответствовал свой набор воспроизводимых частот. Восприятие тембра определялось только набором частот и не зависело от фазы воспроизводимых звуковых сигналов.

Объяснению механизма формирования речевого сигнала посвящены труды германского ученого Л. Германа (L. Hermann), опубликованные в 90-х годах. Им использован математический метод разложения полученной в эксперименте сложной кривой реализации звукового сигнала с помощью рядов Фурье. Конечным результатом, подвергавшимся дальнейшему анализу, стал набор синусоидальных составляющих речевого сигнала.

Проведенные исследования позволили Л. Герману сделать вывод, что тембр определяется сочетанием гармонических составляющих, степень присутствия которых в сигнале зависит от резонансных свойств надгортанных полостей. В надгортанные полости толчками поступает воздух из гортани. Эта воздушная волна модифицируется в соответствии с резонансными свойствами надгортанных полостей. Сформировавшиеся таким образом мощные псевдогармонические составляющие речевого сигнала Л. Герман первым назвал в 1894 году формантами, заменив действующий до этого термин «характерный тон» [1].

В конце XIX – первой половине XX века формантный анализ становится общепринятым, причем по-прежнему для определения формант используются как физические (камертоны), так и математические (метод Фурье) методы. Сложный самонастраивающийся речевой аппарат человека не позволяет исследователям получить устойчивые результаты по конкретным формантам, но дает возможность сформировать общую картину акустической природы гласных. Среди них можно отметить работы А. И. Томсона, который изучал ударные гласные с учетом их соседства с согласными. В. А. Богородицкий изучал формантный состав шепотных гласных при изолированном произношении [1]. Особенность работ Л. В. Щербы в том, что он сопоставлял слуховой анализ гласных с записями их реализации.

Результаты их работ прошли сравнение с современными компьютерными методами. Для гласных [i, e, o] выделенная учеными характерная частота полностью совпадает по диапазону с формантой F2, выделенной при компьютерном анализе. По другим гласным результаты незначительно отличаются. Для гласной [a] по данным Л. В. Щербы характерная ча-

стота 1120 – 1150 Гц лучше соответствует F2, чем в исследованиях А. И. Томсона, для [u] обратная картина – данные А. И. Томсона соответствуют лучше. Более сложная картина с гласным [i]. А. И. Томсон считает его дифтонгом с [i]-образным завершением, а Л. В. Щерба сосредотачивается только на его первой части. По результатам исследований В. А. Богородицкого, тон [u] соответствует частоте F1 [1].

Собранные исследователями акустические медико-биологические материалы позволили сделать ряд выводов о строении речевого тракта человека как сложной системы резонаторов, что дало возможность Г. Фанту представить его в форме акустической системы переменной структуры, имеющей ряд резонансных частот [2].

В составе этой системы Г. Фант выделил две основные составные части: голосовой источник и артикуляторный аппарат. Голосовой источник – нижний отдел речевого аппарата, основные части которого трахея, гортань, голосовые связки. Резонатором голосового источника является весь организм человека, а его костно-мышечная система служит для энергетического обеспечения воздушного потока из голосового источника. Им производится фонация – основная генерация звука речевым аппаратом.

Верхний отдел речевого тракта имеет в составе фарингальную, ротовую, носовую полости и набор активных и пассивных артикулирующих органов (язык, зубы, губы, мягкое небо). Его можно в процессе речи рассматривать как самонастраивающийся акустический фильтр. Именно он, перестраивая структуру по командам мозга, формирует речевой сигнал из акустической волны голосового источника.

Функциональное разделение речевого аппарата на два основных отдела позволило сосредоточить внимание на артикуляторном аппарате – наиболее сложной и важной составной части, которой в основном определяются фонетические особенности речи. В модели Г. Фанта это сочетание настраиваемых стандартных акустических элементов – труб, рупоров. Подобный подход позволил ввести стандартные передаточные функции этих элементов и обратиться к стандартным частотным методам исследования динамических систем различной природы. Сравнение с экспериментальными данными открыло возможность определения параметров, соответствующих резонансным частотам артикуляторного аппарата, то есть формантам.

Представим схему работы речевого аппарата человека. Первый этап – инициация. На нем костно-мышечная система формирует воздушный поток из легких в гортань. Частота формирования потока соответствует дыханию. При его прохождении через нелинейную систему гортань-голосовых связок в ней создается автоколебательный режим – связки вибрируют и при этом проходящий через них поток воз-

духа модулируется с частотой основного тона, создается, по терминологии Г. Фанта, глоттальная волна. Таким образом происходит фонация – формирование энергетической основы акустического сигнала. Глоттальная волна поступает в артикуляторный аппарат и фильтруется им в зависимости от расположения артикулирующих органов, положение которых задается мозгом. Процесс управления артикулирующими органами относится к разделу изучения деятельности мозга и обычно остается за рамками фонетических исследований.

Разработанная Г. Фантом описанная выше акустическая модель речи стала первым физически обоснованным описанием этого процесса и даже дала возможность определять формант расчетным путем. Описание функционирования каждого из отделов речевого тракта помогло проведению мысленных экспериментов – теоретическому описанию происходящих в нем при произнесении отдельных фонем процессов.

С развитием вычислительной техники и звукозаписи анализ речевого сигнала стал частным случаем обработки любого сигнала чисто математическими методами независимо от его физической природы. Машинная обработка открыла возможности решения ряда прикладных фонетических задач. Это и идентификация источника звука, и изучение супrasegmentных характеристик, и машинный синтез речи. Важное место в их решении отводится методам определения и анализа вариаций формантных частот.

Программы автоматического определения траекторий движения формант становятся в настоящее время обязательной составной частью алгоритма обработки речевого сигнала при решении ряда фундаментальных и прикладных фонетических задач, таких как идентификация звуков, изучение супrasegmentных характеристик, настройка синтезаторов речи. Их разработка до сих пор остается крайне актуальной, и большое количество исследований посвящено поиску методов вычисления движения формантных частот.

Автоматическая посегментная обработка (обработка окном) реализаций речи дает богатый материал о структуре сигнала, но зачастую процесс выделения в нем именно формант делается по спектрограммам вручную и определяется опытом исследователя. Тем не менее при значительных объемах речевого материала (Big Data) необходимо отразить его в программе обработки и добиться полной автоматизации процесса.

Рассмотрим основные пути совершенствования методов автоматической обработки речевого сигнала.

Первая группа этих методов основывается на обобщенном математическом аппарате. В них отсутствует фонетический подход, не учтены физиологические особенности речевого тракта человека. Просто проводится обработка в общем случае нестационарного полича-

стотного сигнала. Применение этих методов открывает возможность построения передаточных функций речевого тракта, перехода от временного сигнала к его частотным характеристикам. Появляется возможность слежения за флюктуацией формантных частот во времени.

В [3] рассмотрено применение для построения формантной картины гласных с помощью вейвлет-преобразования. В отличие от часто используемых методов преобразования Фурье и LPC-преобразования при таком подходе сигнал раскладывается на частотные полосы, но при этом сохраняется информация о его изменении во временной области. Иначе говоря, сохранена информация о появлении отдельных частот в сигнале. Появляется возможность изучения вариаций формант во времени. Для необходимой коррекции результатов может быть использован ранее подготовленный банк формант гласных.

Другой метод изучения изменения формант во времени использован в статьях [4, 5]. В них предлагается построение вектора состояния априорно заданной динамической системы (в данном случае речевого тракта) на основе применения рекурсивного фильтра (фильтра Калмана). При таком подходе сглажены временные скачки формантных частот.

В метод LPC-преобразования в работе [6] дополнительно введена процедура «сглаживания» скачков формант с применением алгоритма быстрой сходимости Ньютона – Рафсона. Проводится итерация с оптимальным шагом. Метод требует априорного задания структуры передаточной функции речевого тракта.

Близкий подход использован в [7], где для заранее определенной структуры речевого тракта форманты определяются рядом различных методов. Это метод LPC-преобразования, метод стабилизированного взвешенного преобразования SWLP (расчет полюсов модели при учете действия остаточной энергии, варьируя величину окна обработки), метод минимизации дисперсии искажения реакции MVDR. Для каждого метода определены границы использования.

В [8] рассмотрены общие источники ошибок в методах извлечения гласных формант при помощи LPC-преобразования, рассматриваются причины того, как программное обеспечение влияет на полученные формантные значения. Для этого проводится моделирование измерений, где для каждого гласного звука делаются тысячи измерений с различными настройками.

В [9] описан алгоритм, который автоматически находит самые гладкие формантные траектории для коротких отрезков речи в программе PRAAT. Метод выбирает для каждого сегмента самый ровный из ряда альтернатив. Критерий гладкости основан на моделировании формантных треков с полиномиальными функциями и использует также дисперсии полиномиальных коэффициентов. Автором отмечены

достоинства рассматриваемого метода – полная автоматизация и возможность воспроизведения.

В [10] предлагается новый формантный трекер с использованием смешанных моделей t -плотностей (tMM) для вокала. Резонансные частоты речевого тракта оцениваются методом гибридного линейного прогнозирования (HLP). Гибридный целочисленный цикл, синхронизированный с частотой основного тона (ЧОТ), и метод линейного предсказания (LP) улучшает частотное разрешение на вокализованных сегментах и приводит к более близким формантным оценкам, чем те, которые предоставляются другими методами LP. В сочетании с HLP траектории формант, как утверждают авторы, более точно отслеживаются tMM, чем гауссовскими смешанными моделями (GMM).

Акустическая частотная модель речевого тракта человека находит применение в ряде исследований акустико-физиологического направления [11-15]. Сама акустическая модель в них рассматривается как инструмент воспроизведения голосового сигнала. Однако их результаты показывают, что даже усложнение структуры модели «мозг-речевой аппарат» не дает адекватного описания процесса речи. Они пригодны при синтезе речи, но мало полезны при ее анализе.

Правда, могут решаться частные задачи. Например, определение по формантным частотам особенностей строения тела диктора, в частности оценка длины речевого тракта [16]. Изучался диапазон длин 14...19 см. Параллельно собирались данные магнитно-резонансной томографии. Сделан вывод, что для поставленной цели в большей степени пригодны высшие форманты, как менее подверженные артикуляции.

Еще одна группа исследований основывается на LF-модели речевого тракта Г. Фанта, то есть на выделении голосового источника и артикуляторного аппарата [17, 18]. Формантная картина речевого сигнала рассматривается как результат фильтрации артикуляторным аппаратом глоттальной волны от голосового источника. Особенности глоттальной волны отражаются в структуре формантной картины [19, 20].

Существует ряд работ, построенных на методе обратной фильтрации речевого сигнала с определением формы глоттальной волны. Для решения прямой задачи определения формантной картины он пригоден, но только в сочетании с применением описанной выше двухзвенной модели речевого тракта [21]. В этом случае предполагается, что глоттальная волна имеет сплошной спектр с пиком на частоте основного тона и подвергается дальнейшему частотному преобразованию на артикуляторном аппарате.

3. Развитие метода определения формантных характеристик в прикладных исследованиях. Форманты, или резонансные частоты надгортанных полостей речевого тракта давно считаются одним из

самых компактных и информативных наборов параметров для описания гласных, с важными коррелятами в перцептивном и артикуляторном аспектах. Тем не менее, несмотря на важность этих параметров, их трудно измерить надежно с помощью автоматических методов. Поэтому проводятся работы по конструированию корпусов формантных характеристик, то есть упорядоченные наборы формантных частот и полос пропускания. Естественно, что эти корпуса записаны под конкретные исследования, что определило количество и тип дикторов, фонетическую сложность речевого материала и другие экспериментальные условия. В [22] мотивом для создания нового набора данных формант в первую очередь послужило стремление создать материал, который может помочь синтезировать речь с широким спектром легко выбираемых личных характеристик диктора.

В [23] предлагается метод прогнозирования формант из данных по пику и полосе пропускания, и этот метод применен к извлечению значений первой и второй формант из корпуса региональных диалектов Северной Америки, содержащего 134 000 единицы ручного измерения формант. Это предсказание формант, как показывают результаты, существенно увеличивает производительность расчетов по определению формант по сравнению со стандартными пакетами анализа речи. Авторы демонстрируют, что можно провести социолингвистический анализ на основе данных формант гласных, используя прогнозируемые значения. В дальнейшем социолингвисты могут применять эту методологию для того, чтобы иметь возможность эффективно анализировать большие объемы данных.

Расчет формантных характеристик как метод широко используется в современных исследованиях как для поиска связи с физическими характеристиками говорящего и их восприятием [16, 24, 25], так и для решения более сложных задач фонетики. Предпринимаются попытки исследовать разницу в значении формантных характеристик в зависимости от положения тела говорящего [26], связать их изменения с возрастом человека [27], исследовать разницу формантных характеристик у близнецов [28]. Метод расчета формантных характеристик используется для исследования такого сложного вида речи, как шепотная [29, 30].

Кроме чисто фонетических и физиологических направлений формантный анализ постепенно влился и в разработку систем идентификации человека по голосу и речи. Если в предыдущем веке формантные характеристики использовались в основном в синтезаторах речи, то в настоящее время они помогают разработчикам создавать более сложные системы, сочетая формантный анализ с различными статистическими математическими методами обработки речи. Например, в [31] используется технология лингвистически ограниченных i-

векторов или векторов идентичности на основе формант для автоматического распознавания говорящего. В [32] применяется линейный дискриминантный анализ в задачах судебной идентификации для распознавания говорящего по формантным характеристикам.

В [33] предлагается новый метод выделения характеристик говорящего, основанный на формантах, вейвлет-энтропии и нейронных сетях и обозначенный как FWENN. На первом этапе пять формант и семь пакетов Шеннона для энтропийных волн извлекаются из сигналов динамиком в качестве вектора характеристик говорящего. На втором этапе эти 12 коэффициентов используются в качестве входных данных для нейронных сетей с прямой связью. Вероятностная нейронная сеть также предлагается для сравнения. В отличие от обычного метода распознавания говорящего, при котором признаки извлекаются из предложений (или слов), предлагаемый метод выделяет признаки из гласных. Использование формант гласных позволяет распознавать говорящих, когда доступны только частично записанные слова. Это может быть полезно для глухонемых людей или когда записи повреждены. Экспериментальные результаты показывают, что предложенный метод успешно справляется с задачами верификации и идентификации дикторов с высокой степенью классификации. Результат достигается с помощью минимального объема информации, с использованием только 12 эффективных признаков (то есть длины вектора) и только одного гласного сигнала. Результаты сравниваются с хорошо известными классическими алгоритмами распознавания говорящего и превосходят их.

Принципиально новым направлением исследований является изучение того, как представлены форманты в нейролингвистической структуре мозга человека [34]. В этом случае формантный анализ можно рассматривать как новый инструмент изучения психофизиологических явлений.

4. Предложения по методике построения формантных картин гласных. Воспользуемся для определения формантных картин гласных математическим аппаратом частотных методов исследования динамических систем. Именно амплитудные частотные характеристики (АЧХ) представляют собой аналог фонетической формантной картины [21]. Обработав записи конкретной реализации речевой посылки, найдем АЧХ каждого из отделов речевого тракта. Для этой цели проведем совместную обработку двух различных участков этой записи, причем используем участки записи различной длительности:

- первый сигнал соответствует по времени части сегмента данной фонемы;
- второй сигнал соответствует всей речевой посылке (не менее нескольких минут).

Выбранный подход позволяет обратиться при построении формантной картины гласной к математическому аппарату частотных методов, разработанных в теории автоматического регулирования и использовать частотные передаточные функции звеньев речевого аппарата как формальный аналог формантной картины и инструмент ее описания [21].

Применение этого аппарата дает возможность применять для количественной оценки динамических явлений в речевом тракте стандартные приемы описания динамических систем, удобные для последующего перехода к фонетическим характеристикам.

Пренебрегая обратными связями между отделами речевого тракта, можно упрощенно представить его в форме двухзвенной разомкнутой динамической системы, приведенной на рисунке 1 [21].

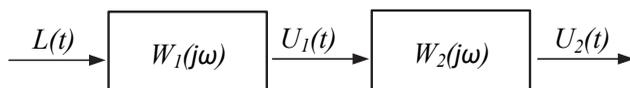


Рис. 1. Динамическая система речевого тракта человека, состоящая из двух динамических звеньев

Введены обозначения:

$L(t)$ — давление потока воздуха, формируемого органами дыхания, на входе голосового аппарата;

$W_1(j\omega)$ — частотная передаточная функция голосового источника;

$W_2(j\omega)$ — частотная передаточная функция артикуляторного аппарата;

$S(t)$ — внешнее воздействие;

$U_1(t)$ — выходной сигнал голосового источника;

$U_2(t)$ — выходной речевой сигнал.

Функция $S(t)$ описывает энергетическое воздействие при речи со стороны костно-мышечной системы и легких, иначе говоря, воздушный поток заданной интенсивности, действующий на голосовой источник. Можно считать, что этот поток пока не имеет частотной структуры, а все избирательные частотные свойства голосового источника отражены в частотной передаточной функции $W_1(j\omega)$, то есть собственно голосовой источник рассматривается по отношению к функции $S(t)$ как фильтрующее звено. Такому представлению хорошо соответствует биологическое описание работы нижнего отдела речевого тракта, включающего в себя

трахею, глотку и голосовые связки, как резонирующей нелинейной частотной системы, способной формировать автоколебательные процессы. Сформированный голосовым источником сигнал $U_1(t)$ поступает на вход второго фильтрующего звена артикуляторного аппарата, который физически представляет собой совокупность надгортанных полостей и артикулирующих органов. Таким образом, выходной сигнал с этого звена $U_2(t)$ определяется не только передаточной функцией $W_2(j\omega)$, но и структурой сигнала $U_1(t)$.

Предложенная двухзвенная модель речевого тракта открывает возможности поиска способов выделения сигналов $U_1(t)$ и $U_2(t)$. Один из этих способов построен на процедуре совместной обработки двух реализаций речевого сигнала, в которых априорно различна степень присутствия в сигнале $U_2(t)$ составляющих, обусловленных действием голосового источника и артикуляторного аппарата. В общем случае этот сигнал может рассматриваться как смесь из колебаний частоты основного тона и тембровых частот с одной стороны и колебаний с частотами, характерными для конкретных фонем — с другой. Степень присутствия каждой из этих групп составляющих может быть изменена при статистической обработке исходного аудиоматериала путем выбора участка и длительности обрабатываемого сегмента. Если сегментировать участок действия конкретной фонемы, то присутствие в спектрограмме составляющих ее собственных частот максимально.

С увеличением длительности обрабатываемого сегмента до фразы, нескольких фраз и далее до всего сообщения степень присутствия в спектрограмме частотных составляющих конкретной фонемы быстро падает из-за статистического усреднения. В то же время составляющие частот голосового источника присутствуют в речевой посылке почти постоянно (кроме глухих согласных и пауз). Их интенсивность почти не ослабевает. В результате для достаточно длинной речевой посылки (в расчетах бралось несколько минут) можно прийти к полностью сглаженной на высокочастотном участке спектральной плотности выходного сигнала $U_2(t)$, сохранившей в то же время пики на частотах основного тона и ее высших гармоник (если они были). В первом приближении такая спектральная плотность, в которой подавлено действие артикуляторного аппарата, может рассматриваться как спектральная плотность сигнала $U_1(t)$.

В отличие от частотной фильтрации описанный прием не вводит жесткой частотной границы фильтрации и позволяет сохранить в сигнале $U_1(t)$ как составляющую частоты основного тона, так и составляющие тембровых частот.

Вторым сравниваемым участком выбираем сегмент конкретной гласной фонемы. Частотная передаточная функция $W_2(j\omega)$ артикуляторного аппарата может быть описана соотношением (1) [21]:

$$|W_2(j\omega)|^2 = \frac{k_0^2 S_a(\omega)}{k_a^2 S_0(\omega)}, \quad (1)$$

где $S_a(\omega)$ – спектральная плотность сигнала $U_2(t)$, полученная при обработке сегмента фонемы; $S_0(\omega)$ — спектральная плотность сигнала $U_2(t)$, полученная при обработке всей речевой посылки; k_0 и k_a — коэффициенты усиления, полученные при обработке всей посылки и сегмента фонемы соответственно.

Сравнение полученных частотных характеристик с результатами определения формантных частот вручную по сонограммам подтверждают допустимость применения способа (рис. 2, 3).

Надо отметить, что основным искажением, которое сделанное допущение может внести в форму частотной характеристики, может быть неполная компенсация составляющей частоты основного тона. Причина в том, что при обработке речевой посылки в целом из-за просодических процессов пик, соответствующий частоте основного тона, может сформироваться более низкий и широкий, чем на графике спектральной плотности фонемы.

При необходимости, например для выделения сигнала $U_1(t)$, реально соответствующего сегменту фонемы, перед тем как провести операцию фильтрации экспериментально полученного сигнала $U_2(t)$ через звено с передаточной функцией обратной передаточной функции артикуляторного аппарата, надо провести структурирование этой передаточной функции, представив ее в виде набора элементарных динамических звеньев. Проведенные расчеты подтверждают применимость предлагаемого способа обработки экспериментального аудиоматериала для изучения частотных свойств голосового источника и артикуляторного аппарата.

Закономерно, что при математической обработке первого (короткого) участка на полученном графике АЧХ формантная картина исследуемой фонемы будет присутствовать в максимальной степени. Наоборот, на графике АЧХ длинной посылки эта формантная картина будет в максимальной степени «затерта», а наиболее рельефно будут присутствовать характеристики частоты основного тона, то есть по этой АЧХ можно оценить спектр глоттальной волны. Таким образом, сопоставление этих АЧХ методами обработки частотных характеристик позволяет выделить формантную картину исследуемой гласной, соответствующую данному короткому сегменту.

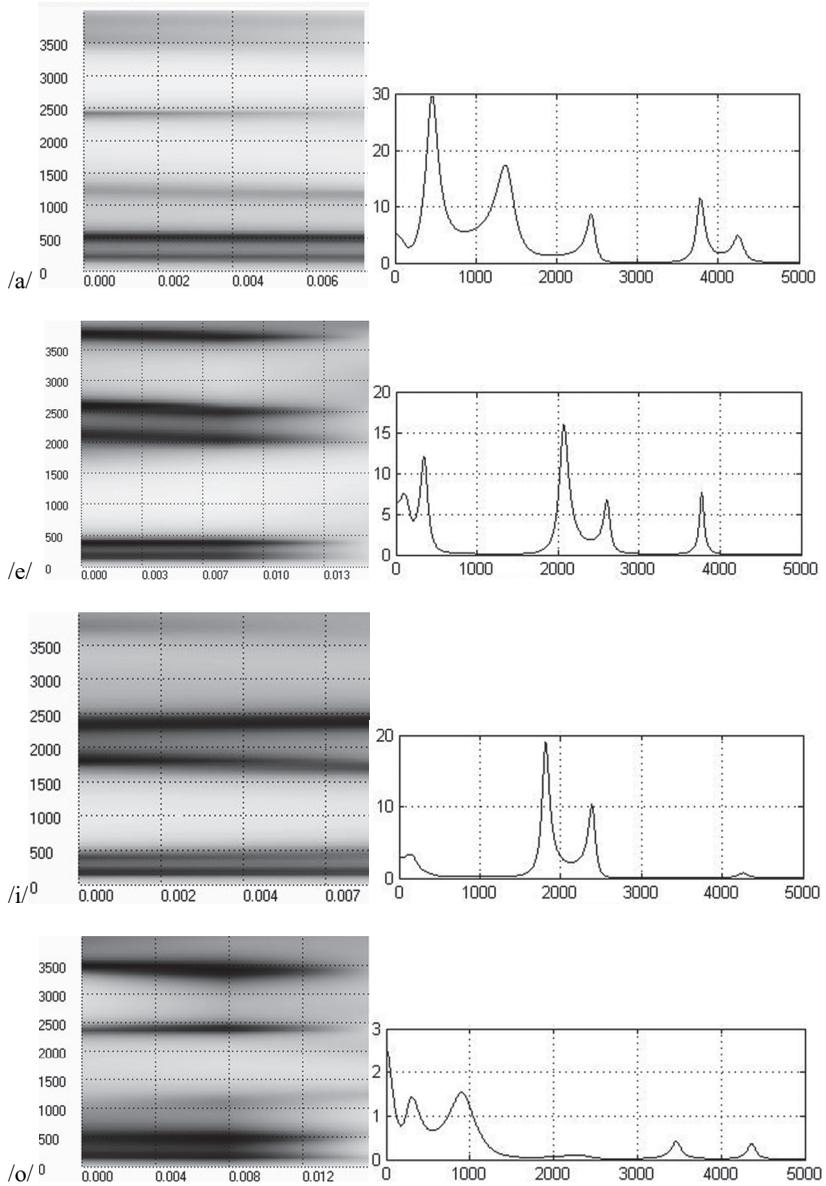


Рис. 2. Сонограммы (слева, ось X – время (с), Y – частота (Гц)) для сегментов гласных /a/, /e/, /i/, /o/; АЧХ артикуляционного аппарата того же сегмента гласной (справа, ось X – частота (Гц), Y – спектральная плотность мощности)

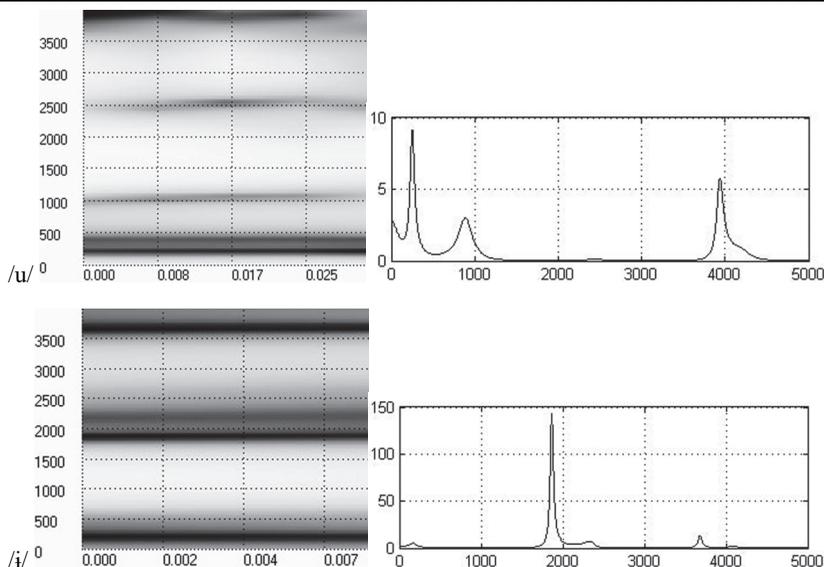


Рис. 3. Сонограммы (слева, ось X – время (с), Y – частота (Гц)) для сегментов гласных /u/, /i/; АЧХ артикуляторного аппарата того же сегмента гласной (справа, ось X – частота (Гц), Y – спектральная плотность мощности)

На рисунках 2, 3 приведены примеры рассчитанных АЧХ и соответствующие им сонограммы аудиосигнала для русских гласных. Сонограммы были сделаны в программе Wave Assistant. Амплитудно-частотные характеристики были получены с помощью оригинальных скриптов, написанных в программе Matlab. Соответствие частотных пиков подтверждает адекватность и применимость метода. На любом временном отрезке гласной может быть получена соответствующая формантная картина.

Основные особенности метода:

- описание в соответствии с LF-моделью Г. Фанта речевого тракта двумя последовательно соединенными динамическими звеньями, каждое из которых описывает динамику его соответствующего отдела;
- построение формантной картины гласной методом совместной обработки АЧХ отделов речевого тракта;
- степень детализации формантной картины гласной определяется выбором ширины окна обработки;
- форма АЧХ артикуляторного аппарата отражает энергетическое соотношение между отдельными формантами гласной;
- возможность автоматизированной обработки речевого материала по описанному методу.

Собранный при посегментной обработке реализации гласной массив АЧХ применим для решения фонетических задач, например для выявления соответствия между перцептивно отобранными свойствами речи и трансформациями формантных картин гласных (см. табл. 1). В таблице видно, что расчет формантных характеристик произведен таким образом, что значения каждой из формант на протяжении гласного участка не перемешиваются между собой. Таким образом, метод позволяет оценить значение резонансных частот надгортанных полостей речевого тракта в динамике и выделить каждую форманту отдельно.

Таблица 1. Трансформация формантных характеристик Гц во времени в одной реализации гласного /e/

F1	F2	F3
494	2730	3478
494	2776	3498
502	2846	3536
506	2876	3424
506	2746	3330
504	2546	3156
490	2336	3080

5. Расчет формантных характеристик дикторов на корпусе CORPRES. В работе проводился расчет формантных характеристик дикторов на корпусе CORPRES [35]. Это полностью аннотированный русский речевой корпус, разработанный на Кафедре фонетики и методики преподавания иностранных языков Санкт-Петербургского государственного университета в результате трехлетнего проекта по созданию корпуса для синтеза речи методом unit-selection. Целью корпуса было предоставить большой образец стандартной русской связной речи. Первоначально он был предназначен для использования в синтезе unit-selection TTS, однако, предполагалось, что он может быть пригоден для использования в более широком диапазоне фонетических исследований и разработок. Корпус включает образцы различных стилей речи, воспроизведенных 4 мужчинами и 4 женщинами. Шесть уровней аннотации охватывают всю фонетическую и просодическую информацию о записанных речевых данных, включая метки частоты основного тона, границы звуков и фонетических событий внутри звуков, узкую и широкую фонетические транскрипции, а также орфографическую расшифровку и просодическую аннотацию. Точная фонетическая транскрипция данных обеспечивает особенно ценный ресурс как для исследований, так и для целей разработки. Общий размер корпуса составляет 528 458 слов и содержит 60 часов речи, состоящих из 7,5 часов от каждого говорящего. 40% корпуса было сегментировано вручную и полностью анно-

тировано на всех шести уровнях. 60% корпуса было частично аннотировано; есть метки для периода основного тона и фонетические метки событий. Орфографическая, просодическая и идеальная фонетическая транскрипция для этой части была сгенерирована и сохранена в виде текстовых файлов. Полностью аннотированная часть корпуса включает материал по всем стилям речи и всем дикторам корпуса.

Расчет формантных характеристик проводился на гласных всех восьми дикторов, представленных в корпусе. Сначала на основе реальной фонетической транскрипции были отобраны из материала гласные. Далее для всех гласных были рассчитаны формантные характеристики методом, разработанным в диссертации В. В. Евдокимовой [36], кратко описанном в разделе 2 и апробированным в фонетических исследованиях [37].

Для разделения гласных на ударные и безударные, а также на принадлежность к определенной фонеме использовались обозначения, которые были приписаны данным гласным при сегментации и аннотировании на уровне реальной транскрипции. Таким образом, в основу разделения были заложены не реальные акустические свойства гласных, а обозначения аннотаторов при сегментации корпуса. В связи с этим вариативность гласных реализаций одной фонемы была чрезвычайно высокой. Было обработано 351929 реализаций гласных фонем. На рисунках 4-13 представлены формантные области для двух первых формант для 6 гласных фонем русского языка для всех 8 дикторов корпуса. Для наглядности картин и сравнимости их с имеющимися представлениями о положении гласных фонем русского языка были выбраны только ударные реализации фонем. Оси на рисунках повернуты в соответствии с тем, как лежат гласные на артикуляторно-акустическом треугольнике.

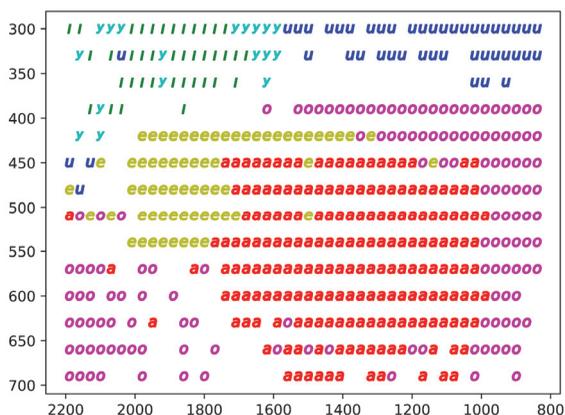


Рис. 4. Диктор 1. Мужской голос. Ударные гласные. Ось X – вторая форманта (Гц), ось Y – первая форманта (Гц)

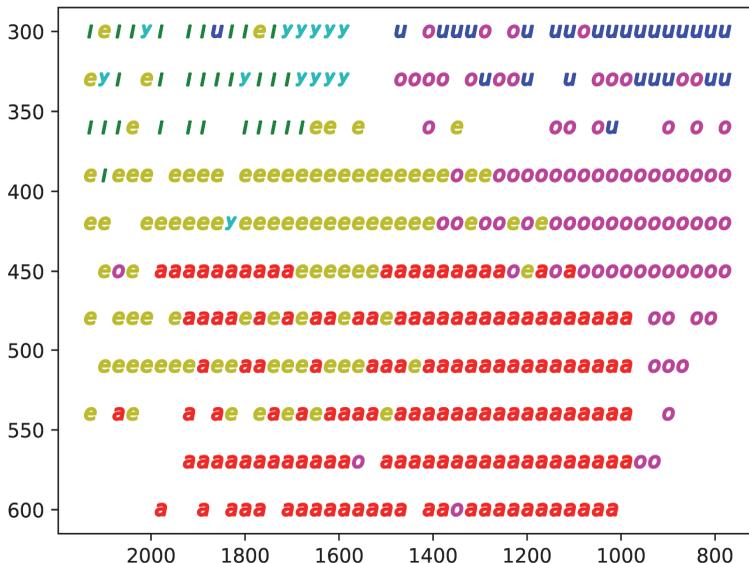


Рис. 5. Диктор 2. Мужской голос. Ударные гласные. Ось X – вторая форманта (Гц), ось Y – первая форманта (Гц)

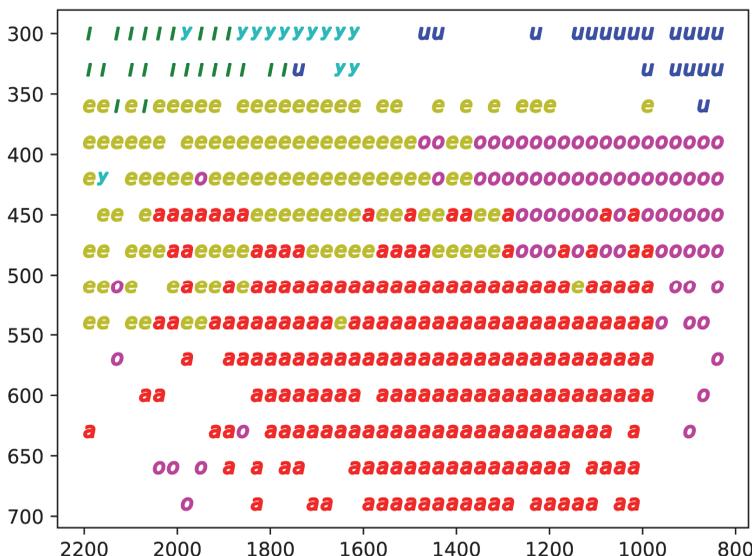


Рис. 6. Диктор 3. Мужской голос. Ударные гласные. Ось X – вторая форманта (Гц), ось Y – первая форманта (Гц)



Рис. 7. Диктор 4. Мужской голос. Ударные гласные. Ось X – вторая форманта (Гц), ось Y – первая форманта (Гц)

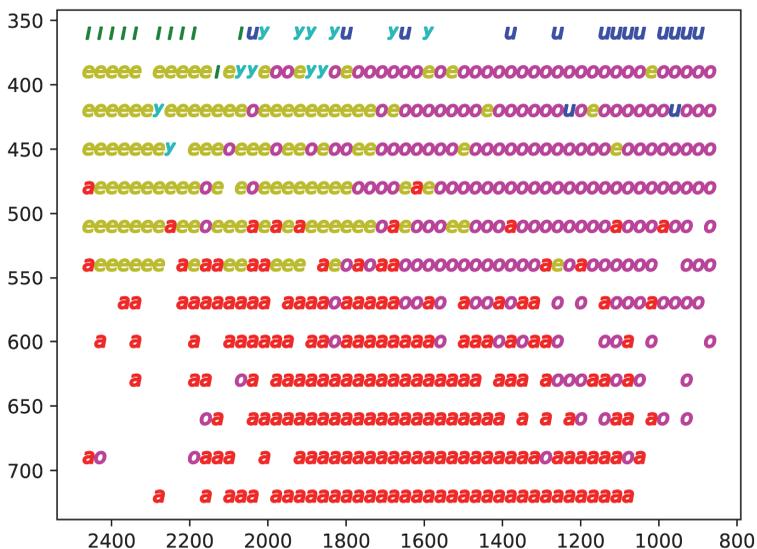


Рис. 8. Диктор 5. Женский голос. Ударные гласные. Ось X – вторая форманта (Гц), ось Y – первая форманта (Гц)

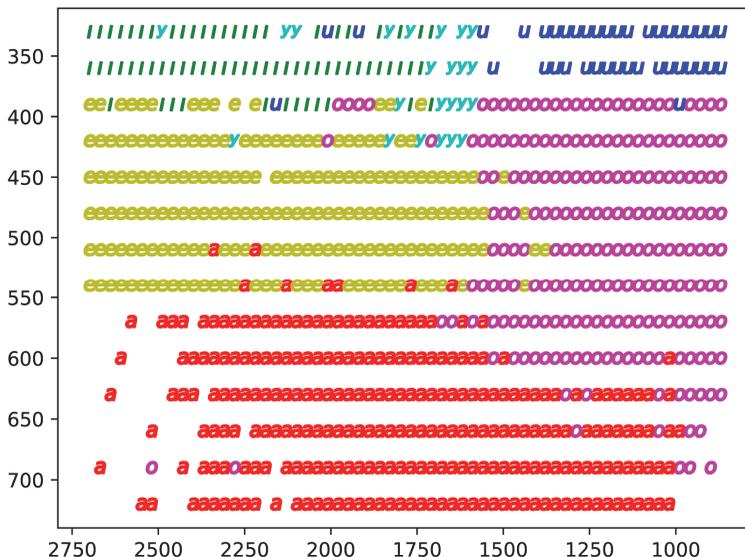


Рис. 9. Диктор 6. Женский голос. Ударные гласные. Ось X – вторая форманта (Гц), ось Y – первая форманта (Гц)

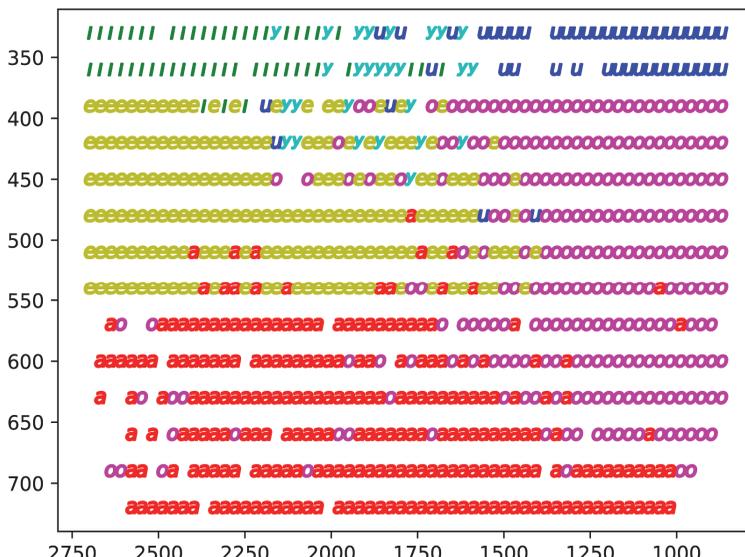


Рис. 10. Диктор 7. Женский голос. Ударные гласные. Ось X – вторая форманта (Гц), ось Y – первая форманта (Гц)

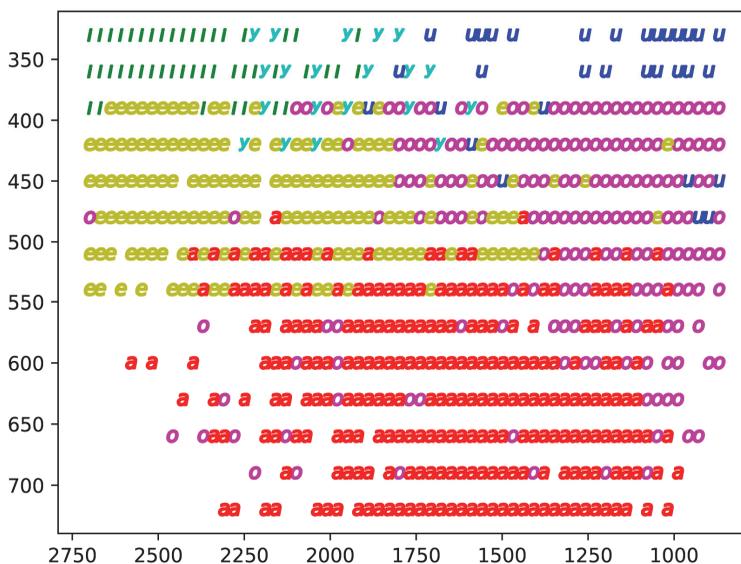


Рис. 11. Диктор 8. Женский голос. Ударные гласные. Ось X – вторая форманта (Гц), ось Y – первая форманта (Гц)

Данные по каждому диктору были рассчитаны на массиве примерно 43000 реализаций гласных. Из них для данных формантных плоскостей были взяты только ударные реализации. На рисунках видно, что ударные гласные у дикторов в целом лежат в тех местах, где обычно и находятся реализации основных аллофонов гласных. Также на отображение данных повлияла собственная частотность некоторых гласных фонем в русском языке. Например, /a/ является самой частотной фонемой, а /i/ встречается реже. Полученные данные также позволяют оценить формантные характеристики безударных гласных в соответствии с тем, как они были обозначены на уровне реальной транскрипции аннотаторами корпуса. Для фонемы /a/ в корпусе обозначались для безударных звуков первый предупредарный, второй предупредарный и заударные аллофоны, для других фонем – только предупредарные и заударные аллофоны. Применение данного метода дает также возможность оценить расположение и безударных аллофонов гласных.

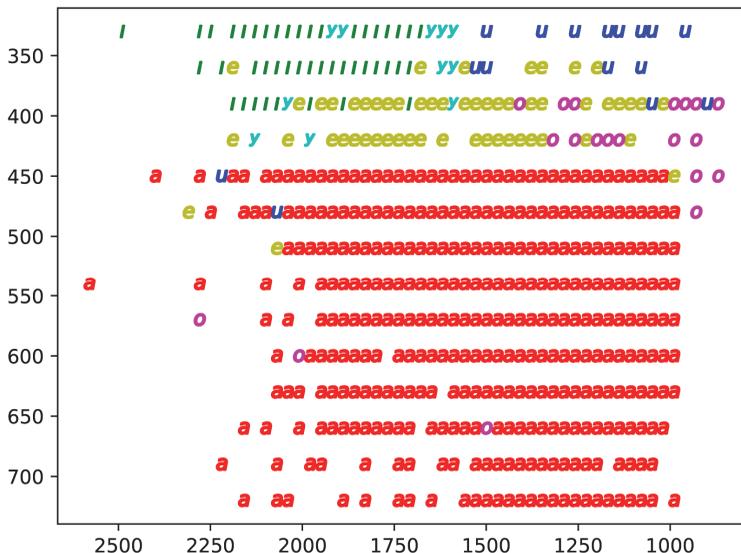


Рис. 12. Диктор 4. Мужской голос. Предударные гласные. Ось X – вторая форманта (Гц), ось Y – первая форманта (Гц). Оси повернуты в соответствии с тем, как лежат гласные на артикуляторно-акустическом треугольнике

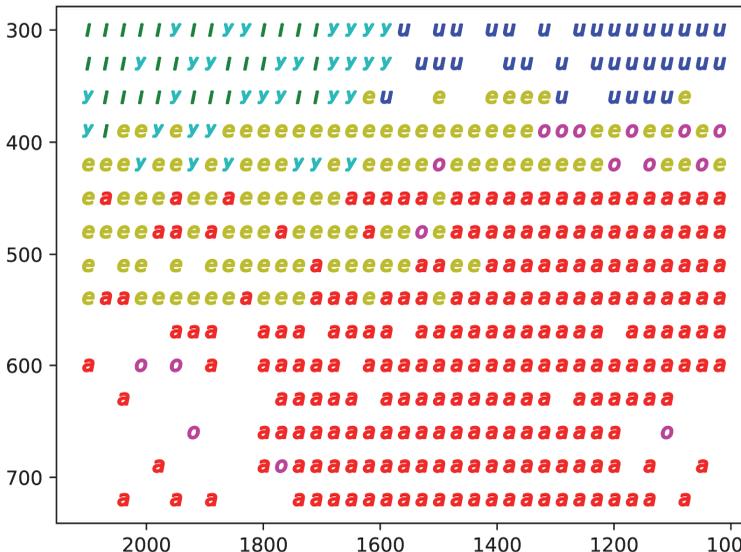


Рис. 13. Диктор 4. Мужской голос. Заударные гласные. Ось X – вторая форманта (Гц), ось Y – первая форманта (Гц). Оси повернуты в соответствии с тем, как лежат гласные на артикуляторно-акустическом треугольнике

6. Использование метода расчета формант гласных для исследования характеристик безударных гласных в потоке речи. Предлагаемый метод определения формант использовался при исследовании акустических характеристик безударных гласных, которые, будучи изначально неогубленными, становятся огубленными под влиянием огубленных гласных, находящихся в следующем слоге, например произношение слова «голубому» как [gulubomu] вместо [gəlubomu] или слова «факультет» как [fukul^ltʲet] вместо [fəkul^ltʲet].

В качестве экспериментального материала использовались записи чтения одним диктором мужского пола «ОМ1» специально подобранных предложений, которые учитывали различные лингвистические факторы, такие как: (1) находится ли перед гласным губной согласный или нет («попугай», «голубой»); (2) на каком расстоянии (в слогах) находится огубленный гласный, который оказывает влияние: в следующем слоге («голубой») или через один («годовую»); (3) находятся ли эти два гласных в одном слове или в соседних словах («попугай», «папа купил»); (4) в какой позиции относительно ударения находится гласный: 2-й предударный, 1-й предударный, ударный, заударный («голубой», «голубка», «каску», «несколку»).

Результаты анализа показали, что высока вероятность огубленности безударного неогубленного гласного, если в следующем слоге есть безударный огубленный гласный. Подробный анализ влияния различных факторов на огубленность безударных гласных описан в [37].

Вслед за анализом факторов был проведен акустический анализ тех гласных, которые становятся огубленными. В рамках анализа исследовались первые форманты, значения которых были получены при помощи описанного выше метода. На рисунке 14 представлены значения формант ударных гласных в речи диктора ОМ1, это акустическое пространство гласных использовалось в качестве референтного при анализе акустических реализаций безударных гласных, которые представлялись интерес. На рисунке 15 представлены значения формант безударных гласных /i/ и /a/ в речи диктора ОМ1, которые стали огубленными под влиянием безударных /u/, находящихся в следующем слоге.

Анализ данных формантных составляющих гласных показал, что значения F1 этих гласных почти такие же, как у ударного гласного /u/ и отличаются незначительно. Артикуляторно подъем этих гласных соответствует подъему /u/. Значения F2 у гласных [u], которые должны были реализовываться как [i] и [a] и обозначены как U_a и U_i , соответственно, различаются. И те, и другие гласные более продвинуты вперед по сравнению с ударным /u/, однако U_i гораздо более продвинуты вперед, чем U_a . U_i оказывается в акустической области,

соответствующей ударному /i/ (на рисунке он обозначен как «у»), в то время как U_a можно обозначить как гласный заднего ряда, хоть и более передний, чем ударный /o/.

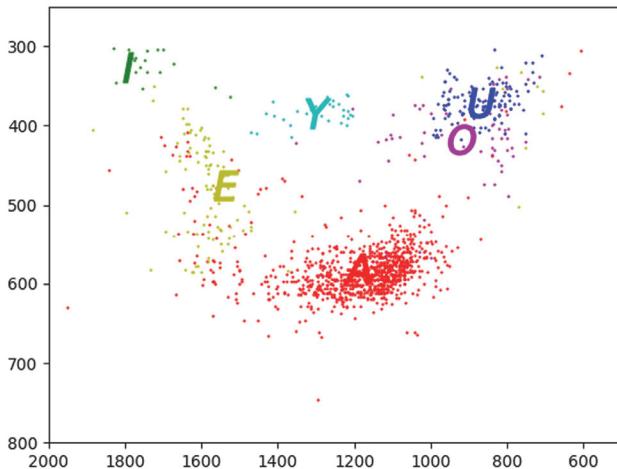


Рис. 14. Диктор ОМ1. Мужской голос. Ударные гласные. Ось X – вторая форманта (Гц), ось Y – первая форманта (Гц). Оси повернуты в соответствии с тем, как лежат гласные на артикуляторно-акустическом треугольнике

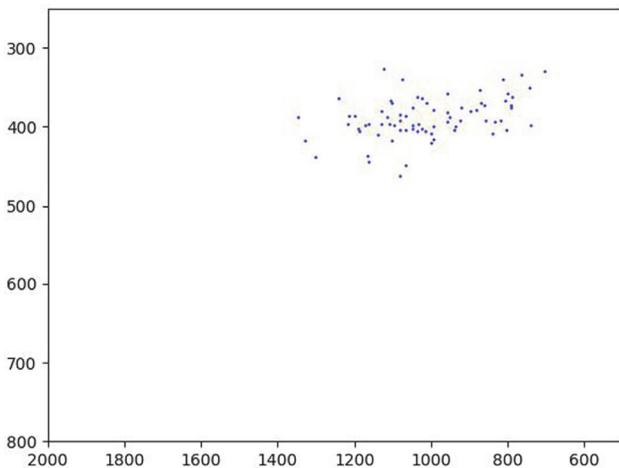


Рис. 15. Диктор ОМ1. Мужской голос. Безударные гласные огубленные под влиянием соседней гласной. Ось X – вторая форманта (Гц), ось Y – первая форманта (Гц). Оси повернуты в соответствии с тем, как лежат гласные на артикуляторно-акустическом треугольнике

7. Заключение. Разработана методика оценки вариативности формантной картины на материале корпуса профессионального чтения русского языка. Выполнен отбор акустического аудиоматериала. Сделана поаллофонная группировка реализаций с учетом позиции гласной в слове. Построены картины девиации основной форманты по сегменту для всех отобранных реализаций. Для каждой отобранной реализации построена картина девиации доминирующей форманты на протяжении сегмента. Сравнительным анализом проверено соответствие структурных и частотных отличий при трансформации формантной картины для разных дикторов и различных позиций гласного в слове. Подтверждено, что в режиме чтения позиция ударных аллофонов на плоскости, образованной первыми двумя формантами, подобна позиции основных аллофонов гласных фонем в русском языке.

Разработанная методика позволяет проводить оценку формантных частот гласных не только в зависимости от ударности гласного, но и от его акустического окружения и других фонетических факторов. При помощи предложенного метода были получены результаты об акустической реализации огубленности неогубленных безударных гласных. Анализ данных показал, что их ряд такой же, как у безударных аллофонов, а подъем такой же как у /u/.

Литература

1. *Гордина М.В.* История фонетических исследований: (от античности до возникновения фонологической теории) // Филологический факультет Санкт-Петербургского государственного университета. 2006. С. 34–37.
2. *Фант Г.* Акустическая теория речеобразования // М.: Наука. 1964. 284 с.
3. *Chaari S., Ouni K., Ellouze N.* Wavelet ridge track interpretation in terms of formants // Ninth International Conference on Spoken Language Processing. 2006. pp. 1017–1020.
4. *Özbek I.Y., Demirekler M.* Tracking of visible vocal tract resonances (VVTR) based on kalman filtering // Ninth International Conference on Spoken Language Processing. 2006. 4 p.
5. *Mellahi T., Hamdi R.* LPC-based formant enhancement method in Kalman filtering for speech enhancement // AEU-International Journal of Electronics and Communications. 2015. vol. 69. no. 2. pp. 545–554.
6. *Weruaga L., Al-Khayat A.* All-pole model estimation of vocal tract on the frequency domain // Ninth International Conference on Spoken Language Processing. 2006. pp. 1001–1004.
7. *Magi C., Bäckström T., Alku P.* Stabilised weighted linear prediction—a robust all-pole method for speech processing // Eight Annual Conference of the International Speech Communication Association. 2007. pp. 522–525.
8. *Kendall T., Vaughn C.* Measurement variability in vowel formant estimation: a simulation experiment // Proceedings of The Scottish Consortium for ICPHS 2015. 2015. 5 p.
9. *Weenink D.* Improved formant frequency measurements of shortsegments // The Scottish Consortium for ICPHS 2015. 2015. 4 p.

10. *Ramirez M.A.* Hybrid Autoregressive Resonance Estimation and Density Mixture Formant Tracking Model // IEEE Access. 2018. vol. 6. pp. 30217–30224.
11. *Arai T.* Sliding Vocal-tract Model and its Application for Vowel Production // Tenth Annual Conference of the International Speech Communication Association. 2009. pp. 72–75.
12. *Ghosh P.K. et al.* Estimation of articulatory gesture patterns from speech acoustics // Tenth Annual Conference of the International Speech Communication Association. 2009. pp. 2803–2806.
13. *Fang Q., Nishikido A., Dang J.* Feedforward Control of A 3D Physiological Articulatory Model for Vowel Production // Tsinghua Science and Technology. 2009. vol. 14. no. 5. pp. 617–622.
14. *Arai T.* Simple Physical Models of the Vocal Tract for Education in Speech Science // Tenth Annual Conference of the International Speech Communication Association. 2009. pp. 756–759.
15. *Lu X.B., Thorpe W., Foster K., Hunter P.* From experiments to articulatory motion – A three dimensional talking head model // Tenth Annual Conference of the International Speech Communication Association. 2009. pp. 64–67.
16. *Lammert A.C., Narayanan S.S.* On Short-Time Estimation of Vocal Tract Length from Formant Frequencies // PloS one. 2015. vol. 10(7). pp. e0132193.
17. *Fant G., Liljencrants J., Lin Q.* A four-parameter model of Glottal Flow // STL-QPSR 1985. vol. 4. no. 1985. pp. 1–13.
18. *Fant G.* The voice source in the connected speech // Speech Communication. 1997. vol. 22. no. 2-3. pp. 125–139.
19. *Murphy P.J.* Relationship between Harmonic Amplitudes and Spectral Zeros and Glottal Open Quotient // International Conference on Phonetic Science (ICPhS). 2007. pp. 889–892.
20. *Uezu Y., Kaburagi T.* Analysis of voice register transition focused on the relationship between pitch and formant frequency // The Scottish Consortium for ICPhS. 2015. 5 p.
21. *Евдокимова В.В.* Системный подход к определению параметров речевого тракта // Вестник Санкт-Петербургского университета. Язык и литература. 2007. № 2-II. pp. 144–148.
22. *Mokhtari P., Tanaka K.A.* Corpus of Japanese Vowel Formant Patterns // Bulletin of The Electrotechnical Laboratory (ETL). 2000. vol. 64. pp. 57–66.
23. *Evanini K., Isard S., Liberman M.* Automatic formant extraction for sociolinguistic analysis of large corpora // Tenth Annual Conference of the International Speech Communication Association. 2009. pp. 1655–1658.
24. *Barreda S.* Investigating the use of formant frequencies in listener judgments of speaker size // Journal of Phonetics. 2016. vol. 55. pp. 1–18.
25. *Macari A.T. et al.* Correlation Between the Position of the Hyoid Bone on Lateral Cephalographs and Formant Frequencies // Journal of voice. 2016. vol. 30. no. 6. pp. 757.
26. *Hoedl P.* Defying gravity: formant frequencies of English vowels produced in upright and supine body position // The Scottish Consortium for ICPhS 2015. 2015. 5 p.
27. *Eichhorn J.T., Kent R.D., Austin D., Vorperian H.K.* Effects of Aging on Vocal Fundamental Frequency and Vowel Formants in Men and Women // Journal of Voice. 2018. vol. 32. no. 5. pp. 644. e1-644. e9.
28. *Zuo D., Mok P.P.K.* Formant dynamics of bilingual identical twins // Journal of Phonetics. 2015. vol. 52. pp. 1–12
29. *Heeren W.F.L.* Can formant shifts and effort cues enhance boundary tone perception in whispered speech? // The Scottish Consortium for ICPhS 2015. 2015. 5 p.

30. *Zhao Y., Lin W.* Study of the formant and duration in Chinese whispered vowel speech // *Applied Acoustics*. 2016. vol. 114. pp. 240–243.
31. *Franco-Pedroso J., Gonzalez-Rodriguez J.* Linguistically-constrained formant-based i-vectors for automatic speaker recognition // *Speech Communication*. 2016. vol. 76. pp. 61–81.
32. *Skarnitzl R., Vaňková J.* Speaker discrimination using formant trajectories from case-work recordings: can LDA do it? // *The Scottish Consortium for ICPhS* 2015. 2015. 5 p.
33. *Dağrouq K., Tutunji T.A.* Speaker identification using vowels features through a combined method of formants, wavelets, and neural network classifiers // *Applied Soft Computing*. 2015. vol. 27. pp. 231–239.
34. *Fisher J.M., Dick F.K., Levy D.F., Wilson S.M.* Neural representation of vowel formants in tonotopic auditory cortex // *NeuroImage*. 2018. vol. 178. pp. 574–582.
35. *Skrelin P.A. et al.* A Fully Annotated Corpus of Russian Speech // *Proceedings of the International Conference on Language Resources and Evaluation*. 2010. pp. 109–112.
36. *Евдокимова В.В.* Вариативность формантной структуры гласного в разных видах речи // *Первый междисциплинарный семинар «Анализ разговорной речи» (АРЗ-2007)*. 2007. С. 49–54.
37. *Kocharov D., Evdokimova V., Evgrafova K., Morskovatykh M.* Labialization of unstressed vowels in Russian: phonetic and perceptual evidence // *International Conference on Speech and Computer*. 2018. pp. 301–310.

Евдокимова Вера Вячеславовна — канд. филол. наук, доцент, кафедра фонетики и методики преподавания иностранных языков, Санкт-Петербургский государственный университет (СПбГУ). Область научных интересов: языкознание, фонетика, фонология, речевые технологии, акустический анализ речевого сигнала, идентификация человека по голосу и речи, синтез и распознавание речевого сигнала, структура речевого поведения. Число научных публикаций — 41. postmaster@phonetics.spb.ru; Университетская наб., 11, 199034, Санкт-Петербург, Россия; р.т.: +7(812)328-9565.

Кочаров Даниил Александрович — канд. филол. наук, доцент, кафедра фонетики и методики преподавания иностранных языков, Санкт-Петербургский государственный университет (СПбГУ). Область научных интересов: автоматическая обработка речи и текста, математическая лингвистика, речевые технологии, фонетика, фонология. Число научных публикаций — 42. kocharov@phonetics.spb.ru; Университетская наб., 11, 199034, Санкт-Петербург, Россия; р.т.: +79219940104.

Скрелин Павел Анатольевич — д-р филол. наук, профессор, заведующий кафедрой, кафедра фонетики и методики преподавания иностранных языков, Санкт-Петербургский государственный университет (СПбГУ). Область научных интересов: языкознание, фонетика, фонология, речевые технологии, акустический анализ речевого сигнала, идентификация человека по голосу и речи, синтез и распознавание речевого сигнала, структура речевого поведения, автоматическая обработка речи и текста. Число научных публикаций — 100. skrelin@phonetics.spb.ru; Университетская наб., 11, 199034, Санкт-Петербург, Россия; р.т.: +7(812)328-9565.

Поддержка исследований. Исследование безударных гласных было выполнено при финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-012-00767).

V. EVDOKIMOVA, D. KOCHAROV, P. SKRELIN
**METHOD FOR CONSTRUCTING FORMANTS FOR STUDYING
PHONETIC CHARACTERISTICS OF VOWELS**

V. Evdokimova, D. Kocharov, P. Skrelin. Method for Constructing Formants for Studying Phonetic Characteristics of Vowels.

Abstract. This article presents the results of applying method for obtaining formant components of vowel phonemes for the corpus of professional reading in Russian. In this paper, a review of existing areas of development of methods for obtaining formant characteristics of vowels for different languages was made. A review was also made of the extent to which formant picture patterns are used in speech technologies and natural language processing. On the corpus of professional reading CORPRES, data was obtained on formant components for 351929 realizations of vowel phonemes on the material of 8 speakers. The data obtained are grouped in accordance with the symbols in the real transcription, which was performed by phoneticians within the framework of segmenting the corpus. The formant planes represent the distribution of allophones of vowels for all speakers according to the two first formants. The variability of formant characteristics in the corpus for pre-tonic and post-tonic allophones are presented for one male speaker. The article also presents the results testifying the difference between the rounded unstressed /i/ and /a/, which are perceived by both naive speakers and expert phoneticians as /u/. As an experimental material, the recordings of reading by one male announcer of specially selected sentences, which took into account various linguistic factors, were used. Analysis of the data of the formant components of these vowels showed that the values of the first formant of these vowels are close to the values of the stressed vowel /u/ for this speaker. The closure of these vowels corresponds to the closure of /u/. The second formant values in the vowels [u], which were to be realized as [i] and [a] are different. They are more advanced in comparison with /u/.

Keywords: phonetics, phonology, formants, acoustic analysis, digital signal processing, vowels, Russian.

Evdokimova Vera — Ph.D., Associate Professor, Department of Phonetics, Saint Petersburg State University (SPSU). Research interests: linguistics, phonetics, phonology, speech technologies, acoustic analysis of a speech signal, identification of a person by voice and speech, synthesis and recognition of a speech signal, structure of speech behavior. The number of publications — 41. postmaster@phonetics.spb.ru; 11, Universitetskaya emb., 199034, Saint-Petersburg, Russia; office phone: +7(812)328-9565.

Kocharov Daniil — Ph.D., Associate professor, Department of Phonetics, Saint Petersburg State University (SPSU). Research interests: automatic speech signal and text processing, computational linguistics, speech technologies, phonetics, phonology. The number of publications — 42. kocharov@phonetics.spb.ru; 11, Universitetskaya emb., 199034, Saint-Petersburg, Russia; office phone: +79219940104.

Skrelin Pavel — Ph.D., Dr.Sci., Professor, Head of Department, Department of Phonetics, Saint Petersburg State University (SPSU). Research interests: automatic speech signal and text processing, linguistics, phonetics, phonology, speech technologies, acoustic analysis of a speech signal, identification of a person by voice and speech, synthesis and recognition of a speech signal. The number of publications — 100. skrelin@phonetics.spb.ru; 11, Universitetskaya emb., 199034, Saint-Petersburg, Russia; office phone: +7(812)328-9565.

Acknowledgements. The research of unstressed vowels was supported by RFBR (grant 18-012-00767).

References

1. Gordina M.V. *Istorija foneticheskikh issledovanij (ot antichnosti do vozniknovenija fonologicheskoi teorii)* [History of phonetic studies (from the ancient times till modern times)]. Filologicheskij fakul'tet Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta. 2006. 538 p. (In Russ.).
2. Fant G. *Akusticheskaja teorija recheobrazovanija* [Acoustic theory of speech production]. M.: Nauka. 1964. 284 p. (In Russ.).
3. Chaari S., Ouni K., Ellouze N. Wavelet ridge track interpretation in terms of formants. Ninth International Conference on Spoken Language Processing. 2006. pp. 1017–1020.
4. Özbek I.Y., Demirekler M. Tracking of visible vocal tract resonances (VVTR) based on kalman filtering. Ninth International Conference on Spoken Language Processing. 2006. 4 p.
5. Mellahi T., Hamdi R. LPC-based formant enhancement method in Kalman filtering for speech enhancement. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*. 2015. vol. 69. no. 2. pp. 545–554.
6. Weruaga L., Al-Khayat A. All-pole model estimation of vocal tract on the frequency domain. Ninth International Conference on Spoken Language Processing. 2006. pp. 1001–1004.
7. Magi C., Bäckström T., Alku P. Stabilised weighted linear prediction—a robust all-pole method for speech processing. Eight Annual Conference of the International Speech Communication Association. 2007. pp. 522–525.
8. Kendall T., Vaughn C. Measurement variability in vowel formant estimation: a simulation experiment. Proceedings of the Scottish Consortium for ICPhS 2015. 2015. 5 p.
9. Weenink D. Improved formant frequency measurements of shortsegments. The Scottish Consortium for ICPhS 2015. 2015. 4 p.
10. Ramirez M.A. Hybrid Autoregressive Resonance Estimation and Density Mixture Formant Tracking Mode. *IEEE Access*. 2018. vol. 6. pp. 30217–30224.
11. Arai T. Sliding Vocal-tract Model and its Application for Vowel Production. Tenth Annual Conference of the International Speech Communication Association. 2009. pp. 72–75.
12. Ghosh P.K. et al. Estimation of articulatory gesture patterns from speech acoustics. Tenth Annual Conference of the International Speech Communication Association. 2009. pp. 2803–2806.
13. Fang Q., Nishikido A., Dang J. Feedforward Control of A 3D Physiological Articulatory Model for Vowel Production. *Tsinghua Science and Technology*. 2009. vol. 14. no. 5. pp. 617–622.
14. Arai T. Simple Physical Models of the Vocal Tract for Education in Speech Science. Tenth Annual Conference of the International Speech Communication Association. 2009. pp. 756–759.
15. Lu X.B., Thorpe W., Foster K., Hunter P. From experiments to articulatory motion – A three dimensional talking head model. Tenth Annual Conference of the International Speech Communication Association. 2009. pp. 64–67.
16. Lammert A.C., Narayanan S.S. On Short-Time Estimation of Vocal Tract Length from Formant Frequencies. *PLoS one*. 2015. vol. 10(7). pp. e0132193.
17. Fant G., Liljencrants J., Lin Q. A four-parameter model of Glottal Flow. *STL-QPSR*. 1985. vol. 4. no. 1985. pp. 1–13.
18. Fant G. The voice source in the connected speech. *Speech Communication*. 1997. vol. 22. no. 2-3. pp. 125–139.

19. Murphy P.J. Relationship between Harmonic Amplitudes and Spectral Zeros and Glottal Open Quotient. International Conference on Phonetic Science (ICPhS). 2007. pp. 889–892.
20. Uezu Y., Kaburagi T. Analysis of voice register transition focused on the relationship between pitch and formant frequency. The Scottish Consortium for ICPhS. 2015. 5 p.
21. Evdokimova V.V. [A systematic approach to determining the parameters of the vocal tract]. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Yazyk i literatura – Vestnik of Saint Petersburg University. Language and Literature*. 2007. vol. 2-II. pp. 144–148.
22. Mokhtari P., Tanaka K.A. Corpus of Japanese Vowel Formant Patterns. *Bulletin of the Electrotechnical Laboratory (ETL)*. 2000. vol. 64. pp. 57–66.
23. Evanini K., Isard S., Liberman M. Automatic formant extraction for sociolinguistic analysis of large corpora. Tenth Annual Conference of the International Speech Communication Association. 2009. pp. 1655–1658.
24. Barreda S. Investigating the use of formant frequencies in listener judgments of speaker size. *Journal of Phonetics*. 2016. vol. 55. pp. 1–18.
25. Macari A.T. et al. Correlation Between the Position of the Hyoid Bone on Lateral Cephalographs and Formant Frequencies. *Journal of voice*. 2016. vol. 30. no. 6. pp. 757.
26. Hoedl P. Defying gravity: formant frequencies of English vowels produced in upright and supine body position. The Scottish Consortium for ICPhS 2015. 2015. 5 p.
27. Eichhorn J.T., Kent R.D., Austin D., Vorperian H.K. Effects of Aging on Vocal Fundamental Frequency and Vowel Formants in Men and Women. *Journal of Voice*. 2018. vol. 32. no. 5. pp. 644. e1-644. e9.
28. Zuo D., Mok P.P.K. Formant dynamics of bilingual identical twins. *Journal of Phonetics*. 2015. vol. 52. pp. 1–12
29. Heeren W.F.L. Can formant shifts and effort cues enhance boundary tone perception in whispered speech? The Scottish Consortium for ICPhS 2015. 2015. 5 p.
30. Zhao Y., Lin W. Study of the formant and duration in Chinese whispered vowel speech. *Applied Acoustics*. 2016. vol. 114. pp. 240–243.
31. Franco-Pedroso J., Gonzalez-Rodriguez J. Linguistically-constrained formant-based i-vectors for automatic speaker recognition. *Speech Communication*. 2016. vol. 76. pp. 61–81.
32. Skarnitzl R., Vaňková J. Speaker discrimination using formant trajectories from case-work recordings: can LDA do it? The Scottish Consortium for ICPhS 2015. 2015. 5 p.
33. Daqrouq K., Tutunji T.A. Speaker identification using vowels features through a combined method of formants, wavelets, and neural network classifiers. *Applied Soft Computing*. 2015. vol. 27. pp. 231–239.
34. Fisher J.M., Dick F.K., Levy D.F., Wilson S.M. Neural representation of vowel formants in tonotopic auditory cortex. *NeuroImage*. 2018. vol. 178. pp. 574–582.
35. Skrelin P.A. et al. A Fully Annotated Corpus of Russian Speech. Proceedings of the International Conference on Language Resources and Evaluation. 2010. pp. 109–112.
36. Evdokimova V.V. [Variability of the formant structure of a vowel in different types of speech]. *Pervyj mezhdisciplinarnyj seminar "Analiz razgovornoj rechi"* [First Interdisciplinary Seminar "Analysis of Conversational Speech"]. 2007. pp. 49–54. (In Russ.).
37. Kocharov D., Evdokimova V., Evgrafova K., Morskovatykh M. Labialization of unstressed vowels in Russian: phonetic and perceptual evidence. International Conference on Speech and Computer. 2018. pp. 301–310.

М.М. ГУРАРИЙ, М.М. ЖАРОВ, С.Г. РУСАКОВ, С.Л. УЛЬЯНОВ
**ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ АЛГОРИТМЫ ПОНИЖЕНИЯ ПОРЯДКА
ДРОБНО-РАЦИОНАЛЬНЫХ ПЕРЕДАТОЧНЫХ ФУНКЦИЙ**

Гурарий М.М., Жаров М.М., Русаков С.Г., Ульянов С.Л. **Вычислительные алгоритмы понижения порядка дробно-рациональных передаточных функций.**

Аннотация. Задача редуцирования линейной динамической системы с постоянными коэффициентами рассматривается как задача аппроксимации ее исходной дробно-рациональной передаточной функции аналогичной функцией более низкого порядка. Ошибка аппроксимации определяется как интегральная квадратичная норма отклонения переходных характеристик исходной и редуцированной передаточной функции во временной области. Рассмотрены формулировки двух основных типов аппроксимационных задач: а) традиционная задача минимизации ошибки аппроксимации при заданном порядке редуцированной модели; б) задача минимизации порядка передаточной функции при заданном допуске на погрешность аппроксимации.

Разработаны алгоритмы решения задач аппроксимации, основанные на итерационном процессе Гаусса – Ньютона. На шаге итерации производится линеаризация текущего отклонения переходных характеристик по коэффициентам знаменателя редуцируемой передаточной функции. Линеаризованное отклонение используется для получения новых значений коэффициентов передаточной функции с помощью метода наименьших квадратов в функциональном пространстве на основе ортогонализации Грама – Шмидта. В работе получен общий вид выражений, представляющих линеаризованное отклонение переходных характеристик.

Для решения задачи минимизации порядка передаточной функции в рамках алгоритма метода наименьших квадратов также используется процесс Грама – Шмидта, условием завершения которого является достижение заданной допустимой нормы ошибки. Показано, что последовательность шагов процесса, соответствующая чередованию коэффициентов полиномов числителя и знаменателя передаточной функции, обеспечивает минимальный порядок передаточной функции.

Дается обзор разработанных алгоритмов на случай векторной передаточной функции с общим знаменателем. Представлен алгоритм с заданием ошибки аппроксимации в виде геометрической суммы скалярных ошибок. Обсуждается использование минимаксной формы для оценки ошибки и возможность распространения предложенного подхода на задачу редуцирования нерациональной исходной передаточной функции.

Разработана экспериментальная программа, реализующая предложенные алгоритмы, и получены результаты численных расчетов на тестовых примерах различных типов.

Ключевые слова: линейные системы, редукция моделей, передаточная функция, дробно-рациональная аппроксимация.

1. Введение. Исследование и разработка методов редукции (понижения порядка) математических моделей – важная ветвь теории динамических систем и теории управления. Актуальность этого направления постоянно возрастает в связи с резким ростом размерностей математических моделей, применяемых в различных областях науки и техники.

Назначение методов редукции [1] состоит в существенном снижении вычислительных затрат на моделирование динамической

системы при сохранении достаточной точности полученных траекторий ее поведения. Последнее требование принципиально отличает модель редукции от известной в теории управления модели сравнения [2, 3], которая оценивает мажоранту и миноранту траектории системы. Как указано в [2], «...во многих случаях точного поведения сложной системы во всех деталях и не требуется, достаточно лишь убедиться в том, что те или иные качественные показатели динамического процесса не выходят за некоторые установленные границы. Для подобных ситуаций и был развит принцип сравнения». Поэтому задача редукционирования не может использовать принцип сравнения.

Разработка алгоритмов редукции произвольных систем в настоящее время практически нереальна из-за отсутствия единого вида модели нелинейной системы. Поэтому основные усилия исследователей направляются на редукцию моделей, представленных линейными системами обыкновенных дифференциальных уравнений (СОДУ) с постоянными коэффициентами [4-7]. Такие модели допускают единообразное представление либо матрицами СОДУ, либо коэффициентами дробно-рациональных передаточных функций (ПФ).

Ограничение методов редукции линейными задачами не лишает их возможности обеспечить эффективное моделирование многих нелинейных систем, содержащих высокоразмерные линейные подсистемы. Примерами таких систем являются современные сверхбольшие интегральные схемы (СБИС), модели которых включают большое число паразитных линейных компонентов, представляющих соединение транзисторных ячеек, их электромагнитного взаимовлияния и внешнего электромагнитного воздействия [8-10].

В рамках матричного представления линейных моделей следует отметить проекционные методы редукционирования на базе подпространств Крылова [11-17], в которых матрица пониженного порядка формируется путем умножения исходной матрицы на прямоугольную матрицу проектирования. Столбцы матрицы проектирования определяются ортогональным базисом в пространстве моментов (векторов состояний системы и некоторого числа их производных в заданном наборе частотных точек), что приводит к совпадению соответствующих выходных моментов исходной и редукционированной систем. То есть эти методы реализуют интерполяционный подход к редукционированию.

Однако порядок модели, полученной проекционными методами часто оказывается существенно выше порядка, необходимого для обеспечения достигнутой точности. Этот недостаток получил название

избыточность (redundancy) [15]. Он связан с коррелированностью выбранных базисных моментов системы и в наибольшей степени проявляется при редукции многопортовых систем. Для его преодоления предложены методы на основе генерации дополнительных векторов состояния в расширенном множестве частотных точек и получении базиса либо на основе сингулярного разложения [16], либо с помощью отбора наименее коррелированных векторов [17]. Эти методы также позволяют автоматически определять порядок по заданной точности редукции, в то время как традиционные подходы требуют явного задания порядка редуцированной модели.

Кроме того, к ограничениям проекционных методов относится то, что они используют вектора состояния в дискретном множестве частотных точек, что часто не позволяет учесть наличие узкополосных резонансов между выбранными точками и может приводить к заметной погрешности метода.

Рассмотренные недостатки присутствуют и в большинстве методов редукции на основе представления линейных моделей в форме дробно-рациональной ПФ [18-23]. Эти методы используют в основном двухэтапную процедуру. На первом этапе вычисляются значения исходной ПФ в некотором множестве частотных точек, а на втором – производится дробно-рациональная аппроксимация полученной табличной зависимости. Достоинство такого подхода состоит в возможности его использования для редукции систем с распределенными параметрами при наличии соответствующей процедуры моделирования таких систем.

Наиболее известная реализация такого подхода представлена методом векторной аппроксимации (Vector Fitting) [18], который доказал свою эффективность на практике, несмотря на эвристический характер используемого алгоритма. Методы [19-20] основаны на оптимизационном подходе к задаче аппроксимации. Критерием является взвешенная сумма квадратов отклонений от вычисленных табличных значений. Однако применение оптимизации не устраняет ошибки, связанные с дискретным набором частотных точек.

Такие ошибки исключаются в методе удаления несущественных полюсов [21-23], который использует разложение дробно-рациональной ПФ на элементарные дроби и по определенному критерию отбрасывает те из них, которые признаны несущественными. Однако, отсутствие процедуры варьирования оставшимися параметрами (значения полюсов и вычетов) является его недостатком.

Предлагается пакет методов понижения порядка дробно-рациональных ПФ, который в отличие от известных подходов обеспечивает сочетание следующих характеристик:

– исключение избыточности редуцированной модели за счет использования алгоритмов оптимизации;

– исключение ошибок дискретизации частотной области за счет построение показателя оптимальности на основе оценки погрешности редукации в виде интегральной нормы отклонения переходных характеристик исходной и редуцированной ПФ;

– обеспечение возможности автоматического определения порядка редуцированных моделей по заданной допустимой погрешности.

2. Математическая формулировка задачи. В рассматриваемой задаче аппроксимирующая ПФ определена дробно-рациональной функцией лапласовской переменной s в лапласовской области:

$$H(s) = P(s) / Q(s) = \left(a_0 + \sum_{i=1}^m a_i s^i \right) / \left(b_0 + \sum_{i=1}^n b_i s^i \right), \quad (1)$$

где $P(s), Q(s)$ – полиномы числителя и знаменателя порядка m и n соответственно. Предполагается, что ПФ редуцируемой системы (исходная ПФ) имеет аналогичную форму дробно-рациональной функции с более высоким порядком знаменателя $\bar{n} \geq n$ и порядком числителя $\bar{m} < \bar{n}$:

$$\bar{H}(s) = \bar{P}(s) / \bar{Q}(s) = \left(a_0 + \sum_{i=1}^{\bar{m}} \bar{a}_i s^i \right) / \left(b_0 + \sum_{i=1}^{\bar{n}} \bar{b}_i s^i \right). \quad (2)$$

Пусть аппроксимирующая ПФ (1) имеет N различных полюсов со значениями r_i и кратностями k_i ($1 \leq i \leq N$). Аналогичные величины для исходной ПФ (2) обозначим $\bar{N}, \bar{r}_i, \bar{k}_i$. Тогда переходные характеристики (отклики на ступенчатую функцию – $h(t), \bar{h}(t)$) для ПФ (1), (2) являются оригиналами лапласовских функций $h(t) \rightarrow H(s) / s, \bar{h}(t) \rightarrow \bar{H}(s) / s$ соответственно, и имеют вид:

$$\begin{aligned} h(t) &= a_0 / b_0 + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{k_i} d_{ij} t^j \exp r_i t, \\ \bar{h}(t) &= a_0 / b_0 + \sum_{i=1}^{\bar{N}} \sum_{j=1}^{\bar{k}_i} \bar{d}_{ij} t^j \exp \bar{r}_i t. \end{aligned} \quad (3)$$

Ошибку аппроксимации (1) как функции ее параметров (порядки m, n и вектора коэффициентов a, b) мы будем

оценивать квадратом нормы отклонения переходных характеристик для ПФ (3). Такая оценка аналогична критерию оптимальности при достижении максимальной точности системы автоматического регулирования [24].

$$e(a, m, b, n) = \|\Delta h\|^2 = \int_0^\infty (\bar{h}(t) - h(t))^2 dt. \quad (4)$$

Здесь $\Delta h = \bar{h}(t) - h(t)$. Возможность вычисления интеграла в (4) будет обеспечена, если отклики ограничены на всей временной оси, поэтому будем предполагать, что выполняются стандартные условия устойчивости (отрицательные действительные части полюсов) и ограниченности (порядок числителя меньше порядка знаменателя) для переходных характеристик (3):

$$re(\bar{r}_i) < 0, re(r_i) < 0, \bar{m} < \bar{n}, m < n.$$

Другим необходимым условием существования интеграла (4) является равенство статических уровней переходных характеристик ($\bar{h}(\infty) = h(\infty)$) или значений ПФ в нулевой точке $\bar{H}(0) = H(0)$. Из того, что $H(0) = a_0 / b_0$, следует необходимость сохранения этого значения a_0 для всех ПФ, а учитывая, что коэффициент b_0 может быть выбран произвольно, можно считать, что оба нулевых коэффициента сохраняются в аппроксимирующей ПФ. Это условие отражено в выражениях (1, 2).

Задачей дробно-рациональной аппроксимации является определение порядков ***m, n*** и векторов ***a, b*** аппроксимирующей ПФ (жирным шрифтом здесь и далее выделены величины, формируемые в результате решения задачи). В рамках оптимизационных подходов к решению задачи определим два следующих возможных показателя оптимизации.

A. Минимальная ошибка (4) при заданных порядках числителя и знаменателя:

$$a, b = \underset{a, b}{\operatorname{argmin}} (e(a, m, b, n)). \quad (5)$$

В рамках этой задачи обычно предполагается максимально возможное значение порядка числителя $m = n - 1$.

B. Минимальный порядок ПФ (1) при заданном допуске на ошибку – *Tol*. Под порядком ПФ обычно понимается порядок

знаменателя, поэтому будем считать его приоритетным показателем, который определяется при максимально возможном порядке числителя.

В'. Минимальный порядок знаменателя при максимально возможном порядке числителя $m = n - 1$ может быть записан как нахождение требуемого порядка и последующее определение коэффициентов полиномов, что задается в виде:

$$\mathbf{n, b} = \operatorname{argmin}_{a, b} \left(n \mid \min_{a, b} (e(a, n - 1, b, n)) \leq Tol \right). \quad (6)$$

Здесь вертикальная черта, как обычно, разделяет критерий и условия оптимизации. После решения (6) можно перейти к следующему этапу.

В''. Минимальный порядок числителя при известном порядке знаменателя $m < n$:

$$\mathbf{a, m} = \operatorname{argmin}_{a, m} (e(a, m, \mathbf{b}, \mathbf{n})). \quad (7)$$

2.1. Модели многопортовых систем. Рассмотрим далее подход для распространения описанных задач на векторный случай, соответствующий многопортовым системам. При этом предполагается, что такая модель определяется единой динамической системой с общим набором полюсов. В этом случае векторная задача предполагает одинаковый знаменатель для всех ПФ, то есть аппроксимирующая и исходная векторные ПФ содержат K скалярных компонент вида:

$H^{(k)}(s) = P^{(k)}(s) / Q(s)$, $\bar{H}^{(k)}(s) = \bar{P}^{(k)}(s) / \bar{Q}(s)$, $k = 1, 2, \dots, K$, где $Q(s)$, $\bar{Q}(s)$ имеют такой же вид, как знаменатели в (1), (2), соответственно. При этом:

$$\bar{P}^{(k)}(s) = a_0 + \sum_{i=1}^{\bar{m}^{(k)}} \bar{a}_i^{(k)} s^i, P^{(k)}(s) = a_0 + \sum_{i=1}^{m^{(k)}} a_i^{(k)} s^i,$$

то есть $P^{(k)}(s)$, $\bar{P}^{(k)}(s)$ имеют верхний индекс (k) в переменных для коэффициентов полиномов и значений порядков.

В векторном случае под ошибкой k -й ПФ понимается значение ошибки (4), масштабированное квадратом весового коэффициента w_k для данной ПФ:

$$e^{(k)}(a^{(k)}, m^{(k)}, b, n) = w_k^2 e(a^{(k)}, m^{(k)}, b, n). \quad (8)$$

Предполагается, что весовые коэффициенты w_k задаются пользователем для соизмерения требований, предъявляемых к точности отображения различных ПФ. Значение w_k часто удобно задавать обратно пропорционально норме соответствующей исходной ПФ, которая определяется отклонением ее передаточной характеристики от статического значения $\bar{h}^{(k)}(\infty)$:

$$w_k = 1 / \bar{H}^{(k)}, \text{ где } \bar{H}^{(k)} = \sqrt{\int_0^\infty (\bar{h}^{(k)}(t) - \bar{h}^{(k)}(\infty))^2 dt}.$$

Ошибка аппроксимации вектора ПФ определяется как некоторая функция агрегирования Ψ значений ошибок всех компонент вектора:

$$Err(a^{(**)}, m^{(**)}, b, n) = \Psi(e^{(**)}(a^{(**)}, m^{(**)}, b, n)).$$

Здесь наличие верхнего индекса вида $x^{(**)}$ означает множество всех значений $x^{(k)}$ в диапазоне k от 1 до K .

Обычно рассматриваются два варианта свертки частных показателей оптимизации:

1. Линейная свертка:

$$\Psi^{sum}(e^{(**)}(a^{(**)}, m^{(**)}, b, n)) = \sum_{k=1}^K e^{(k)}(a^{(k)}, m^{(k)}, b, n). \quad (9)$$

2. Минимаксная свертка (наихудший случай):

$$\Psi^{max}(e^{(**)}(a^{(**)}, m^{(**)}, b, n)) = \max_k e^{(k)}(a^{(k)}, m^{(k)}, b, n). \quad (10)$$

При любом выборе критерия задачи аппроксимации \mathbf{A}, \mathbf{B}' могут быть определены аналогично скалярным задачам (5), (6) с заменой e, a, m на $E, a^{(**)}, m^{(**)}$ соответственно. Так, векторный вариант задачи (5) принимает вид:

$$\mathbf{a}^{(**)}, \mathbf{b} = \arg \min_{a,b} \left(E \left(\mathbf{a}^{(**)}, m^{(**)}, b, n \right) \right), \quad (11)$$

а для задачи (6):

$$\mathbf{n}, \mathbf{b} = \arg \min_{n,b} \left(n \left| \min_{a^{(**)},n} E \left(\mathbf{a}^{(**)}, n-1, b, n \right) \leq Tol \right. \right). \quad (12)$$

Задача **В''** (7) заменяется K задачами определения числителя для каждой ПФ:

$$\mathbf{a}^{(k)}, \mathbf{m}^{(k)} = \arg \min_{a^{(k)}, m^{(k)}} \left(e \left(\mathbf{a}^{(k)}, \mathbf{m}^{(k)}, \mathbf{b}, \mathbf{n} \right) \right), k = 1 \dots K. \quad (13)$$

3. Основные принципы построения алгоритмов.

Минимизация квадратичной формы от неизвестных параметров наиболее эффективно реализуется на основе классического метода наименьших квадратов (МНК) [25]. Однако нелинейная зависимость отклонения ПФ в (4) от коэффициентов знаменателя не позволяет непосредственно применить МНК. В нелинейном случае используются итерации Гаусса – Ньютона [26], на каждом шаге которых решается линеаризованная задача МНК. Полученное решение используется как текущее приближение для выполнения следующей итерации. Процесс прекращается, когда изменение ошибки (4) на шаге становится достаточно малым (уровень малости определяется пользователем).

Основные этапы применения метода Гаусса – Ньютона к задаче дробно-рациональной аппроксимации.

3.1. МНК в функциональном пространстве. Так как квадратичная форма, представляющая ошибку, задается в интегральном виде (4), используется классическая форма МНК в функциональном пространстве [25] для определения наилучшей (минимизирующей квадратичную ошибку) аппроксимации заданной функции $g(t)$ линейной комбинацией заданных функций $f_i(t)$ с неизвестным вектором коэффициентов c :

$$c = \operatorname{argmin}_c \sum_{i=1}^L c_i \cdot f_i(t) - g(t). \quad (14)$$

Для решения задачи (14) с фиксированным числом (L) членов суммы в (14) применяется процесс ортогонализации Грама – Шмидта,

который использует следующее определение скалярного произведения и нормы вектора в функциональном пространстве:

$$\langle x \cdot y \rangle = \int_0^{\infty} x(t) \cdot y(t) dt, \quad x^2 = x \cdot x. \quad (15)$$

Алгоритм строит ортонормальный базис $z_i(t) : \langle z_i \cdot z_j \rangle = \delta_i^j$, где δ_i^j – символ Кронекера. Он состоит в последовательном ($i = 1, 2, \dots$) формировании очередного базисного вектора z_i разложением текущей функции $f_i(t)$ по предыдущим базисным векторам и нормализацией остаточной функции.

$$\varphi_i = f_i - \sum_{j=1}^i \langle f_i \cdot z_j \rangle \cdot z_j, \quad z_i = \frac{\varphi_i}{\|\varphi_i\|}. \quad (16)$$

В процессе вычислений (16) запоминается очередная i -я строка нижней треугольной матрицы $D_{ij} = \langle f_i \cdot z_j \rangle$ ($j = 1, 2, \dots, i$).

После выполнения процесса Грама – Шмидта для решения задачи (14) следует получить коэффициенты разложения функции $g(t)$ по ортогональному базису $z_i(t)$, и можно определить квадрат нормы ошибки, монотонно убывающий на каждом шаге:

$$d_i = \langle g \cdot z_i \rangle, \quad e_i = e_{i-1} - d_i^2. \quad (17)$$

Перед началом разложения $g(t)$ задается $e_0 = \|g\|^2 = g \cdot g$.

Вектор c коэффициентов c_i в (14) определяется затем решением линейной системы с треугольной матрицей D , полученной в процессе Грама – Шмидта и вектором правой части из коэффициентов разложения d_i функции $g(t)$: $c = D^{-1}d$.

Формулировка (14) соответствует задаче типа (5) с фиксированным числом коэффициентов. Критерии типа (6,7) соответствуют задаче обеспечения требуемой погрешности при минимальном числе членов в последовательности $f_i(t)$, определив и вектор коэффициентов c :

$$L, c = \underset{L}{\operatorname{argmin}} \left(L \mid \min_c (e(c, L)) \leq Tol \right), \quad (18)$$

Решение может быть легко получено, если процессы (16) и (17) выполнять параллельно, производя на каждом шаге оценку ошибки по (17), и прекращать выполнение при достижении требуемой точности $e_i \leq Tol$. Тогда последнее значение индекса i , при котором удовлетворяется данное требование, равно искомому минимуму (L) длины последовательности.

3.2. Линеаризация ПФ по коэффициентам полиномов.

Функции $f_i(t)$, $g(t)$ (1) должны определяться из ПФ $H(s)$, линеаризованной вблизи полученной на шаге Гаусса – Ньютона начальной аппроксимацией $H_{init}(s) = P_{init}(s) / Q_{init}(s)$. На первом шаге в качестве начальной аппроксимации берется исходная ПФ: $H_{init}(s) = \bar{H}(s)$. Обозначим отклонения числителя и знаменателя ПФ $H(s)$ от соответствующих величин в ПФ $H_{init}(s)$ как:

$$\delta P = P - P_{init}, \quad \delta Q = Q - Q_{init}. \quad (19)$$

На основе δP , δQ запишем выражение для ПФ:

$$H(s) = \frac{P}{Q} = \frac{P_{init} + (P - P_{init})}{Q_{init} + (Q - Q_{init})} = \frac{P_{init}}{Q_{init}} \cdot \frac{1 - \delta P / P_{init}}{1 - \delta Q / Q_{init}}.$$

и представим его в виде разложения в ряд Тейлора по степеням δQ :

$$H(s) = \frac{P_{init}}{Q_{init}} \cdot \left(1 - \delta P / P_{init} - \delta Q / Q_{init} + o(\delta Q^2) + o(\delta Q \cdot \delta P) \right).$$

Пренебрегая в этом выражении членами порядка выше первого относительно малых величин $\delta Q, \delta P$ и подставив в него выражения для $\delta Q, \delta P$ (19), получим приближенное выражение для ПФ с линейной зависимостью как от коэффициентов числителя, так и от коэффициентов знаменателя:

$$H(s) \approx \frac{P_{init}}{Q_{init}} + \frac{1}{Q_{init}} P - \frac{P_{init}}{Q_{init}^2} Q.$$

Вычитая из этого выражения исходную ПФ \bar{H} (2) и подставляя в него выражения для P и Q из (1), получим отклонение $\Delta H = H(s) - \bar{H}(s)$ в виде:

$$\Delta H = \sum_{i=1}^m \frac{a_i s^i}{Q_{init}} - \sum_{i=1}^m \frac{b_i s^i P_{init}}{Q_{init}^2} - \left(\bar{H} - \frac{P_{init} - a_0}{Q_{init}} + \frac{b_0 P_{init}}{Q_{init}^2} \right) = \quad (20)$$

$$= \sum_{i=1}^m a_i U_i(s) - \sum_{i=1}^m b_i V_i(s) - G(s),$$

где лапласовские функции $U_i(s), V_i(s), G(s)$ определены следующим образом:

$$U_0(s) = 1/Q_{init}(s), U_i(s) = s^i U_0(s),$$

$$V_0(s) = P_{init}(s)/Q_{init}^2(s), V_i(s) = s^i V_0(s), \quad (21)$$

$$G(s) = H(s) - (P_{init}(s) - a_0)/Q_{init}(s) + b_0 V_0(s).$$

Оригиналы этих функций можно получить в виде:

$$u_0(t) \rightarrow U_0(s), u_i(t) = \frac{d^i u_0}{dt^i}, i = 1, \dots, M,$$

$$v_0(t) \rightarrow V_0(s), v_i(t) = \frac{d^i v_0}{dt^i}, i = 1, \dots, N, \quad (22)$$

$$g(t) \rightarrow G(s).$$

Здесь учитывается, что умножение изображения на лапласовскую переменную s соответствует дифференцированию оригинала. Тогда выражение (20) после перехода во временную область примет вид:

$$\Delta h(t) \approx \sum_{i=1}^m a_i \cdot u_i(t) - \sum_{i=1}^n b_i \cdot v_i(t) - g(t). \quad (23)$$

Полученное выражение (23) соответствует общему виду функции, норма которой минимизируется в рамках МНК (14), что позволит нам применить процесс ортогонализации Грама – Шмидта для задач аппроксимации ПФ (7, 9). Отметим, что вычисление интегралов для скалярных произведений (15) может быть проведено аналитически для функций (3) и их производных. Для этого требуется предварительное определение параметров функций (3) вычислением вычетов дробно-рациональных ПФ (1). Альтернативный подход к вычислению выражений вида (15) по значениям вычетов в точках полюсов изображения одного из сомножителей приводится далее.

3.3. Расчет скалярных произведений оригиналов функций по их изображениям Лапласа. Для расчетов вида (15) рассмотрим скалярное произведение функций $e(t)$ и $r(t)$:

$$\langle e \cdot r \rangle = \int_0^{\infty} e(t) \cdot r(t) dt. \quad (24)$$

Введем функции:

$$p(t) = e(t) \cdot r(t) \text{ и } w(t) = \int_0^t p(\tau) d\tau. \quad (25)$$

При рассмотрении функций $e(t), r(t), p(t), w(t)$ будем обозначать их оригиналы как $E(s), R(s), P(s), W(s)$ соответственно.

Тогда в соответствии с правилом интегрирования оригинала [27], получаем из (25):

$$W(s) = P(s)/s \text{ или } P(s) = s \cdot W(s). \quad (26)$$

Так как для $f(t) \rightarrow F(s)$ имеет место равенство [27]: $\lim_{s \rightarrow 0} sF(s) = \lim_{t \rightarrow \infty} f(t) = f(\infty)$, то из (24), (26) следует, что:

$$\langle e \cdot r \rangle = w(\infty) = P(0). \quad (27)$$

Применяя правило умножения оригиналов [27] к функции $p(t)$ (25), получим:

$$\frac{1}{2\pi j} \int_{\lambda-j\infty}^{\lambda+j\infty} E(z) \cdot R(s-z) dz = P(s).$$

Отсюда для $s = 0$ получаем из (27):

$$\langle e \cdot r \rangle = \frac{1}{2\pi j} \int_{\lambda-j\infty}^{\lambda+j\infty} E(z) \cdot R(-z) dz. \quad (28)$$

Порядок числителя рассматриваемых дробно-рациональных функций меньше порядка их знаменателя по крайней мере на 1. То

есть порядок малости функций $E(s)$ и $V(s)$ при $s \rightarrow \infty$ имеет величину $o(1/|s|)$, откуда следует, что произведение $E(s)V(s)$ имеет порядок $1/|s|^2$. Тогда интеграл (20) сходится при $\lambda = 0$ в (28), и можно записать:

$$\langle e \cdot r \rangle = \frac{1}{2\pi j} \int_{-j\infty}^{+j\infty} E(z) \cdot R(-z) dz. \quad (29)$$

Для вычисления (29) можно использовать теорему о вычетах [27]:

$$e \cdot r = \frac{1}{2\pi j} \oint F(\xi) d\xi = \sum_{k=1}^n \text{Res}F(z), \quad (30)$$

$$\text{где } \text{Res}F(a) = \frac{1}{(m-1)!} \cdot \lim_{z \rightarrow a} \frac{d^{m-1}}{dz^m} [(z-a)^m \cdot F(z)]. \quad (31)$$

Контур интегрирования в (30) можно выбрать в виде полуокружности в правой полуплоскости, примыкающей к мнимой оси (рис. 1). Полюса функций $V(z), E(z)$ находятся в левой полуплоскости вследствие устойчивости рассматриваемых ПФ, поэтому внутрь контура попадают только полюса функции $V(-z)$, равные $-s_k$.

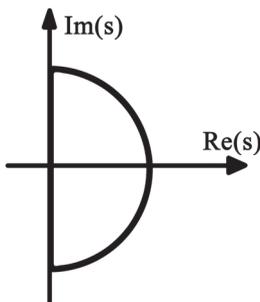


Рис. 1. Контур интегрирования на комплексной плоскости для вычисления интеграла (30)

Полюса функций $V(z), E(z)$ находятся в левой полуплоскости благодаря устойчивости рассматриваемых ПФ, поэтому внутрь контура попадают только полюса функции $V(-z)$, равные $-s_k$. Выбрав

достаточно большой радиус полуокружности на рисунке 1, интегралом по ее дуге можно пренебречь вследствие порядка подынтегральной функции и порядка длины окружности $\sim |s|$. Тогда при оценке (29) учитывать только вычеты в (22), получив окончательное выражение:

$$\langle e \cdot r \rangle = \sum_{k=1}^n \text{Res} E(z_k) \cdot V(-z_k). \quad (32)$$

Следовательно, вычисление скалярного произведения (24) можно реализовать по формуле (31), используя значения функций в точках полюсов текущей дробно-рациональной аппроксимации.

Отметим, что выражение (32) справедливо и применимо также в случае, когда $E(s)$ не является дробно-рациональной функцией.

4. Алгоритмы решения задач аппроксимации. Применение представленных алгоритмов к решению задач (5-9) рассматривается далее в порядке «от простого к сложному».

4.1. Скалярная задача аппроксимации ПФ. Вначале мы представим решение задачи определения числителя ПФ при известном знаменателе (7, 13). В этом случае в (23) отсутствуют члены от знаменателя $b_i \cdot v_i(t)$ (они включаются в функцию $g(t)$), и задача (7) практически совпадает с представленной ранее общей задачей (18) при $c_i = b_i, f_i(t) = v_i(t)$. Задача (13) представляется K независимыми задачами (18) для каждой ПФ.

Задача (5) совпадает с (17), если произвольно задать общую нумерацию всех искомым коэффициентов числителя и знаменателя и присвоить выбранные номера соответствующим коэффициентам и функциям – $a_i, b_i, u_i(t), v_i(t)$.

Задача (6) определяет коэффициенты знаменателя, но произвольная нумерация недопустима, так как искомые коэффициенты должны иметь индексы в пределах текущего значения порядка знаменателя. Поэтому для решения (6) с помощью (14) предложена следующая нумерация коэффициентов и функций на четном и нечетном шагах решения задачи (18):

$$\begin{aligned} c_{2i+1} &= b_i & f_{2i+1} &= v_i \\ c_{2i+2} &= a_{i-1} & f_{2i+2} &= u_{i-1} \end{aligned} \quad (i = 0, 1, \dots, \bar{n}). \quad (33)$$

То есть при решении задачи (18) последовательность шагов в (16, 11) определяется следующим образом:

– операции на нечетном шаге $(2i + 1)$ обеспечивают вычисление очередного i -го коэффициента знаменателя при найденных $(i - 2)$ -х коэффициентах числителя;

– операции на четном шаге $(2i + 2)$ обеспечивают вычисление последнего $(i - 1)$ -го коэффициента числителя при данном знаменателе.

Таким образом, если условие завершения процесса выполнилось на нечетном шаге, то для получения корректного решения задачи (6) нужно сделать еще один шаг в просмотре последовательности (33).

4.2. Решение векторных задач. При анализе векторных задач типа (11, 12) мы будем полагать единичное значение всех весовых коэффициентов из (8) $w_k = 1$. Это предположение не ограничивает общности рассмотрения, так как оно эквивалентно делению всех коэффициентов числителя $\bar{P}^{(k)}(s)$ исходной ПФ на весовой коэффициент w_k .

Рассмотрим использование линейной свертки частных показателей (9), при котором векторные задачи типа (11, 12) решаются обобщением соответствующих скалярных задач.

Линеаризованные отклонения переходных характеристик (23) для k -й ПФ запишутся в виде:

$$\Delta h^{(k)}(t) = \sum_{i=1}^{m^{(k)}} a_i^{(k)} \cdot u_i(t) - \sum_{i=1}^n b_i \cdot v_i(t) - g^{(k)}(t), \quad (34)$$

где $u_i^{(k)}(t)$, $g^{(k)}(t)$ формируются на основе (21), (22) подстановкой вместо $P_{init}(s)$, $Q_{init}(s)$ соответствующих полиномов для начальной аппроксимации k -й ПФ $P_{init}^{(k)}(s)$, $Q_{init}^{(k)}(s)$.

Выражение (34) можно представить в векторной форме как:

$$\Delta h^{(**)}(t) = \sum_{i=1}^{m^{(k)}} a_i^{(k)} \cdot u_i^{(**)}(t) - \sum_{i=1}^n b_i \cdot v_i^{(**)}(t) - g^{(**)}(t). \quad (35)$$

Здесь $v_i^{(**)}$ – вектор, каждая из K компонент которого – это $v_i(t)$. Суммарный показатель (9) с учетом (4) запишется в виде квадрата нормы отклонения вектор-функции $\Delta h^{(**)}$:

$$\Psi^{\text{sum}} = \sum_{k=1}^K \left\| \Delta h^{(k)} \right\|^2 = \left\| \Delta h^{(**)} \right\|^2. \quad (36)$$

То есть, как и в скалярном случае (6), критерий (12) также принимает вид минимума квадратичной нормы ошибки (36), что позволяет совместно с (35) практически полностью использовать скалярные алгоритмы минимизации для задач (11) и (12). При этом скалярное произведение векторов (15) будет иметь обобщенный вид:

$$\langle x^{(\dots)} \cdot y^{(\dots)} \rangle = \sum_{k=1}^K \langle x^{(k)} \cdot y^{(k)} \rangle.$$

Для решения задачи (12) последовательность ортогонализации соответствует (33) с учетом, что после определения очередного коэффициента знаменателя требуется вычисление последнего ($i-1$)-го коэффициента числителя для каждой из всех K ПФ. Соответствующий порядок следования коэффициентов полиномов иллюстрируется следующим выражением:

$$\begin{array}{lll} c_{K'+i+1} = b_{i+1} & f_{K'+i+1} = v_{i+1} & \\ c_{K'+i+2} = a_i^{(1)} & f_{K'+i+2} = u_{i-1}^{(*1)} & (i = 0, 1, \dots) \\ \dots & \dots & (m = 1, 2, \dots, K) \\ c_{K'+i+m'} = a_i^{(m)} & f_{K'+i+m'} = u_{i-1}^{(*m)} & K' = K + 1, \\ \dots & \dots & m' = m + 1 \\ c_{K'+(i+1)} = a_i^{(K)} & f_{K'+(i+1)} = u_{i-1}^{(*K)} & \end{array}.$$

Таким образом, задача (11) с суммарным критерием (9) будет решена.

Более сложными для построения алгоритмов являются векторные задачи с минимаксной сверткой частных показателей оптимизации (10). Рассмотрим проверку оптимальности решения (11) при таком критерии. Для заданной системы назовем ПФ с номером p критической, если ее ошибка максимальна среди всех ПФ:

$$e^{(p)}(a^{(p)}, m^{(p)}, b, n) \geq e(a^{(k)}, m^{(k)}, b, n), k \neq p.$$

Легко показать справедливость следующего условия. Векторная ПФ с общими коэффициентами знаменателя b является решением задачи (11), если:

- критическая ПФ оптимальна в скалярном смысле (5) по коэффициентам числителя и знаменателя;
- остальные ПФ с тем же знаменателем оптимальны по своим коэффициентам числителя (7).

Это условие является достаточным, то есть, его невыполнение не свидетельствует о неоптимальности решения. Но на его основе можно предложить следующий упрощенный алгоритм решения задачи (11):

1. Для каждой ПФ ($i = 1, 2, \dots, K$):

1.1. Решить задачу (5), найти и занести в таблицу 1 коэффициенты знаменателя:

$$b[i] = \underset{b}{\operatorname{argmin}}(e(a, n, b, n)), \quad n = n - 1.$$

1.2. Для каждой ПФ ($j = 1, 2, \dots, K$):

Для найденных коэффициентов знаменателя решить задачу (7), найти и занести в таблицу 2 коэффициенты числителя и результирующую ошибку:

$$a[i, j] = \underset{a}{\operatorname{argmin}}(e(a, n, b[i], n)), e[i, j] = e(a[i, j], n, b[i], n).$$

1.3. В столбце таблицы 2 определить ПФ с максимальной ошибкой, занести в таблицу 3 величину ошибки и номер столбца в таблице 1:

$$J[i] = \underset{j}{\operatorname{argmax}}(e[i, j]), E[i] = e[i, J[i]].$$

2. В таблице 3 определить индекс ПФ с минимальной ошибкой и взять в таблице 1 общие коэффициенты знаменателя для векторной ПФ:

$$I = \underset{i}{\operatorname{argmin}}(E[i]), \mathbf{b} = a[I].$$

Для каждой ПФ ($j = 1, 2, \dots, K$) из найденного столбца таблицы 2:

Взять коэффициенты числителя j -й ПФ из этого столбца:

$$a[j] = a[I, j].$$

Полученное решение $b, a[\dots]$ в общем случае не является оптимальным, однако оно приближено к оптимальному решению. Так или иначе найденное решение можно использовать как начальное приближение при применении методов решения общих квадратичных [28] или минимаксных [29] задач оптимизации. В рамках таких методов на этапе локального поиска могут применяться и другие элементы предложенных подходов.

4.3. Дальнейшее развитие предложенных алгоритмов.

Представляет интерес распространение рассмотренных подходов на линейные динамические системы с задержками. Исходные ПФ таких систем содержат экспоненциальные коэффициенты при дробно-рациональных множителях (рационально-экспоненциальные функции). Поэтому для дробно-рациональной аппроксимации таких ПФ в рамках предложенного подхода необходимо при проведении процесса проектирования (17) корректно вычислять скалярные произведения вида $d_i = \langle g \cdot z_i \rangle$ с оригиналом нерациональной функции $g(t)$. Для этого можно воспользоваться выражением (30), (31), учитывая простоту вычисления полюсов в случае рационально-экспоненциальных функций.

Учитывая, что использование предлагаемых в статье векторных критериев могут приводить к ошибкам и потерям при решении задач управления динамическими системами [30], целесообразно также исследовать другие варианты свертки частных показателей оптимизации.

5. Численные эксперименты. Проверка предложенного подхода выполнялась на основе экспериментальной программы аппроксимации скалярных ПФ. Проанализированы публикации и выбран ряд тестовых задач с известными ПФ для реализации с помощью разработанной программы. Полученные результаты подтвердили практическую эффективность представленных алгоритмов. В качестве тестовых задач использовались практические примеры линейных электронных схем, включающих как активные (усилительные), так и пассивные RLC схемы, которые содержат сопротивления, емкости, индуктивности с различным распределением действительных и комплексно-сопряженных полюсов ПФ. Выполнялось сравнение с известными методами редуцирования. Оценивались такие свойства алгоритма, как сохранение устойчивости схем со сложными частотными ПФ и способность к автоматическому определению порядка модели. В качестве примеров

выбраны линейные электронные схемы, перечисленные в порядке представления результатов:

1. Пассивная RLC схема.
2. RLC эквивалент длинной линии.
3. RC-дерево.
4. Универсальный интегральный операционный усилитель

да741, содержащий активные приборы (транзисторы).

Таблица 1 содержит результаты редуцирования порядка ПФ (по критерию **В**) для тестовых примеров. Для каждого примера указаны в виде m/n порядки числителя (m) и знаменателя (n) его исходной ПФ. Далее в строке приведены характеристики полученной редуцированной ПФ при задании различных значений допустимой погрешности (вторая строка сверху): порядки числителя/знаменателя и величина погрешности в процентах от величины допуска. Видно, что полученная погрешность находится в пределах 6-90% от величины допуска, что свидетельствует о состоятельности алгоритма.

Таблица 1. Характеристики редуцированных ПФ

№ п/п	Исходная ПФ	Значения относительного допуска:							
		10^{-1}		10^{-3}		10^{-5}		10^{-7}	
		m/n	%	m/n	%	m/n	%	m/n	%
1	4/12	3/3	70	2/8	30	4/8	3	6/10	6
2	6/10	0/1	30	1/7	40	2/8	10	4/10	20
3	0/17	1/2	20	3/3	90	3/5	50	4/6	40
4	0/22	0/1	90	1/3	50	2/3	70	3/3	40

Для примеров 1-3 на рисунках 2-6 приведены графики с результатами моделирования в частотной (модуль ПФ) и временной (переходные характеристики) областях. На каждом рисунке показаны две кривые: исходной (1) и аппроксимированной (2) ПФ при относительном допуске 0,1. Выводились также графики при относительном допуске 10^{-7} , но они при выбранном масштабе неотличимы от графиков исходной ПФ. Из рисунков 2, 3, 5 видно, что достаточно грубая аппроксимация (10%) приводит к сглаживанию колебательного характера переходных характеристик исходной ПФ.

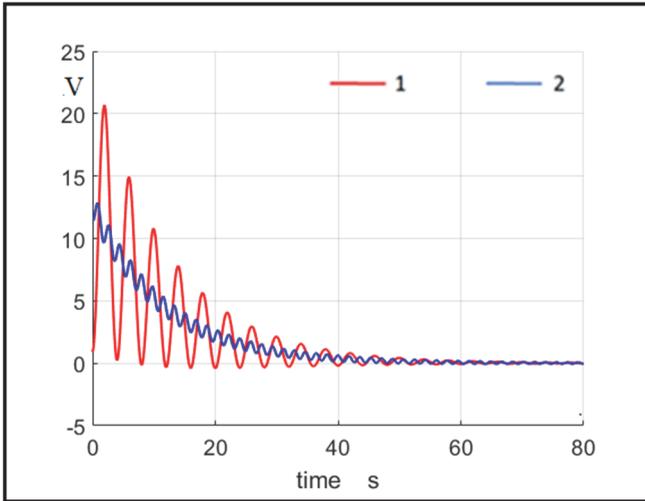


Рис. 2. Переходные характеристики для примера 1

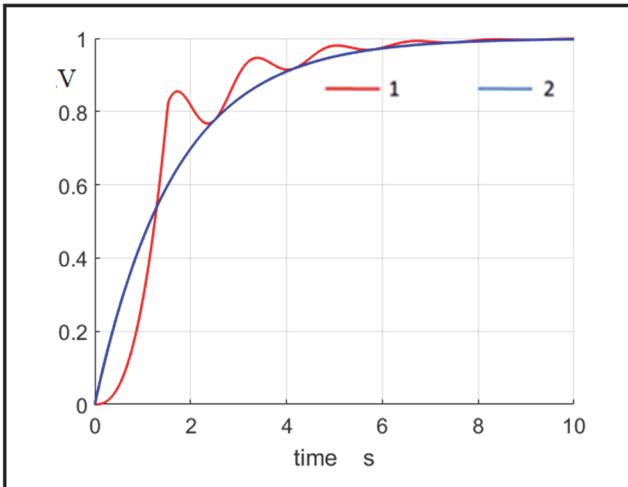


Рис. 3. Переходные характеристики для примера 2

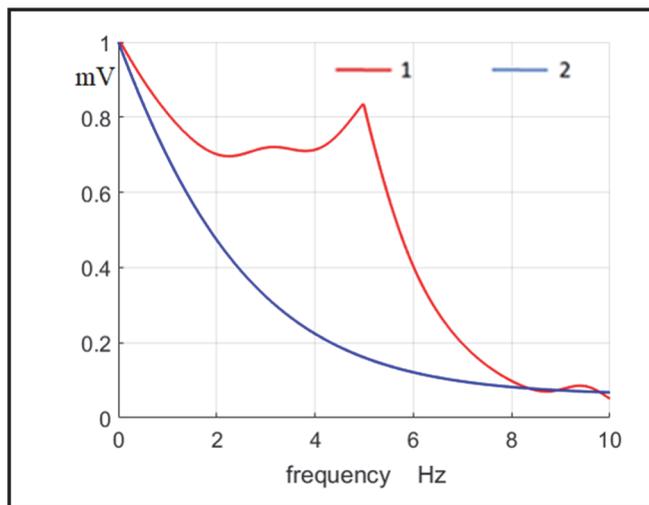


Рис. 4. Частотные ПФ для примера 2

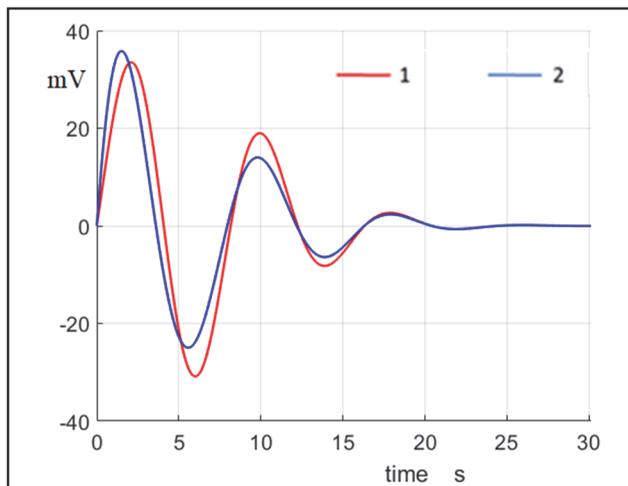


Рис. 5. Переходные характеристики для примера 3

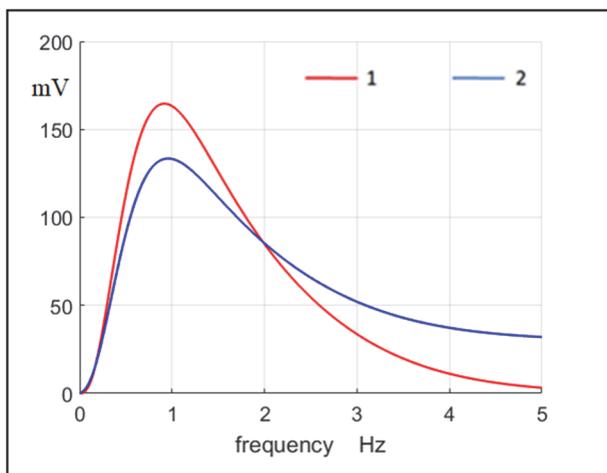


Рис. 6. Частотные ПФ для примера 3

6. Заключение. Предложен подход к задаче понижения порядка дробно-рациональной передаточной функции динамической системы, разработаны алгоритмы его реализации.

Для оценки близости исходной и аппроксимированной ПФ предложено отказаться от суммарной оценки их отклонений в заранее определенном множестве дискретных точек, а использовать интегральную норму отклонений переходных характеристик этих ПФ на временной полуоси. Такой подход позволяет отказаться от предварительного задания множества узловых точек и исключить ошибки, связанные с отсутствием или недостаточным количеством точек вблизи важных полюсов ПФ.

При постановке оптимизационных задач определения параметров аппроксимации в качестве основной задачи рассматривается минимизация порядка ПФ при заданном допуске на погрешность аппроксимации. Такая постановка, в отличие от традиционной минимизации погрешности, соответствует задачам автоматического определения порядка аппроксимированной модели с минимальной избыточностью.

Квадратичный вид нормы ошибки позволяет ориентироваться на применение МНК для решения оптимизационной задачи. Учитывая нелинейную зависимость ПФ от коэффициентов знаменателя, предложено использование итерационного процесса Гаусса – Ньютона.

На каждом шаге процесса производится линеаризация отклонения переходных характеристик ПФ и решается квадратичная задача с помощью МНК в функциональном пространстве. Получены выражения для расчета коэффициентов линеаризованных зависимостей.

Предложен способ реализации МНК на основе ортогонализации Грама – Шмидта для минимизации длины вектора параметров при заданной норме ошибки. При ортогонализации используются полученные выражения для расчета скалярных произведений по вычетам ПФ в лапласовской области.

Определена последовательность шагов ортогонализации, соответствующих вычислению коэффициентов числителя и знаменателя ПФ для корректного решения задачи минимизации порядка ПФ.

Предложено обобщение разработанного скалярного алгоритма на случай векторной ПФ для моделей многопортовых систем при оценке погрешности векторной аппроксимации как взвешенной суммы погрешностей для всех ПФ.

Рассмотрена возможность использования минимаксной оценки погрешности векторной ПФ. Дано достаточное условие оптимальности, проверяемое на основе предложенного подхода, и представлен простейший алгоритм решения задачи на его основе. Показано, что разработка подробного алгоритма требует использования методов квадратичного программирования.

Были проведены численные расчеты на тестовых примерах различных типов, которые подтвердили применимость предложенного подхода и его вычислительную эффективность.

Основным ограничением предложенного подхода и алгоритмов, разработанных на его основе, является их неприменимость к системам с распределенными параметрами и к системам с нелинейными блоками.

Следующие разработки будут посвящены распространению подхода на линейные динамические системы с запаздываниями, ПФ которых содержат экспоненциальные коэффициенты при дробно-рациональных множителях.

Литература

1. *Benner P., Cohen A, Ohlberger M., Willcox K.* Model reduction and approximation: theory and algorithms // *Computational Science and Engineering*. 2017. vol. 15. 412 p.
2. *Воронов А.А.* Введение в динамику сложных управляемых систем // М.: Наука. 1985. 351 с.
3. *Ким Д.П.* Теория автоматического управления. Многомерные, нелинейные, оптимальные и адаптивные системы // М. Физматлит. 2016. Т. 2. 441 с.
4. *Antoulas A.C. et al.* Model Order Reduction: Methods, Concepts and Properties // *Coupled Multiscale Simulation and Optimization in Nanoelectronics*. 2015. pp. 159–265.

5. *Vishwakarma C.B., Prasad R.* Time domain model order reductions using Hankel Matrix Approach // Journal of Franklin Institute. 2014. vol. 351. pp. 3445–3456.
6. *Alsmadi O.M.K., Abo-Hammour Z.S.* Substructure Preservation Model Order Reduction with Power System Model Investigation // Wulfenia journal. 2015. vol. 22(3). pp. 44–55.
7. *Harutyunyan D. et al.* Advanced Topics in Model Order Reduction // Coupled Multiscale Simulation and Optimization in Nanoelectronics. 2015. pp. 361–432.
8. *Benner P., Hinze M., ter Maten E.J.W.* Model Reduction for Circuit Simulation // Lecture Notes in Electrical Engineering. 2011. vol. 74. 317 p.
9. *Hochman A. et al.* Reduced order models for electromagnetics // IEEE Transactions Antennas and Propagation. 2014. vol. 62. no. 6. pp. 3150–3162.
10. *Romano D., Antonini G., Grossner U., Kovacevic-Badstuebner I.F.* Circuit synthesis techniques of rational models of electromagnetic systems: A tutorial paper // International Journal of Numerical Modelling Electronic Networks Devices and Fields. 2019. vol. 32. no. 5. pp. e2612.
11. *Benner P., Gugercin S., Willcox K.* A Survey of Projection-Based Model Reduction Methods for Parametric Dynamical Systems // SIAM Review. 2015. vol. 57. no. 4. pp. 483–531.
12. *Bai Z.* Krylov subspace techniques for reduced-order modeling of large-scale dynamical systems // Applied Numerical Mathematics. 2002. vol. 43. no. 1-2. pp. 9–44.
13. *Heres P.J., Schilders W.H.A.* Orthogonalisation in Krylov subspace methods for model order reduction // Scientific Computing in Electrical Engineering. 2006. vol. 9. pp. 39–43.
14. *Zimmerling J., Druskin V., Zaslavsky M., Remis R.F.* Model-order reduction of electromagnetic fields in open domains // Geophysics. 2018. vol. 83(2). pp. WB61-WB70.
15. *Rusakov S.G., Gourary M.M., Ulyanov S.L., Zharov M.M.* The Concept of Redundancy for Techniques of Model Order Reduction in Circuit Simulation // International Conference “Mathematical and Informational Technologies” (MIT-2013). 2014. pp. 260–266.
16. *Phillips J.R., Silveira L.M.* Poor Man’s TBR: a simple model reduction scheme // IEEE Transactions on Computer-aided Design. 2005. vol. 24. no. 1. pp. 43–55.
17. *Гурпуй М.М., Жаров М.М., Русаков С.Г., Ульянов С.И.* Редукция модели электрической схемы с учетом характеристик внешних цепей // Информационные технологии. 2018. Т. 24. № 9. С. 563–572.
18. *Bañuelos-Cabral E.S., Gutiérrez-Robles J.A., Gustavsen B.* Rational Fitting Techniques for the Modeling of Electric Power Components and Systems Using MATLAB environment // Rational Fitting Techniques for the Modeling of Electric Power Components and Systems Using MATLAB Environment. 2017. pp. 1–46.
19. *Coelho C.P., Phillips J.R., Silveira L.M.* Robust raional function approximation algorithm for model generation // Proceedings of the 36th annual ACM/IEEE Design Automation Conference. 1999. pp. 207–212.
20. *Knockaert L., Ferranti F., Dhaene T.* Vector Fitting vs. Levenberg-Marquardt: Some experiments // 2009 IEEE Workshop on Signal Propagation on Interconnects (SPI). 2009. pp. 1–4.
21. *Singh R., Chatterjee K., Singh J.* A Mixed Approach for Approximation of Higher Order Linear Time Invariant Systems // International Journal of Engineering & Technology. 2018. vol. 7. no. 4.39. pp. 375–380.
22. *Singh J., Chatterjee K., Vishwakarma C.B.* Model order reduction using eigen algorithm // International Journal of Engineering, Science and Technology. 2015. vol. 7. no. 3. pp. 17–23.

23. Rao P.S., Prasad R. Stable Mixed Reduced Order Models for Linear Dynamic Systems and their Qualitative Comparison // 2016 IEEE 1st International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES). 2016. pp. 1–4.
24. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования. М.: Наука. 1966. 752 с.
25. Голуб Д., Ван Л.Ч. Матричные вычисления // М.: Мир. 1999. 548 с
26. Крянев А.В., Лукин Г.В., Давид У. Метрический анализ и обработка данных // М.: Физматлит. 2012. 280 с.
27. Плескунов М.А., Короткий А.И. Операционное исчисление. Учебное пособие для вузов // М.: Юрайт. 2018. 141 с.
28. Галеев Э.М. Оптимизация. Теория, примеры, задачи. Учебное пособие // М.: Ленанд. 2018. 344 с.
29. Гурарий М.М., Жаров М.М., Русаков С.Г., Ульянов С.Л. Минимаксная оптимизация в задачах схемотехнического проектирования // Информационные технологии. 2018. Т. 24. № 7. С. 435–444.
30. Грешилов А.А. Математические методы принятия решений // М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2016. 584 с.

Гурарий Марк Моисеевич — канд. техн. наук, старший научный сотрудник, Отдел систем автоматизированного проектирования интегральных схем (Отдел САПР), Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем проектирования в микроэлектронике Российской академии наук (ИППМ РАН). Область научных интересов: электронные схемы, система дифференциально-алгебраических уравнений, вычислительные алгоритмы. Число научных публикаций — 40. gourary@yandex.ru; ул. Советская, 3, 124365, Москва, Зеленоград, Россия; р.т.: +7(499)1353383.

Русakov Сергей Григорьевич — д-р техн. наук, профессор, член-корреспондент РАН, главный научный сотрудник - советник научного руководителя, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем проектирования в микроэлектронике Российской академии наук (ИППМ РАН). Область научных интересов: математическое моделирование, вычислительные методы моделирования электрических характеристик, САПР СБИС, автоматизация схемотехнического проектирования, методы редукции математических моделей. Число научных публикаций — 144. rusakov@iprm.ru; ул. Советская, 3, 124365, Москва, Зеленоград, Россия; р.т.: +7(499)1353383.

Жаров Михаил Михайлович — канд. техн. наук, старший научный сотрудник, отдел систем автоматизированного проектирования интегральных схем (Отдел САПР), Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем проектирования в микроэлектронике Российской академии наук (ИППМ РАН). Область научных интересов: многопортовые линейные динамические системы, модальная редукция, отношение Релея. Число научных публикаций — 35. zagov@iprm.ru; ул. Советская, 3, 124365, Москва, Зеленоград, Россия; р.т.: +7(499)1353383.

Ульянов Сергей Леонидович — д-р техн. наук, главный научный сотрудник, отдел систем автоматизированного проектирования интегральных схем (Отдел САПР), Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем проектирования в микроэлектронике Российской академии наук (ИППМ РАН). Область научных интересов: схемотехническое моделирование, автоматизация проектирования, математические модели полупроводниковых приборов. Число научных публикаций — 80. ulyas@iprm.ru; ул. Советская, 3, 124365, Москва, Зеленоград, Россия; р.т.: +7(499)1353383.

M. GOURARY, S. RUSAKOV, M. ZAROV, S. ULYANOV
**COMPUTATIONAL ALGORITHMS FOR REDUCING RATIONAL
TRANSFER FUNCTIONS' ORDER**

Gourary M., Rusakov S., Zarov M., Ulyanov S. **Computational Algorithms for Reducing Rational Transfer Functions' Order.**

Abstract. A problem of reducing a linear time-invariant dynamic system is considered as a problem of approximating its initial rational transfer function with a similar function of a lower order. The initial transfer function is also assumed to be rational. The approximation error is defined as the standard integral deviation of the transient characteristics of the initial and reduced transfer function in the time domain. The formulations of two main types of approximation problems are considered: a) the traditional problem of minimizing the approximation error at a given order of the reduced model; b) the proposed problem of minimizing the order of the model at a given tolerance on the approximation error.

Algorithms for solving approximation problems based on the Gauss-Newton iterative process are developed. At the iteration step, the current deviation of the transient characteristics is linearized with respect to the coefficients of the denominator of the reduced transfer function. Linearized deviations are used to obtain new values of the transfer function coefficients using the least-squares method in a functional space based on Gram-Schmidt orthogonalization. The general form of expressions representing linearized deviations of transient characteristics is obtained.

To solve the problem of minimizing the order of the transfer function in the framework of the least squares algorithm, the Gram-Schmidt process is also used. The completion criterion of the process is to achieve a given error tolerance. It is shown that the sequence of process steps corresponding to the alternation of coefficients of polynomials of the numerator and denominator of the transfer function provides the minimum order of transfer function.

The paper presents an extension of the developed algorithms to the case of a vector transfer function with a common denominator. An algorithm is presented with the approximation error defined in the form of a geometric sum of scalar errors. The use of the minimax form for error estimation and the possibility of extending the proposed approach to the problem of reducing the irrational initial transfer function are discussed.

Experimental code implementing the proposed algorithms is developed, and the results of numerical evaluations of test examples of various types are obtained.

Keywords: Linear Systems, Model Reduction, Transfer Function, Rational Approximation.

Gourary Mark — Ph.D., Senior Researcher, Department of Computer-Aided IC Design (The CAD Department), Federal State-Funded Institution of Science Institute for Design Problems in Microelectronics of Russian Academy of Sciences (IPPM RAS). Research interests: electronic circuits, periodic modes, oscillators, systems of differential-algebraic equations, computational algorithms. The number of publications — 40. gourary@yandex.ru; 3, Sovetskaya str., 124365, Moscow, Zelenograd, Russia; office phone: +7(499)1353383.

Rusakov Sergey — Ph.D., Dr.Sci., Professor, Corresponding Member of RAS, Chief Researcher, Federal State-Funded Institution of Science Institute for Design Problems in Microelectronics of Russian Academy of Sciences (IPPM RAS). Research interests: mathematical modeling, computational methods for modeling characteristics, CAD VLSI, automation circuit design, methods for reducing mathematical models. The number of

publications — 144. rusakov@ippm.ru; 3, Sovetskaya str., 124365, Moscow, Zelenograd, Russia; office phone: +7(499)1353383.

Zharov Mikhail — Ph.D., Senior Researcher, Department of Computer-Aided IC Design (The CAD Department), Federal State-Funded Institution of Science Institute for Design Problems in Microelectronics of Russian Academy of Sciences (IPPM RAS). Research interests: multiport linear dynamic systems, modal reduction, Rayleigh relation. The number of publications — 35. zarov@ippm.ru; 3, Sovetskaya str., 124365, Moscow, Zelenograd, Russia; office phone: +7(499)1353383.

Ulyanov Sergey — Ph.D., Dr.Sci., Chief Researcher, Department of Computer-Aided IC Design (The CAD Department), Federal State-Funded Institution of Science Institute for Design Problems in Microelectronics of Russian Academy of Sciences (IPPM RAS). Research interests: circuit simulation, design automation, mathematical models of semiconductor devices. The number of publications — 80. ulyas@ippm.ru; 3, Sovetskaya str., 124365, Moscow, Zelenograd, Russia; office phone: +7(499)1353383.

References

1. Benner P., Cohen A, Ohlberger M., Willcox K. Model reduction and approximation: theory and algorithms. Computational Science and Engineering. 2017. vol. 15. 412 p.
2. Voronov A.A. *Vvedenie v dinamiku slozhnykh upravlyaemykh sistem* [Introduction to the Dynamics of Complex Controlled Systems]. M. : Nauka. 1966. 351p. (In Russ.).
3. Kim D.P. *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya. Mnogomernye, nelinejnye, optimal'nye i adaptivnye sistemy* [Theory of automatic control. Multidimensional, nonlinear, optimal and adaptive systems]. M.: Fizmatlit. 2016. vol. 2. 441 p. (In Russ.).
4. Antoulas A.C. et al. Model Order Reduction: Methods, Concepts and Properties. Coupled Multiscale Simulation and Optimization in Nanoelectronics. 2015. pp. 159–265.
5. Vishwakarma C.B., Prasad R. Time domain model order reductions using Hankel Matrix Approach. *Journal of Franklin Institute*. 2014. vol. 351. pp. 3445–3456.
6. Alsmadi O.M.K., Abo-Hammour Z.S. Substructure Preservation Model Order Reduction with Power System Model Investigation. *Wulfenia journal*. 2015. vol. 22(3). pp. 44–55.
7. Harutyunyan D. et al. Advanced Topics in Model Order Reduction. Coupled Multiscale Simulation and Optimization in Nanoelectronics. 2015. pp. 361–432.
8. Benner P., Hinze M., ter Maten E.J.W. Model Reduction for Circuit Simulation. Lecture Notes in Electrical Engineering. 2011. vol. 74. 317 p.
9. Hochman A. et al. Reduced order models for electromagnetics. *IEEE Transactions Antennas and Propagation*. 2014. vol. 62. no. 6. pp. 3150–3162.
10. Romano D., Antonini G., Grossner U., Kovacevic-Badstuebner I.F. Circuit synthesis techniques of rational models of electromagnetic systems: A tutorial paper. *International Journal of Numerical Modelling Electronic Networks Devices and Fields*. 2019. vol. 32. no. 5. pp. e2612.
11. Benner P., Gugercin S., Willcox K. A Survey of Projection-Based Model Reduction Methods for Parametric Dynamical Systems. *SIAM Review*. 2015. vol. 57. no. 4. pp. 483–531.
12. Bai Z. Krylov subspace techniques for reduced-order modeling of large-scale dynamical systems. *Applied Numerical Mathematics*. 2002. vol. 43. no. 1-2. pp. 9–44.
13. Heres P.J., Schilders W.H.A. Orthogonalisation in Krylov subspace methods for model order reduction. Scientific Computing in Electrical Engineering. 2006. vol. 9. pp. 39–43.

14. Zimmerling J., Druskin V., Zaslavsky M., Remis R.F. Model-order reduction of electromagnetic fields in open domains. *Geophysics*. 2018. vol. 83(2). pp. WB61-WB70.
15. Rusakov S.G., Gourary M.M., Ulyanov S.L., Zharov M.M. The Concept of Redundancy for Techniques of Model Order Reduction in Circuit Simulation. International Conference “Mathematical and Informational Technologies” (MIT-2013). 2014. pp. 260–266.
16. Phillips J.R., Silveira L.M. Poor Man’s TBR: a simple model reduction scheme. *IEEE Transactions on Computer-aided Design*. 2005. vol. 24. no. 1. pp. 43–55.
17. Gourary M.M., Zharov M.M., Rusakov S.G., Ulyanov S.L. [Model Order Reduction of Electrical Circuits Taking Account of External Networks Characteristics]. *Informacionnye tekhnologii – Information Technology*. 2018. Issue 24. vol. 9. pp. 563–572. (In Russ.).
18. Bañuelos-Cabral E.S., Gutiérrez-Robles J.A., Gustavsen B. Rational Fitting Techniques for the Modeling of Electric Power Components and Systems Using MATLAB environment. Rational Fitting Techniques for the Modeling of Electric Power Components and Systems Using MATLAB Environment. 2017. pp. 1–46.
19. Coelho C.P., Phillips J.R., Silveira L.M. Robust raional function approximation algorithm for model generation. Proceedings of the 36th annual ACM/IEEE Design Automation Conference. 1999. pp. 207–212.
20. Knockaert L., Ferranti F., Dhaene T. Vector Fitting vs. Levenberg-Marquardt: Some experiments. 2009 IEEE Workshop on Signal Propagation on Interconnects (SPI). 2009. pp. 1–4.
21. Singh R., Chatterjee K., Singh J. A Mixed Approach for Approximation of Higher Order Linear Time Invariant Systems // *International Journal of Engineering & Technology*. 2018. vol. 7. no. 4.39. pp. 375–380.
22. Singh J., Chatterjee K., Vishwakarma C.B. Model order reduction using eigen algorithm. *International Journal of Engineering, Science and Technology*. 2015. vol. 7. no. 3. pp. 17–23.
23. Rao P.S., Prasad R. Stable Mixed Reduced Order Models for Linear Dynamic Systems and their Qualitative Comparison. 2016 IEEE 1st International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES). 2016. pp. 1–4.
24. Besekerskiy V.A., Popov E.P. *Teoriya sistem avtomaticheskogo regulirovaniya*. [Theory of Automatic Control Systems]. M.: Nauka. 1966. 752 p. (In Russ.).
25. Golub G., Van L.Ch. *Matrichnye vychisleniya* [Matrix Computations]. M.: Mir. 1999. 548 p. (In Russ.).
26. Krjanev A.V., Lukin G.V., David U. *Metricheskij analiz i obrabotka danyh* [Metric analysis and data processing]. M.: Fizmatlit. 2012. 280 p. (In Russ.).
27. Pleskunov M.A., Korotkiy A.I. *Operacionnoe ischislenie. Uchebnoe posobie dlya vuzov*. [Operational calculus. Textbook for universities]. M.: Yurajt. 2018. 141p. (In Russ.).
28. Galeev E.M. *Optimizaciya. Teoriya, primery, zadachi. Uchebnoe posobie*. [Optimization. Theory, examples, tasks. Textbook]. M.: Lenand. 2018. 344p. (In Russ.).
29. Gourary M.M., Zharov M.M., Rusakov S.G., Ulyanov S.L. [Minimax Optimization in Circuit Design Problems]. *Informacionnye tekhnologii – Information Technology*. 2018. Issue 24. vol. 7. pp. 435–444. (In Russ.).
30. Greshilov A.A. *Matematicheskie metody prinyatiya reshenij* [Mathematical Decision-Making Methods]. M.: MGTU im. N.E. Baumana. 2016. 584 p. (In Russ.).

G. TSOICHEV, R. YOSHINOV, N. ZHUKOVA
**SOME SECURITY ISSUES WITH THE INDUSTRIAL INTERNET
OF THINGS AND COMPARISON TO SCADA SYSTEMS**

Tsoichev G., Yoshinov R., Zhukova N. Some Security Issues with the Industrial Internet of Things and Comparison to SCADA Systems.

Abstract. An issue of the Internet of Things security which does not belong to the traditional problem of cybersecurity, as it is a local or distributed monitoring and/or monitoring of physical systems state connected via the Internet, is considered. An architecture of Supervisory Control and Data Acquisition system (SCADA) was considered in previous authors studies. Due to SCADA systems implementation, vulnerabilities and various options of cyberattacks on them were analyzed. As an example, a case study based on trees was considered, and the obtained results were summarized and visualized.

The purpose of the paper is to compare new industrial technology of the Internet of things (Industrial Internet of Things) with the previously studied traditional SCADA systems.

The Industrial Internet of Things is a network of devices which are connected through communication technologies. Some of the most common security issues for the Industrial Internet of Things are presented in this paper.

A brief overview of the structure of the Industrial Internet of things is presented, basic principles of security and the main problems that can arise with devices of the Internet of things are described. Based on research and analysis of the risk of threats in the field of the Industrial Internet of things, a specific case of destructive impact based on a tree analysis is considered as the main approach. A description of an attack tree leaf node value creation and an analysis of results are provided. Analysis of the electronic record change scenario to increase the infusion rate of an overflow pump using a complexity index is performed. The consequences compared to a previous study of SCADA systems are analyzed, and respective conclusion is made.

Keywords: Internet of Things, Industrial Systems, Scada, Attack Tree, Cyber Security, Network and Information Security.

1. Introduction. In modern society, information and communication technologies have penetrated deeply and have become the basis of all activities in the economy, administration, society and privacy. Digital infrastructures are turning from a supportive environment into a major and critical factor for the management and proper functioning of all resources and systems [1].

The so-called digital transformation of the industry has emerged in the overall development of the digital society [2] in recent years, which is the result of the increasing penetration of the Internet of Things (IoT), robotics, 3D printing, cloud solutions, and artificial intelligence-based cognitive technologies. All these technologies form the so-called Industry 4.0, driven not only by design and production, but also by its relationship with the market and consumers.

Industrial technologies are among the top 5 priority areas in the EU's 2020 development strategy.

According to the Concept for Digital Transformation of Bulgarian Industry: Industry 4.0 [3] is a collection of related digital technological solutions that support the development of automation, integration and real-time data exchange in production processes. In essence, this reflects an industrial and technological transformation process that naturally follows the development of scientific and production practices. The fourth industrial transformation is a natural extension of the digitization and automation of production and includes Internet connectivity and interaction of cyber-physical systems without human involvement, processing and analysis of large information arrays, and decision making from artificial intelligence, digital modeling and simulation of production processes through virtual reality, smart automation, mass production of individualized products, the emergence of new technologies, the creation of new businesses divisible.

The future of industrial automation is evolving in such a way that robots replace humans. In the course of Industry 4.0 revolution, a new term for technological automation of processes, the Industrial Internet of Things, was introduced.

A previous study looked at the nature of the supervisory control and data acquisition (SCADA) system [4]. Through the introduction of Scada systems, vulnerabilities and various options for attacking it were analyzed. A case study based on trees was considered as an example and the results were summarized and visualized. The effects were analyzed and a conclusion was reached.

This article is intended to make a comparison with the new Industrial Internet of Things technology and to compare the results obtained with a previous study on traditional SCADA systems.

2. IoT – Definition protocols, architecture and standards. IoT is a set of technologies and applications that make devices capable of generating any kind of information, connecting these devices for instant data analysis and ideally for "smart" action (Fig. 1) [5]. Conceptually, IoT means that physical entities can use protocols to send information about their status, position, or other data.

The whole end-to-end communication of the IoT consists of three main components: embedded devices, gateways and end applications. Embedded devices connect to their local gateway through protocols such as 6LoWPAN, ZigBee, ZWave, Thread, Bluetooth and Bluetooth LE, WiFi and WirelessHART, etc. There are also a number of remote IoT protocols such as LoRaWAN, NB-IoT, etc. Sector home automation The Home Network Automation Protocol (HNAP) is adopted by many vendors as the preferred protocol for device management. The protocol was originally patented by Pure Networks, but is now owned and developed by Cisco. At the low

power level of the application, Constrained Application Protocol (CoAP) is an IETF protocol designed for RESTful applications and uses HTTP semantics (and transmitted via HTTP a wider network) but with a much smaller footprint and binary, not text, exchange. CoAP is intended for use over UDP. MQTT, The Message Queue Telemetry Transport, is an alternative to CoAP and is deployed as a protocol for publishing messages on wireless sensor networks.

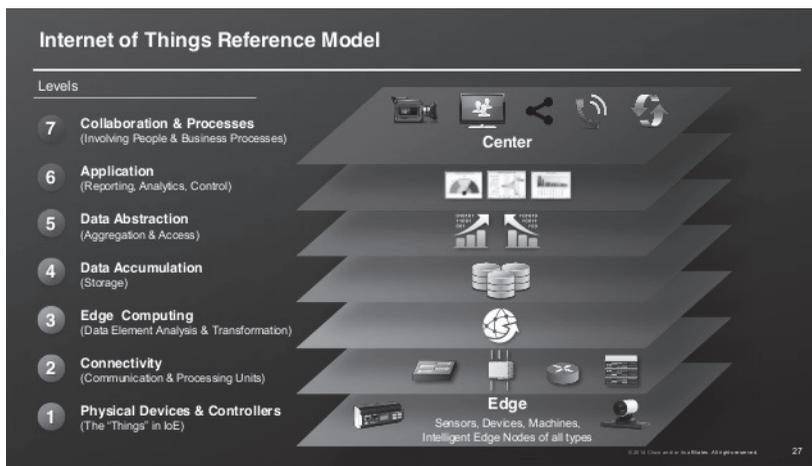


Fig. 1. Internet of Things illustration [6]

The DNS Multiple Transmission Service (mDNS) is often used by IoT devices to detect hostnames to IP addresses within small networks that do not include a local name server. The development of Internet interoperability standards known as Hypercat is encouraged. This standard is intended to improve data discoverability and interoperability and to enable device catalogs and capabilities to be published as web storage for connected metadata devices. This is currently one of the preferred interoperability options. As with any new technology, there are many protocols and standards that are tested and offered for inclusion in IoT, they will form part of the detailed IoT reference structure. They will probably be supported in a timely manner by case-specific implementation profiles. The IoT security architecture is part of the broader IoT reference architecture. It starts with business results and stems from the security and control requirements that can be followed for those results. Given the widespread adoption of IoT, specific arguments for on-demand security architecture will be developed using standard building blocks. The nature of IoT technology (Fig. 2) will place unusual requirements on architecture such as low power algorithms, cryptographic algorithms and low latency communications [7]. Identity and

access management is another challenge that requires quite different solutions to traditional corporate understandings. Secure interoperability will lead to the need for security standardization and account standardization.

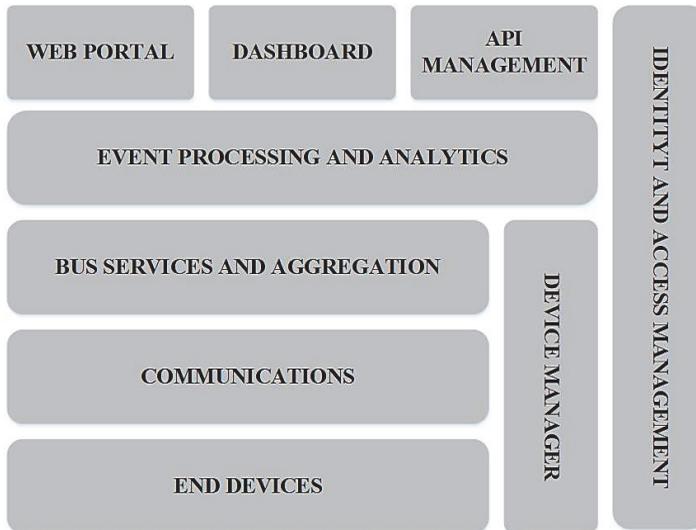


Fig. 2. Architecture of IoT

3. IoT Security and privacy. A key part of the growing interconnectivity response is to ensure that the systems provided are available on request and can be trusted to protect the user's privacy. Given the commodity nature of many IoT devices and the implications of security and privacy, a stable framework of trust is required that is incorporated into product design [2]. The approach should be based on an open and integrated business model, an IT oriented architecture, and a user oriented trust model.

Data needs to be more open and interconnected, but privacy and security must be at the heart of how it is stored and used. In particular, data centralization and reconciliation can be met with suspicion on the part of users and must be managed with care. There is a set of devices that require identity; they totally have a different model of trust [8]. Identity is a complex and deeply personal concept with individuals with multiple overlapping identities, each with different rights and permissions. Some identities must be kept separate and some must be consolidated. Therefore, it must be considered on a case-by-case basis whether the identities are kept separate or united, subject to the requirements set out in the Personal Data Protection Act and all other applicable laws. New ways of introducing identity protection mechanisms (passwords, PINs, digital signatures) have in practice become barriers to the de-

ployment of digital services. Traditional IT systems implement security based on 25 years of security control standards that are difficult to relate to current cyber security requirements; they are quite inadequate to use as a basis for security and trust in IoT. The use of enterprise security controls is not well-functioning in the industrial control systems sector, where the requirement for continuous operation is incompatible with routine updating and restarting. In the same way, it is unlikely that a home light bulb will constantly check for updates, apply updates, and monitor cyber-attacks [9]. The evolution of IoT requires an approach to security and privacy that is flexible and supports unforeseen changes across a wide range of completely different technologies and applications. It requires an approach that recognizes the global ecosystem, made up of different sectors, using common solutions developed independently, in accordance with a common set of principles, but introducing a sector-specific interpretation of security. A common basis for this could be a data layer security application. An end-to-end security model between a device and an application that has reliable data analysis can be considered as part of the solution. Identity management needs to be developed as carefully as security.

4. IoT Resilience. As all sectors of government, industry, and society reap the benefits that can be realized through IoT, so is the dependency on real-time connectivity. This means that networks must not only become resilient [10], but must also strive for security to allow continued operation in the event of a cyber-attack. Internet connection communications offer some new challenges with the use of ultra-low power protocols and algorithms. While some research has been done to ensure security, resilience is an embryonic discipline that urgently needs a lot of attention.

4.1. Cybersecurity vs. IoT and cyber-physical security. The Internet of Things security is not traditional cybersecurity, but a merger of cybersecurity with other engineering disciplines. It addresses much more than just data, servers, network infrastructures and information security [8]. Rather, it involves the direct or distributed monitoring and / or control of the condition of physical systems connected via the Internet. In other words, what distinguishes IoT from cybersecurity is called "cyber-physical systems" [11]. Cybersecurity does not usually address the physical security aspects of a hardware device or the interactions in the physical world that it may have. Digital control of physical processes on networks makes unifying IoT, since security is not limited to the principles of providing basic information in terms of confidentiality, integrity, etc., but also of physical resources and machines that originate and receive information in the physical world. In other words, IoT has many real analog and physical elements.

IoT devices are physical systems, many of which are safety related. Therefore, the compromise of such devices can lead to physical damage to

persons and property, even death. Therefore, the object of IoT security is not to apply a single, static set of meta-security rules, as they apply to network devices and hosts. This requires a unique application for each system and system of systems in which Internet devices are involved. IoT devices have many different options, but an IoT collective device has almost all of the following features:

- Manipulates or monitors something physical (in the device or in the middle or middle of the device), the job itself or the direct connection to something;

- Ability to communicate directly or indirectly via the Internet.

Knowing these two properties, any physical system can be an IoT device because everything physical can be connected to the Internet with appropriate electronic interfaces. IoT device security (Fig. 3) is a function of device usage, physical process, or the state affected by or controlled by the device, and the sensitivity of the systems to which the device connects.

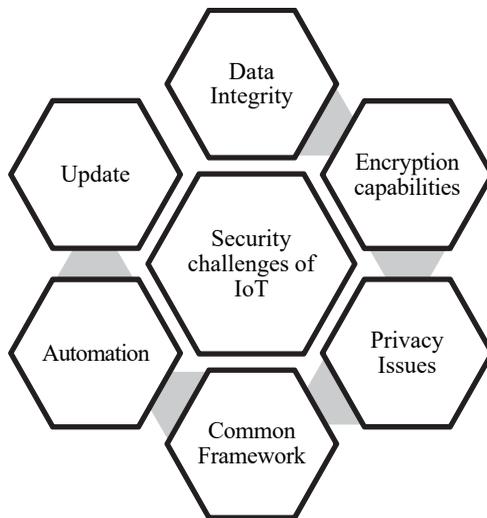


Fig. 3. Cybersecurity of IoT

5. IoT Security Principles. Security has traditionally been considered in terms of confidentiality, availability and integrity. There is no best internet security design. There are many different IoT devices and security needs to be considered in the context of how the device will be used. The device itself will not provide complete security; it must be supported by good end-to-end architecture. While the business requirements are best de-

signed for each use case, the IoT Security Foundation has identified a number of IoT security principles [12]:

- Establishing Principles for Internet of Things Security
- Does the data need to be trusted?
- Is the safe and/or timely arrival of data important?
- Is it necessary to restrict access to or control of the device?
- Is it necessary to update the software on the device?
- Will ownership of the device need to be managed or transferred

in a secure manner?

- Does the data need to be audited?

They are grouped into three areas (Fig. 4).

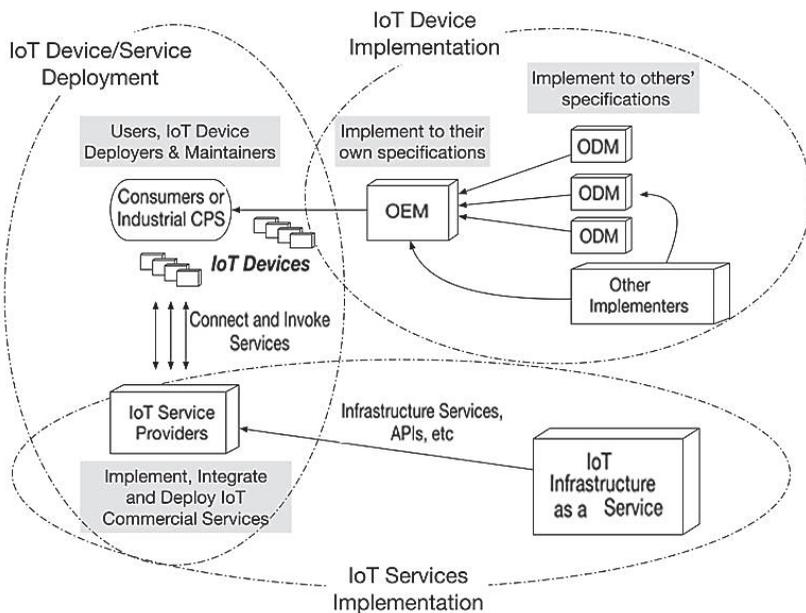


Fig. 4. Connections between IoT devices

5.1. Application layer. CoAP uses Datagram Transport-Layer Security (DTLS) to secure messages in CoAP – a TLS variant that can take on the unreliable nature of UDP communications. It has a small number of compulsory configurations identified as suitable for restricted environments. This provides support for confidentiality, authentication, integrity, denial and protection against repressive attacks. CoAP has four security modes for key management: NoSec, PreSharedKey, RawPublicKey and Certificates.

The DTLS connection for authentication and key consent has a significant impact on the resources of restricted devices, especially the requirement for encryption with an elliptical curve. Studies in DTLS optimization continue in the middle of the Internet of Things and incorporate elliptical curve cryptography into hardware.

5.2. IoT communication. In most cases, an IoT device communicates with a gateway, which in turn communicates with a controller or web service (Fig. 5).

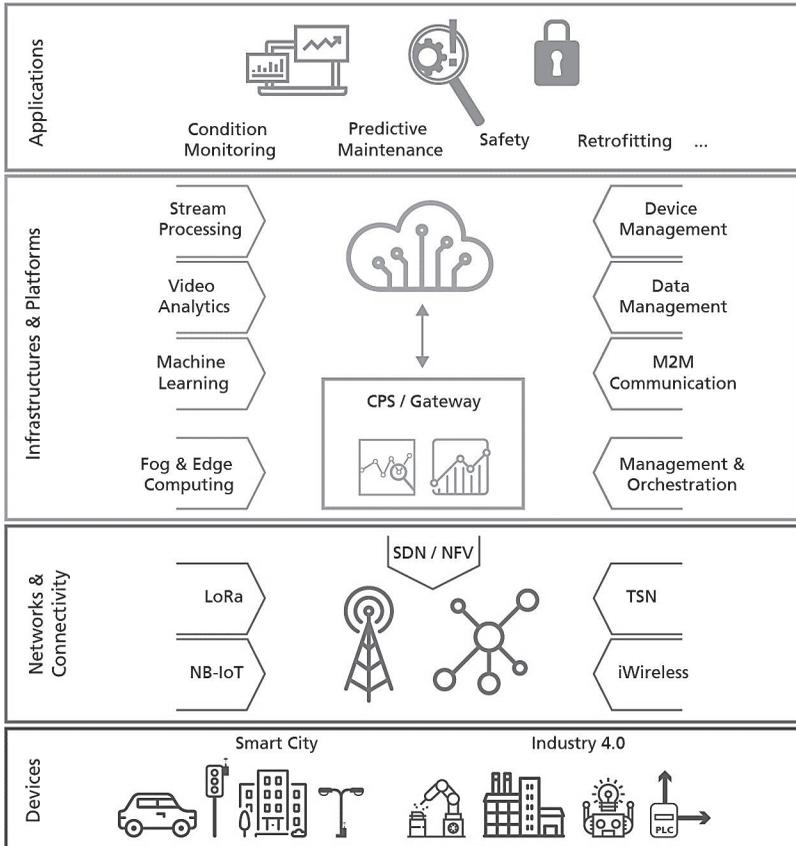


Fig. 5. Different IoT layers

There are many options for gateways, some of which are as simple as a mobile device (smartphone) positioned together with an IoT endpoint and communicating via RF such as Bluetooth -LE, ZigBee or Wi-

Fi. Gateways like this are sometimes called edge-edge gateways. Others may be more centrally located in data centers to support any number of special or proprietary IoT protocols, such as MQTT or Representational State Transfer (REST). The web service may be provided by a device manufacturer or an enterprise or public cloud service that collects information from manually operated devices. In many situations, the end-to-end connection between the load device and the web service can be provided by a series of field and cloud gateways, each of which integrates large amounts of data. Dell, Intel and other companies have recently introduced internet gateways to the market. Companies like Systech offer multiple protocol gateways that allow connecting different types of devices to IoTs using multiple antennas and receivers. There are also user-focused gateways, also called commercially available hubs that support intelligent home communication.

One of the main aspects of IoT is how small power supplies self-organize and exchange information (route information and data) with each other. Although these sensor devices are energy-limited, they must store and process data, dynamically connect to the network, and interact with other devices. Some devices may act as internal or border routers. There are five key issues to consider secure route creation, automatic recovery and stabilization, malicious detection, hardware-based calculations, and node location confidentiality.

5.3. Message protocols. At the top of the IoT communication packet are stored protocols that support the exchange of formatted messages between two endpoints, usually client-server or client-client. Protocols, such as MQTT, CoAP, The Data Distribution Service (DDS), Advanced Message Queuing Protocol (AMQP), and The Extensible Messaging and Presence Protocol (XMPP), which work on lower layer communications and enable effectively contract clients and servers to share data. Possible communications can be done very efficiently and in many Internet systems. Today, communications based on REST and MQTT appear to be leading the way.

5.3.1. MQTT. MQTT (Fig. 6) is a publish/subscribe model where clients subscribe to topics and maintain a TCP connection to a broker server. As new messages are sent to the broker, they include the subject of the message, which allows the broker to determine which clients receive the message. Messages are sent to customers through a constantly working connection.

5.3.2. XMPP. XMPP is XML-based (Extensible Markup Language) and is an open source real-time communication technology. It is developed by the Jabber Instant Messaging (IM) protocol. XMPP supports the transmission of XML messages over TCP transport, which allows IoT developers to effectively detect and troubleshoot defects.

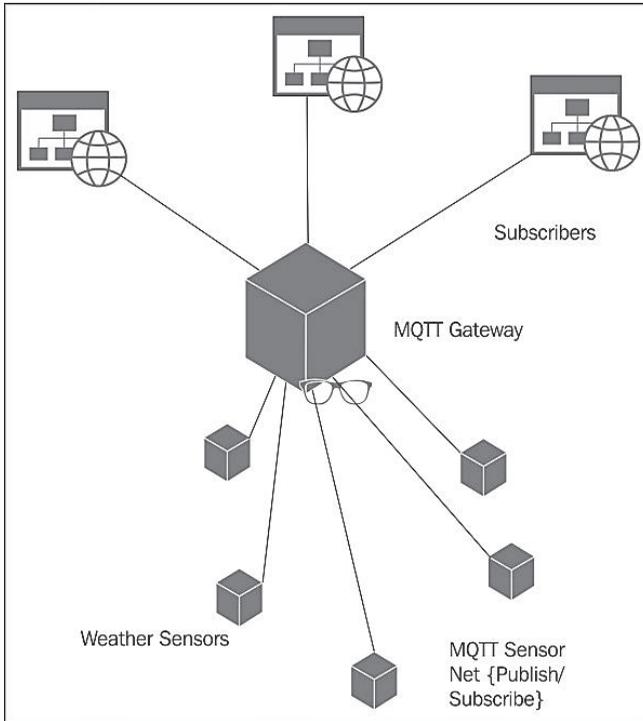


Fig. 6. Architecture of MQTT

5.3.3. CoAP. CoAP (Fig. 7) is another UDP-based IoT message protocol designed to be used on resource-limiting Internet devices, such as WSN nodes. It consists of a set of messages that easily navigate to HTTP: GET, POST, PUT and DELETE.

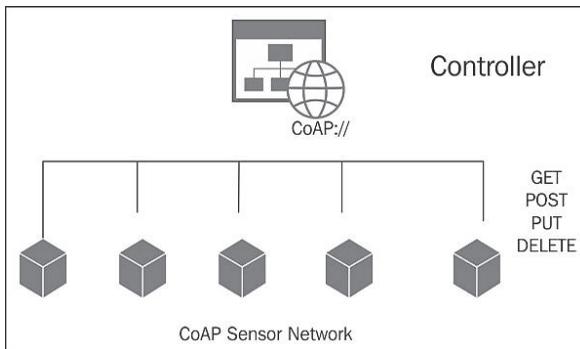


Fig. 7. Architecture of CoAP

5.3.4. DDS. DDS (Fig. 8) is an information bus used to integrate intelligent machines. Like MQTT, it uses a reader publishing / subscription model to subscribe to topics of interest.

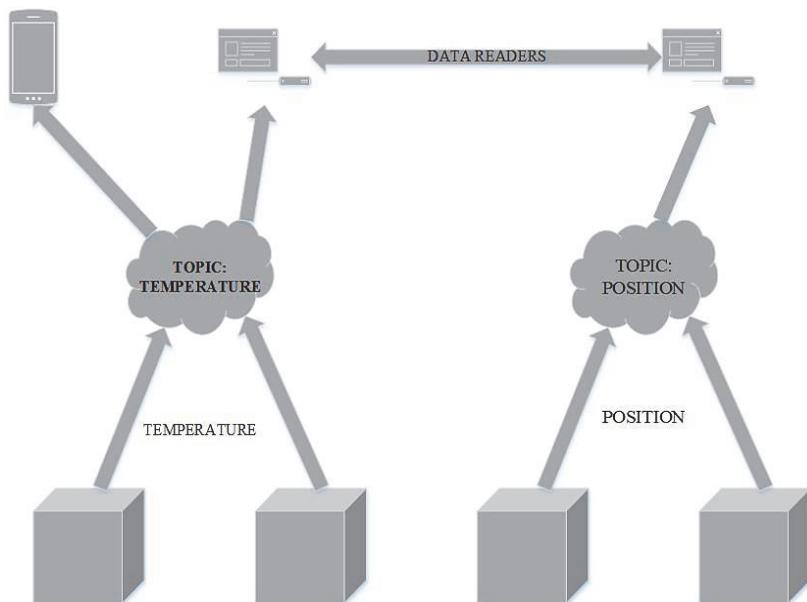


Fig. 8. Architecture of DDS

6. Risk Analysis Method. Data security issues are becoming increasingly important as civilization moves toward a global information age. The information revolution has changed the way of communication all over the world and also drawn unprecedented attention to network security issues [13].

The Internet of Things has a very promising development and its development is very turbulent. The problem with detecting possible attacks or breakdowns in Threat Risk Analysis (TRA) systems. Part of TRA is tree-based analysis. Attack Tree Analysis is a modeling technique for understanding risk in complex situations. Based on the previous study, the method [4] of risk analysis of a security breach based on trees was selected.

7. IoT Attack Scenario. This section describes how the values of each leaf node of an attack tree are generated [14], as well as an analysis of these data and results (Table 1 and 2) [15, 16]. All nodes of the attack in full view are shown in Figures 9 and 10.

SecurTree	Licensed to Evaluation License	Amnaza Technologies Ltd.
All Nodes		
The purpose of the attack - malicious overflow		
1 <OR> Pump manipulation		
1.1 <OR> Remote control of the pump		
1.1.1 <AND> Man-In-The-Middle		
1.1.1.1 <AND> Connecting hacking device		
1.1.1.1.1 Muting Bluetooth		
1.1.1.1.2 Spoofing		
1.1.1.1.3 <AND> Pairing		
1.1.1.1.3.1 <OR> Obtaining PIN		
1.1.1.1.3.1.1 Official Documentacion		
1.1.1.1.3.1.2 Brute Force		
1.1.1.1.3.1.3 Internet search		
1.1.1.1.3.2 Near the pump		
1.1.1.2 <OR> Data manipulation		
1.1.1.2.1 Repeat attack		
1.1.1.2.2 Data manipulation		
1.2 <OR> Send malicious commands to the controller		
1.2.1 <AND> Remote control to the controller		
1.2.1.1 <AND> Recieve information from controller		
1.2.1.1.1 Official Documentacion		
1.2.1.1.2 Information search		
1.2.1.1.3 FCC Site		
1.2.1.1.4 Recieve information from controller		
1.2.1.2 Wireless transmission vulnerability		
1.2.1.3 Malware installation		
2 <OR> Redirect the system so that the amount of medicine is increased		
2.1 <OR> Recieve remote control to the EHR server		
2.1.1 <AND> Server exploit		
2.1.1.1 <OR> Backdoors installation		
2.1.1.1.1 Threat via email		
2.1.1.1.2 Threat via USB		
2.1.1.2 Port scanning		
2.1.1.3 <OR> Identification of operational exploits		
2.1.1.3.1 Transfusion management		
2.1.1.3.2 SQL Injection		
2.1.2 <OR> System login via valid username and password		
2.1.2.1 Spear phishing		
2.1.2.2 Notify system administrator		
2.2 <AND> Network hacking		
Page 1 of 2		12:23:12 PM EEST

Fig. 9. All attack nodes

SecurITree	Licensed to Evaluation License	Amnaza Technologies Ltd.
<ul style="list-style-type: none">2.2.1 <OR> Extracting traffic<ul style="list-style-type: none">2.2.1.1 Accessing data through a specific host or network2.2.1.2 Accessing data through a host or network2.2.2 <OR> Man In The Middle<ul style="list-style-type: none">2.2.2.1 Repeat the attack2.2.2.2 Spoofing2.2.2.3 <AND> Forwarding of data<ul style="list-style-type: none">2.2.2.3.1 Real-time data manipulation2.2.2.3.2 Overcoming SSL / TLS2.2.2.3.3 Send data		
Page 2 of 2		12:23:12 PM EEST

Fig. 10. All attack nodes

INFORMATION SECURITY

Table 1. Attack nodes

Aim	Description of the sub-objective	Attack nodes	Tech. Spec.	Access	Notice	Breakthrough time
Installation of Backdoors	The attacker aims to find a point of entry by installing programs with Backdoors on the EHR server	Transmission of threat by email	Average	High	High	Weeks-Months
		USB threat transmission	Average	Average	High	Weeks-Months
		Port scanning	Low	Average	High	Days-Weeks
Identifying working exploits	The attacker uses several vulnerabilities in EHR server until it is discovered exploit , co her it meets the purpose of the attacker	Spillover management	High	Average	Average	Weeks-Months
		SQL Injection	Average	Average	Average	Days-Weeks
Login with a valid username and password	Once accessed to the hospital network, the attacker may attempt to log in with the administrator name and password	Spear Phishing	Average	High	High	Weeks-Months
		Confusing the administrator	Low	High	High	Days-Weeks
Extracting traffic	The attacker must find means of accessing traffic to or from the network	Accessing data through a host or network	Average	Average	Average	Weeks-Months
		Access data for a specific host or network	Average	Average	Average	Weeks-Months

Table 1 continued

Aim	Description of the sub-objective	Attack nodes	Tech. Spec.	Access	Notice	Breakthrough time
Man in the Middle Attack	The attacker aims to capture the data by moving from the client to the EHR server. Change attack and change packages.	Repeat the attack	Average	Average	Average	Weeks-Months
Forwarding data	When transmitting data to the attacker and intercepting the data, the attacker must change the data so that the modified data will cause physical harm to the patient.	Real-time data manipulation	High	Average	High	Weeks-Months
		Send data	Low	High	High	Days-Weeks
		Overcoming SSL / TLS	Very High	Low	High	Years-Decades

Backdoors installation: The need to install Backdoors is to allow attackers to repeatedly access systems and intranet sites whenever they wish, bypassing normal security controls [17, 18]. During this time, the attacker finds other loopholes in the system that can be operated to achieve the desired goal.

— Email threat transmission – An attacker can send an infected file through an attachment to an email or group of people in the hospital. Once the file is opened on a computer on the hospital network, a back door can be created that allows the hacker to connect to that computer from a remote

location. This method is highly accessible because emails are sent over the Internet and there are no restrictions.

— USB threat transmission – An attacker can transmit malware to the target EHR server via a USB device. Alternative USB devices for hospital staff or tricking a doctor into sharing a file from a computer system may be an alternative. Low technical ability to perform this attack is required.

— Port Scanning – Upon successful access to the hospital network, the attacker will scan for open network ports that can be used to get started. It takes a very low technical skill to perform this attack as there are numerous online tutorials explaining how this can be done [19].

Table 2. Nodes weight

Attack nodes	Technical ability	Accessibility	Landmark	Breakthrough time
Transmission of threat by email	3	3	2	3
USB threat transmission	2	2	2	3
Port scanning	2	3	2	2
Spillover management	4	2	3	3
SQL Injection	2	2	3	2
Login with a valid username and password	2	3	4	1
Accessing data through a host or network	3	2	3	3
Access data for a specific host or network	3	2	3	3
Repeat the attack	3	2	3	3
Real-time data manipulation	4	2	2	3
Send data	2	3	2	2
Overcoming SSL / TLS	5	1	2	5

Identifying working exploits: Once an attacker has established himself in the system, the next objective of the attack is to detect vulnerabilities in the system.

— SQL Injection – The purpose of an attacker is to request a database that can change the electronic records in the database.

— Spillover management – Upon entering the hospital network, the attacker may decide to execute arbitrary operating system commands through a vulnerable application.

Login with a valid username and password: An attacker who can access the server may try to use different combinations of username and passwords to gain access to the system.

Extracting traffic: In order to compromise a network, an attacker must retrieve the traffic as it passes between the client and the server [20].

— Accessing data through a host or network – An attacker may attempt to retrieve data destined for the hospital network.

— Access to data destined for a particular host or network – The attacker may attempt to retrieve data coming from the hospital network.

Repeat Attack: The attacker may decide to forward already captured data so that the EHR server receives authentic data in real time. If successful, this will result in incorrect transfer of the record, since the original data are not the same as the repeated data.

— Real-time data manipulation – An attacker must capture and modify incoming packets during real-time transmission to capture SSL flow.

— Data Transmission – Data forwarding is the least that an attacker can do. An attacker may attempt to apply additional techniques to ensure that the attack is critical enough when transmitting modified data.

— Overcoming SSL / TLS – This attack node has a very high technical result as a high level of understanding of the basic principles of encryption is required to launch an attack. The attacker must have access to real-time data to capture the SSL stream.

8. Comparative analysis. SecurITree software provides a tool that allows identifying threat profiles [1].

Attack scenarios that fall under threat level 1 have the highest level of attack complexity [21]. The level of complexity of attacks decreases from threat level 1 to threat level 5. While attacks that are below threat level 1 are the most complex, threat level 5 may lead to attack against infrastructure, with less complexity and good result. In the SCADA attack scenario, it can be seen that only attackers under threat 1 and 3 can carry out the attack.

Comparing both results (Table 3), it can be seen that the level of threat 4 and 5 may lead to an attack on infrastructure, but not on the industrial SCADA system. This means that the skills required to attack an IoT application, such as a drug overflow pump, are less than an industrial SCADA system.

Analysis of the electronic record change scenario to increase the infusion rate of an overflow pump – using a complexity index (CI).

Table 3. Comparison of threat levels between IoT and SCADA

IoT System		SCADA attack	
Level of threat	Scenario	Level of threat	Scenario
1	11	1	36
2	5	2	0
3	9	3	36
4	9	4	0
5	2	5	0
6	0	6	0
7	0	7	0
8	0	8	0

An attacker can modify electronic records by attacking the EHR server, EHR client, or network. In order to attack the server, it is assumed that the attacker exploits the existing vulnerabilities. In order to carry out the attack, the attacker must combine elements of social engineering, insubordination, remote administration and APT. This makes CI the value of this attack scenario 4. In the network attack scenario, it has been suggested that if an attacker wants to compromise a server that correctly implements SSL / TLS data encryption, a Zero- Day vulnerability must be used. This increases the complexity of this attack to 5, otherwise the CI score for an attack on the network layer is considered to be 4. The lowest complexity attack against an EHR is an attack against a client machine. The script here introduces an attacker who gains remote access to the client machine after using social engineering techniques to obtain vital access information. The CI result for such an attack is 2. Table 4 illustrates the attack in detail.

Table 4. Determination of CI coefficient for IIoT

Types of features	Attack on the server	CI	Network Attack	CI
Social engineering	Email Threat, USB Threat	1	Access data from / through a host or network	1
Remote administration	Overflow Management, SQL Injection	1	Access data from / through a host or network	1
Landmark	Install backdoors	1	Access data from / through a host or network	1
Zero-Day Vulnerabilities	None	0	Overcoming SSL / TLS	1
APT	Installing Backdoors	1	Access data from / through a host or network	1
		Total = 4		Total = 5
Types of features	Client attack	CI	Network Attack	CI
Social engineering	Spear Phishing	1	Access data from / through a host or network	1
Remote administration	Overflow Management, SQL Injection	1	Access data from / through a host or network	1
Landmark	There is no	0	Access data from / through a host or network	1
Zero-Day Vulnerabilities	None	0	None	0
APT	There is no	0	Access data from / through a host or network	1
		Total = 2		Total = 4

10. Results of an IIoT attack. Using indicators related to the complexity of attacks to analyze the capabilities at each threat level, it is observed that the threat level 5 is the lowest threat level that can attack an infrastructure. Attacking can lead to a physical impact, such as endangering a

patient's life. Two attacks can be achieved through threat level 5. The purpose of both attacks is to successfully replicate the transmitted data between the patient's device and the EHR server. Repeated attack would result in incorrect data being recorded in normal data, if the physician starts treating a patient based on this data, the result could be catastrophic.

The result of the analysis also shows that threat level 1 is the highest threat level for IoT infrastructure. Threat Level 1 aims to change the encoded data during transmission. This may include changing patients' names, changing patient's blood type, and modifying the data used to determine the patient's rate of transfusion, etc.

Some of the attack nodes include network traffic capture, real-time data manipulation, SSL/TLS encryption processing before the final forwarding of the data.

For the system attack tree, five scenarios can be performed with a threat level of 2. These attacks consist of an attack that is designed to trick the physician into introducing medical records into a false domain, a spy phishing attack that is the precursor to receiving a custom username and password to remotely access the EHR and find the vulnerability in the server for remote server operation. The same attack scenarios can be performed from threat level 3 and threat level 4. These attacks include the Man-In-The-Middle attack of the overflow pump itself, the controller attack, and the server operation of the EHR server. These attacks cannot be carried out by a second level threat because of their reduced technical ability. At the end of the analysis it can be seen that none of the attacks can be carried out with a threat level of 1, 2 and 3.

10. Conclusion. For the IIoT infrastructure, each node is described in detail, and for SCADA, the infrastructure relies on data provided by different reports.

After using the data correlation, the introduction of the corresponding value of each leaf attack into the securITree system was continued and a table was created to categorize the threat level. Amenaza's methodology is also used to generate a complexity index for all attacks. This makes it possible to compare the level of complexity of SCADA and IoT infrastructures. Such attacks can be carried out to an IoT application, with lower complexity requirements and still produce a physical result.

The safe and secure deployment of IoT is a major challenge, given the unique characteristics of these systems, their ability to impact events in the physical world, and the diversity of IoT applications.

References

1. Checharova N., Chehlarova K. Verification and Improvement of Digital Competence and Common Culture through Symmetries. Electronic Collection of "Instruments for Attractive Education. 2015.

2. Chechlarova N. Online competition “Rosette” for the development of digital competence. *Pedagogical Forum*. 2016. Issue 3.
3. Ahmedova S. Digital transformation of the Bulgarian industry. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. vol. 709. no. 2. pp. 022061.
4. Tsochev G.R., Yoshinov R.D., Iliev O.P. [Key Problems of the Critical Information Infrastructure through Scada Systems Research]. *Trudy SPIIRAN – SPIIRAS Proceedings*. 2019. vol. 18(6). pp. 1333–1356.
5. Rouse M. Internet of things (IoT). *IOT Agenda*. Available at: <https://internetofthingsagenda.techtarget.com/definition/Internet-of-Things-IoT> (accessed: 14.08.2019).
6. Wang B. The internet of things world forum unites industry leaders in Chicago to accelerate the adoption of iot business models. Available at: <http://www.marketwired.com/press-release/internet-things-world-forum-unites-industry-leaders-chicago-accelerate-adoption-iot-nasdaq-htm> (accessed: 21.03.2020).
7. Nedyalkova A., Bakardjieva T., Nedyalkov K. Application of Digital Cybersecurity Approaches to University management – VFU Smart Student. *International Association for Development of the Information Society*. 2016. pp. 173–180
8. Trifonov R. et al. A Survey of Artificial Intelligence for Enhancing the Information Security. *International Journal of Development Research*. 2017. vol. 07. no. 11. pp. 16866–16872.
9. Garvanov I., Garvanova M. *Vvedenie v MATLAB i SIMULINK* [Introduction to MATLAB and SIMULINK]. *Za bukvite – O pismenekh'*. 2014. 122 p. (In Bulg.).
10. Nikolov B., Teholakova V. Aspects of risk management in logistics activities of enterprises. application of fault tree analysis (FTA). *Innovations*. 2015. vol. 3. no. 2. pp. 34–38.
11. Trifonov R., Yoshinov R., Pavlova G., Tsochev G. Artificial neural network intelligent method for prediction. *AIP Conference Proceedings*. 2017. vol. 1872. no. 1. pp. 020021.
12. IoT Security Foundation. “Establishing Principles for Internet of Things Security”. Available at: <https://www.iotsecurityfoundation.org/establishing-principles-for-internet-of-things-security/> (accessed: 01.03.2020).
13. Trifonov R. et al. Conceptual model for cyber intelligence network security system. *International Journal of Computers*. 2017. vol. 11. pp. 85–92.
14. Amenaza Technologies Ltd., "Introduction to SecurITree". 2017. Available at: https://www.amenaza.com/demos/introduction_to_securitree.html (accessed: 14.08.2019).
15. Gershfang E. Ransomware and Healthcare – OWASP Montreal. 2016. Available at: <https://ca.linkedin.com/in/eduard-gershfang-cissp-ceh-cnda-ccsp-608a1811> (accessed: 14.08.2019).
16. Stoyanov D. Neurorehabilitation: Public Health and Health Care in Greece and Bulgaria: the Challenge of the Cross-border Collaboration. *Asklepij. Mezhunarodno spisanie po istoriya i filozofiya na medicinata*. 2010. vol. IV. pp. 170–170.
17. Trifonov R. et al. Increasing the level of network and information security using artificial intelligence. *Fifth Intl. Conf. Advances in Computing, Communication and Information Technology*. 2017. pp. 2–3.
18. Lecture notes. Available at: <https://www.cs.fsu.edu/~redwood/OffensiveComputerSecurity/lectures.html> (accessed: 16.12.2019).
19. Nikolov D., Kordev I., Stefanova S. Concept for network intrusion detection system based on recurrent neural network classifier. 2018 IEEE XXVII International Scientific Conference Electronics (ET). 2018. pp. 1–4.
20. Morris T., Gao W. Industrial control system traffic data sets for intrusion detection research. *International Conference on Critical Infrastructure Protection*. 2014. pp. 65–78.

21. Moore A., Ellison R.J., Linger R.C. Attack Modeling for Information Security and Survivability. Carnegie-Mellon Univ Pittsburg Pa Software Engineering Inst. 2001. No. CMU-SEI-2001-TN-001.

Tsochev Georgi — Ph.D., Chief Assistant Professor, Laboratory of Telematics, Bulgarian Academy of Sciences (BAS). Research interests: computer science, computer networks and communication, neural networks, deep learning, application of mathematics and informatics in cybersecurity. The number of publications — 25. gtsochev@cc.bas.bg; bl. 8, Acad. Georgi Bonchev str., 1113, Sofia, Bulgaria; office phone: +359895589861.

Yoshinov Radoslav — Head of Laboratory, Laboratory of Telematics, Bulgarian Academy of Sciences (BAS). Research interests: computer science, medical systems, computer networks and communication, deep learning, cybersecurity, E-Government cybersecurity of computer networks. The number of publications — 191. yoshinov@cc.bas.bg; 8 bl., Akad. G. Bonchev str., 1113, Sofia, Bulgaria; office phone: +359888627190.

Zhukova Nataly — Ph.D., Associate Professor, Senior researcher, Laboratory of Information and Computing Systems and Programming Technologies, St. Petersburg Institute of Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences (SPIIRAS). Research interests: intelligent systems, data analysis. The number of publications — 70. nazhukova@mail.ru; 39, 14th line V.O., 199178, St. Petersburg, Russia; office phone: +7(812)328-08-87; fax: +7(812)328-44-50.

Acknowledgements. This research is supported by ICT in NOS.

Г.Р. Цочев, Р.Д. Йошинов, Н.А. Жукова
**ПРОБЛЕМЫ БЕЗОПАСНОСТИ ИНДУСТРИАЛЬНОГО
ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ И СРАВНЕНИЕ С СИСТЕМАМИ SCADA**

Цочев Г.Р., Йошинов Р.Д., Жукова Н.А. Проблемы безопасности индустриального интернета вещей и сравнение с системами SCADA.

Аннотация. Рассматривается проблема безопасности Интернета вещей (Internet of Things), которая не относится к традиционной проблеме кибербезопасности, так как связана с локальным или распределенным мониторингом и/или контролем состояния физических систем, подключенных через Интернет. Предыдущее исследование авторов рассматривало архитектуру системы диспетчерского контроля и сбора данных (SCADA). Благодаря внедрению систем SCADA, были проанализированы уязвимости и различные варианты кибератак на них. В качестве исследовательского примера было рассмотрено тематическое исследование, основанное на деревьях, результаты которого были обобщены и визуализированы.

Цель настоящей статьи – сравнить новую индустриальную технологию Интернета вещей (промышленный Интернет вещей, Industrial Internet of Things) с ранее исследованными традиционными системами SCADA.

Промышленный Интернет вещей (Industrial Internet of Things) – это сеть устройств, которые связаны между собой с помощью коммуникационных технологий. В настоящей статье представлены некоторые из наиболее распространенных проблем безопасности устройств промышленного Интернета вещей.

Представлен краткий обзор архитектуры промышленного Интернета вещей, описываются основные принципы безопасности и основные проблемы, которые могут возникать с устройствами Интернета вещей. Основываясь на исследованиях и анализе риска угроз в области промышленного Интернета вещей, в качестве главного подхода рассмотрен конкретный случай деструктивного воздействия, основанный на древовидном анализе. Дается описание создания значений каждого конечного узла дерева атак, а также приводится анализ полученных результатов. Анализ сценария изменения электронной записи для увеличения скорости инфузионного насоса был выполнен с использованием индекса сложности. Результаты были сравнены с предыдущим исследованием систем SCADA и представлены результаты и выводы.

Ключевые слова: Интернет вещей, промышленные системы, SCADA, дерево атак, кибербезопасность, сетевая и информационная безопасность.

Цочев Георги Руменов — канд. техн. наук, главный ассистент, лаборатория телематики, Болгарская академия наук (БАН). Область научных интересов: информатика, информационные технологии, нейронные сети, глубинное обучение, киберзащита. Число научных публикаций — 25. gtsochev@cc.bas.bg; ул. Академика Георги Бончев, бл. 8, 1113, София, Болгария; р.т.: +359895589861.

Йошинов Радослав Даков — заведующий лабораторией, лаборатория телематики, Болгарская академия наук (БАН). Область научных интересов: информатика, информационные технологии, модели, связанные с обучением, решения для поддержки электронного управления. Число научных публикаций — 191. yoshinov@cc.bas.bg; ул. Академика Георги Бончев, 8 бл., 1113, София, Болгария; р.т.: +359888627190.

Жукова Наталия Александровна — канд. техн. наук, доцент, старший научный сотрудник, лаборатория информационно-вычислительных систем и технологий програм-

мирования, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук (СПИИРАН). Область научных интересов: интеллектуальные системы, анализ данных. Число научных публикаций — 70. nazhukova@mail.ru; 14-я линия В.О., 39, 199178, Санкт-Петербург, Россия; р.т.: +7(812)328-08-87; факс: +7(812)328-44-50.

Поддержка исследований. Работа выполнена при финансовой поддержке ИКТ in НОС.

Литература

1. *Checharova N., Chehlarova K.* Verification and Improvement of Digital Competence and Common Culture through Symmetries // Electronic Collection of “Instruments for Attractive Education. 2015.
2. *Chechlarova N.* Online competition “Rosette” for the development of digital competence // Pedagogical Forum. 2016. Issue 3.
3. *Ahmedova S.* Digital transformation of the Bulgarian industry // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. vol. 709. no. 2. pp. 022061.
4. *Tsochev G.R., Yoshinov R.D., Iliev O.P.* Key Problems of the Critical Information Infrastructure through Scada Systems Research // Труды СПИИРАН. 2019. Т. 18(6). С. 1333–1356.
5. *Rouse M.* Internet of things (IoT). IOT Agenda. URL: <https://internetofthingsagenda.techtarget.com/definition/Internet-of-Things-IoT> (дата обращения: 14.08.2019).
6. *Wang B.* The internet of things world forum unites industry leaders in chicago to accelerate the adoption of iot business models. URL: <http://www.marketwired.com/press-release/internet-things-world-forum-unites-industry-leaders-chicago-accelerate-adoption-iot-nasdaq-htm> (дата обращения: 21.03.2020).
7. *Nedyalkova A., Bakardjieva T., Nedyalkov K.* Application of Digital Cybersecurity Approaches to University management – VFU Smart Student // International Association for Development of the Information Society. 2016. pp. 173–180
8. *Trifonov R. et al.* A Survey of Artificial Intelligence for Enhancing the Information Security // International Journal of Development Research. 2017. vol. 07. no. 11. pp. 16866–16872.
9. *Гарванов И., Гарванова М.* Въведение в MATLAB и SIMULINK // За буквите – О писменехъ. 2014. 122 с.
10. *Nikolov B., Tcholakova V.* Aspects of risk management in logistics activities of enterprises. application of fault tree analysis (FTA) // Innovations. 2015. vol. 3. no. 2. pp. 34–38.
11. *Trifonov R., Yoshinov R., Pavlova G., Tsochev G.* Artificial neural network intelligent method for prediction // AIP Conference Proceedings. 2017. vol. 1872. no. 1. pp. 020021.
12. IoT Security Foundation. “Establishing Principles for Internet of Things Security”. URL: <https://www.iotsecurityfoundation.org/establishing-principles-for-internet-of-things-security/> (дата обращения: 01.03.2020).
13. *Trifonov R. et al.* Conceptual model for cyber intelligence network security system // International Journal of Computers. 2017. vol. 11. pp. 85–92.
14. Amenaza Technologies Ltd., "Introduction to SecurITree". 2017. URL: https://www.amenaza.com/demos/introduction_to_securitree.html (дата обращения: 14.08.2019).
15. *Gershfang E.* Ransomware and Healthcare – OWASP Montreal. 2016. URL: <https://ca.linkedin.com/in/eduard-gershfang-cissp-ceh-cnda-ccsp-608a1811> (дата обращения: 14.08.2019).
16. *Stoyanov D.* Neurorehabilitation: Public Health and Health Care in Greece and Bulgaria: the Challenge of the Cross-border Collaboration // Асклепий. Международно списание по история и философия на медицината. 2010. № IV. С. 170–170.

17. *Trifonov R. et al.* Increasing the level of network and information security using artificial intelligence // Fifth Intl. Conf. Advances in Computing, Communication and Information Technology. 2017. pp. 2–3.
18. Lecture notes. URL: <https://www.cs.fsu.edu/~redwood/OffensiveComputerSecurity/lectures.html> (дата обращения: 16.12.2019).
19. *Nikolov D., Kordev I., Stefanova S.* Concept for network intrusion detection system based on recurrent neural network classifier // 2018 IEEE XXVII International Scientific Conference Electronics (ET). 2018. pp. 1–4.
20. *Morris T., Gao W.* Industrial control system traffic data sets for intrusion detection research // International Conference on Critical Infrastructure Protection. 2014. pp. 65–78.
21. *Moore A., Ellison R.J., Linger R.C.* Attack Modeling for Information Security and Survivability // Carnegie-Mellon Univ Pittsburg Pa Software Engineering Inst. 2001. No. CMU-SEI-2001-TN-001.

И.И. Лившиц
**МЕТОД ОЦЕНИВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ОБЛАЧНЫХ ИТ-
КОМПОНЕНТ ПО КРИТЕРИЯМ СУЩЕСТВУЮЩИХ
СТАНДАРТОВ**

Лившиц И.И. Метод оценивания безопасности облачных ИТ-компонент по критериям существующих стандартов.

Аннотация. Приводится анализ известных методов обеспечения информационной безопасности, рассматриваются методы оценивания безопасности как отдельных ИТ-компонент, так и облачных сервисов в целом.

Предпринята попытка проанализировать облачные сервисы не с позиции коммерчески успешного и популярного маркетингового продукта, а с позиции системного анализа. Введенный ранее порядок оценивания ИТ-компонент нестабилен, поскольку у конечного пользователя нет 100% гарантии доступа ко всем ИТ-компонентам, а тем более к компонентам удаленного и неподконтрольного облачного сервиса. В ряде обзоров отмечается рост усилий по созданию сетевой безопасной архитектуры и по обеспечению непрерывного контроля отклонений от установленных бизнес-целей. В отличие от моделей Zero Trust и Zero Trust eXtended, согласно которым на существующие ИТ-компоненты накладываются дополнительные функции безопасности, предлагается рассматривать совокупность ИТ-компонент как новую сущность – систему обработки информации. Это позволит перейти к формальным процессам оценивания степени соответствия по критериям стандартов как для существующих, так и для перспективных ИТ-компонент при обеспечении безопасности облачных сервисов.

Предложен новый метод оценивания на базе ранее разработанной гибридной методики с использованием формальных процедур, основанных на двух системах критериев – оценивании степени соответствия систем менеджмента (на базе ИСО/МЭК серии 27001) и оценивании требований функциональной безопасности (на базе МЭК серии 61508 и ИСО/МЭК серии 15408). Этот метод дает воспроизводимые и объективные оценки рисков безопасности облачных ИТ-компонент, которые могут быть предъявлены для проверки независимой группе оценщиков. Полученные результаты возможно применить для защиты объектов критической информационной инфраструктуры.

Ключевые слова: система менеджмента, риск, информационная технология, информационная безопасность, аудит, стандарт, экспертиза, оценивание.

1. Введение. В последние годы количество угроз информационной безопасности (ИБ) значительно возросло, и в этой связи малоизученная проблема оперативного оценивания безопасности информационных технологий (ИТ) для различных объектов критической информационной инфраструктуры (КИИ) становится особенно актуальной [1-3]. Очевидно, это обстоятельство справедливо и для ИТ-компонент, размещенных или планируемых для размещения в облаке [4-6]. Проблема оценивания для такого класса объектов КИИ должна решаться в соответствии с установленными требованиями (например, ФЗ-187, постановление Правительства

№ 127, приказы ФСТЭК России № 235 и № 239), а также с использованием соответствующих процессов, позволяющих выполнять аудит безопасности требуемых ИТ-компонент на соответствующих уровнях [7, 8], и в том числе на уровне программного обеспечения (ПО) [9].

В отличие от известных моделей Zero Trust и Zero Trust eXtended, в которых на существующие ИТ-компоненты накладываются дополнительные функции безопасности (ФБ), в предложенной модели рассматривается совокупность таких ИТ-компонент в составе КИИ, как новая сущность, – система обработки информации (СОИ) [10, 11]. В этом случае появляется возможность облачных сервисов оптимизировать затраты путем использования уже существующих и практически отработанных ФБ в составе СОИ. Для облачных компонент эффективным решением будет оценивание уже имеющегося уровня безопасности в ИТ-компонентах, обусловленного существующей архитектурой СОИ и полученного в результате сочетания ИТ-компонентов и ФБ. По итогам оценивания возможно принятие обоснованного и объективного решения о реализации новых и/или дополнительных ФБ (в том числе для КИИ) [10, 11]. Целью данной статьи является разработка нового метода оценивания на базе предложенной ранее гибридной методики с использованием формальных процедур, основанных на двух системах критериев – оценивании степени соответствия систем менеджмента (на базе ИСО/МЭК серии 27001) и оценивании требований функциональной безопасности (на базе МЭК серии 61508 и ИСО/МЭК серии 15408). Основным результатом является новый метод оценивания безопасности облачных ИТ-компонент по критериям существующих стандартов.

2. Обзор существующих методов. Важным аспектом для бизнес-заказчиков являются гарантии обеспечения заданного уровня ИБ для различных типов ИТ-компонент [12, 13]. В частности, критичным может оказаться недостаточный контроль предоставления доступа к различным видам облачных хранилищ корпоративных данных [14, 15]. В существующих решениях по сетевой безопасности учтены требования бизнеса к внутренним зашифрованным коммуникациям, сетевой сегментации и детальному мониторингу [16-18]. В [19] отражены решения для интероперабельности и способности проводить измерения стандартными процедурами, обеспечивающими непрерывный контроль отклонений от установленных бизнес-целей. В [20] показан характерный пример недостаточного контроля имеющихся ФБ, заключающийся в ошибках конфигурации из-за низкой квалификации системных администраторов, что приводит к

неавторизованному доступу. Процесс оценивания можно рассмотреть с позиции значимости отечественного сегмента рынка ИТ-компонентов по сравнению с мировыми тенденциями и оценить объем новых технологий, которые могут быть успешно применены в России. Например, представлена оценка Gartner и IDC [21], что весь ИТ-рынок России составляет примерно 2% от мирового, а сегмент ИТ-услуг занимает только 0,5% от общего объема. Отчасти этот незначительный уровень является не только отражением способности оценить (в том числе и в аспекте ИБ) новые облачные сервисы, как было показано на примере нормативно-методических документов (НМД) ФСТЭК, но он также связан с проблемами квалификации обслуживающего персонала.

В аналитическом обзоре [22] отмечается, что атаки осуществляются через бреши в обороне, которые в основном появляются в связи с расширением Интернета вещей (IoT) и незащищенными технологиями при использовании облачных сервисов. Соответственно, совокупное применение небезопасных «модных» технологий IoT и активно рекламируемых как панацея, но недоверенных облачных сервисов, может привести к появлению еще большего количества комбинаций для компрометации ИТ-компонент, особенно на объектах КИИ. Следует учесть, что любые ИТ могут выступать как инструментом бизнеса, так и оружием против него в том случае, если они не прошли в установленном порядке процесс оценивания безопасности. Это предположение подтверждается фактами, что злоумышленникам удается для преодоления защитных функций применять в качестве инструмента облачные сервисы и другие ИТ-компоненты, используемые в легитимных целях [23]. В [23] показано, что вместо настройки серверов с шифрованием, злоумышленники используют SSL-сертификат легитимного сервиса, приобретение которого в настоящее время не является проблемой. В данном случае для противодействия данной атаке, использующей легитимные сервисы, применяют следующие факторы: частый обмен сертификатами с легитимными сервисами и выявление большого объема образцов, попадающих в «песочницу» в связи с подозрительными DNS-обращениями на легитимные сервисы. Но, к сожалению, в этой работе не предложены идеи и примеры практической реализации. В технической литературе достаточно негативных примеров слабой реализации защитных механизмов [24]. Отметим, что лидерство по утечкам из облачных хранилищ несколько лет подряд удерживает «Amazon» (рис. 1).

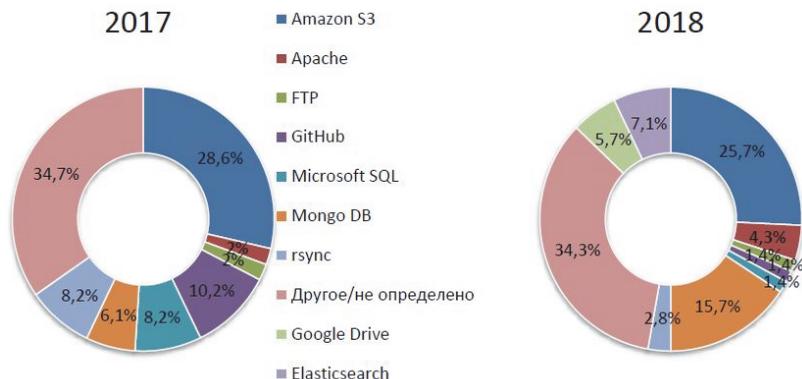


Рис. 1. Распределение скомпрометированных облачных хранилищ [24]

Вопросы измерения и мониторинга безопасности ИТ-компонент рассмотрены в отчете [25]. В частности, приведен ряд барьеров, препятствующих созданию эффективных центров оперативного реагирования на инциденты ИБ (Security Operation Centers, SOC). Отметим аспекты, которые позволяют определять вероятности преодоления защиты с позиции облачных сервисов:

- нехватка квалифицированного персонала;
- отсутствие интеграции между ИТ-компонентами;
- недостаточная поддержка руководства;
- недостаточное документирование процессов;
- отсутствие кооперации между службами;
- недостаточное выполнение требований регуляторов.

Таким образом, можно предположить, насколько сложно обеспечить измерение и мониторинг достижения установленных метрик ИБ для потенциально небезопасных облачных сервисов, если даже для собственных SOC, с учетом известной практики, эксперты признают ряд серьезных проблем [4, 18, 26]. В [27] отмечается важность и приоритетность автоматизации функций ИБ (более 57%), что значительно увеличивает риски при внедрении новых ИТ. В этом отчете отмечено, что новые ИТ-компоненты добавляются стихийно, а времени на обучение сотрудников и изучения функционала не хватает.

Следует полагать с высокой вероятностью, что в обеспечении безопасности предприятия постоянно появляются серьезные пробелы [28]. В отчете [23] приведено исследование базы, содержащей более 150 тыс. пользователей. Исследование выявило, что всего 0,5% пользователей совершают подозрительные действия. Показано, что эта

мизерная группа смогла скачать 3,9 млн. документов из корпоративных облачных систем (в среднем, более 5 тыс. документов на пользователя за 1,5 месяца), при этом примерно 60% скачиваний выполнено в рабочие часы, а 40% – в выходные. Далее, в том же отчете показано, что 27% специалистов по информационной безопасности используют внешние частные облака (этот показатель стабильно растет в течение 3-х лет), а 52% сообщили, что их сети размещены на локальном частном облаке. Из организаций, использующих облачные сервисы, 35% размещают в облаке от 50% до 74% своей инфраструктуры (рис. 2).

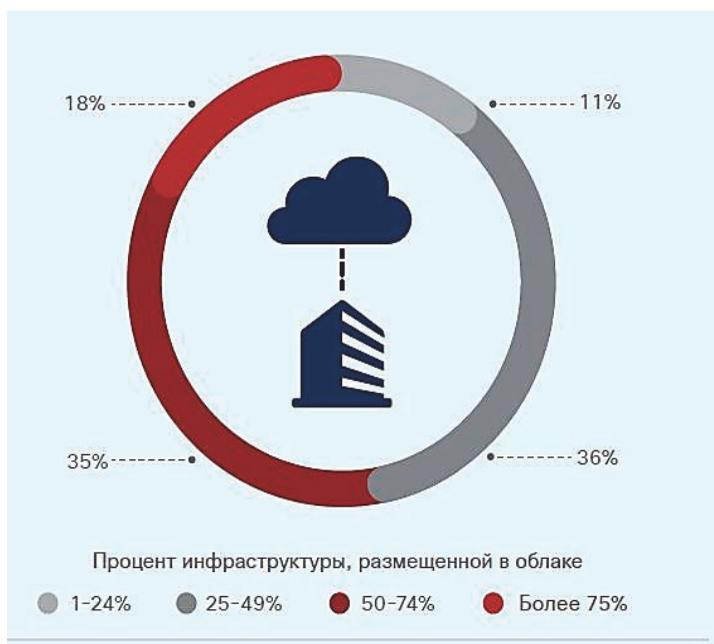


Рис. 2. Размещение инфраструктуры организаций в облаке [23]

Очевидно, следует задаться вопросом – а как же обеспечивается безопасность ИТ-компонент при таком широком распространении частных облаков для бизнес-заказчиков? Следующий вопрос – как именно обеспечивается в бизнесе соответствие заданного уровня ИБ для конкретных приложений, перенесенных в облако? Обратимся к факту, согласно которому бизнес-заказчики чаще всего называют ключевым преимуществом именно безопасность размещения своей ИТ-инфраструктуры в облаке. Например, по данным [23], около 57%

клиентов предпочитают размещать в облаке свои критичные ИТ-активы из-за более высокого уровня защиты данных; 48% – из-за масштабируемости, а 46% – из-за удобства использования. Тем не менее часть критической инфраструктуры может остаться в будущем под управлением собственных ИТ (ИБ) служб. Как показано в [29], полностью корпоративные центры обработки данных (ЦОД) не исчезнут, и часть компаний будет размещать критически важные бизнес-процессы (рис. 3) на своей контролируемой территории.

Enterprises That Will Close Their Traditional Data Centers

Percentages of Respondents

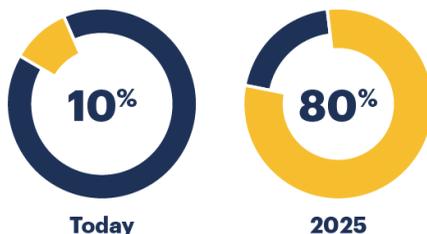


Рис. 3. Прогноз сокращения собственных дата-центров [29]

Следует отметить, что эта часть компаний (сегодня – 10 %, а в перспективе примерно 20%) весьма обеспокоена обеспечением необходимого для собственных бизнес-процессов уровня безопасности и не готова доверять облачным провайдерам ни при каких соглашениях (Service Level Agreement, SLA).

Известная модель Zero Trust, так же, как и расширенная модель – Zero Trust eXtended (ZTX) [30], является реализацией принципа «Доверяй, но проверяй». Модель предполагает, что к действиям пользователя, находящегося внутри периметра корпоративной сети, надо относиться так же подозрительно, как и к действиям того, кто запрашивает доступ к этой сети извне. Эта модель включает [31] валидацию устройств, оценивание контекста для пользователя, авторизацию доступа, верификацию сети, выявление угроз и восстановление устойчивости перед предоставлением доступа устройств или пользователей. Следует отметить, что хотя о концепции Zero Trust говорится в мире достаточно давно (более 5 лет), нигде документально не показано, как обеспечивается безопасность в облаке.

Бизнес должен получить доказательство невозможности какой-либо утечки информации изнутри облачных сервисов на базе формализации настроек сетевой безопасности [32-34]. Значительным преимуществом для бизнеса может оказаться система [35] из 15 критериев. По оценкам [36], бизнес готов реагировать на инициативу Zero-trust policies в двух основных аспектах: в области обнаружения и идентификации атак (более 80% опрошенных экспертов) и в области снижения поверхности атак (более 50% опрошенных экспертов). Процесс обеспечения ИБ облачных технологий является заботой экспертов почти всех крупных компаний, поскольку статистические данные, экспертные отчеты и публичные аналитические доклады не дают гарантий спокойствия [11, 12]. Даже в таком важном для любого эксперта ИБ вопросе, как обеспечение государственной тайны, к сожалению, есть серьезные проблемы. Как показано в отчете компании «InfoWatch» [24], в России в 2017 году в общем объеме утечек данных из облачных сервисов почти 7% составила информация, отнесенная к государственной тайне (рис. 4).

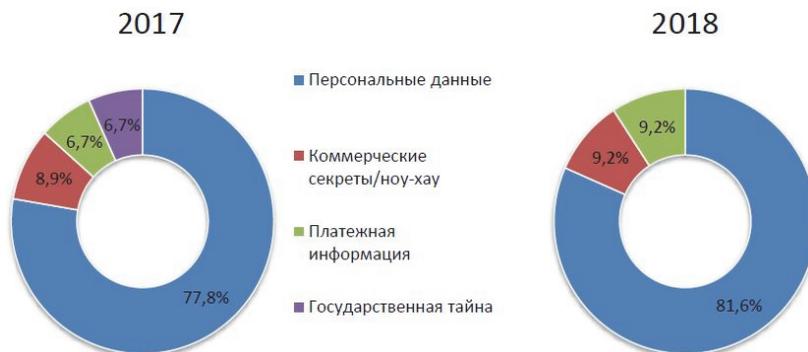


Рис. 4. Анализ утечек данных из облачных серверов [24]

Если на объекте нет «внятной» системы ИБ, то чувствительные данные, и, как показал пример выше, даже сведения, отнесенные к государственной тайне, могут беспрепятственно покинуть периметр облака, особенно если служба ИБ не знает или не может обеспечить требуемый уровень безопасности. К сожалению, ни ФСТЭК России, ни ФСБ России в данный момент не могут предоставить действенные процессы оценивания уровня ИБ в облаке, а существующие НМД по аттестации объектов информатизации не применимы. Приведем статистику (рис. 5), согласно которой примерно 20% компаний разрабатывают для оценки соответствия заданным критериям безопасности собственный фреймворк, еще примерно 20%

комбинируют компоненты иных способов экспертизы, а 23% используют стандарты (NIST, ITIL и пр.).

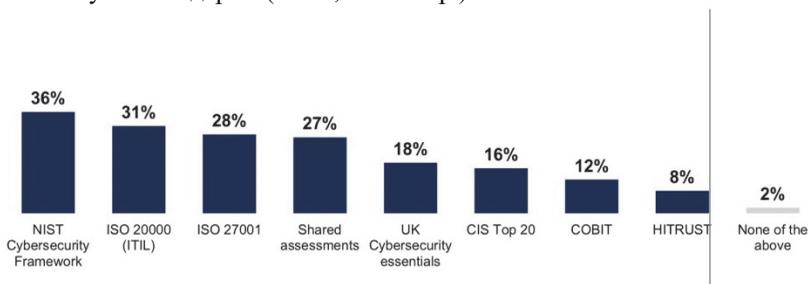


Рис. 5. Статистика использования способов экспертизы [29]

Перейдем теперь к практике в Российской Федерации. Например, в [37] указано требование к проверке (Приложение 2, подпункт 2.5.5.1), в котором определено, что оператору для переводов денежных средств необходимо использовать программное обеспечение (ПО), сертифицированное ФСТЭК, или ПО, в отношении которого проведен анализ уязвимостей по требованиям к оценочному уровню доверия (ОУД). При этом точно определено, что уровень доверия должен быть не ниже, чем ОУД 4 в соответствии с требованиями ISO/IEC 15408 [38-40]. В указанном стандарте установлены требования для ОУД 4, в частности обеспечение доверия на основе формирования задания по безопасности (ЗБ) и посредством анализа выполнения ФБ из данного ЗБ. Анализ выполнения ФБ предусматривает предоставление функциональной спецификации, полной спецификации интерфейсов, руководств, описания базового проекта для объекта оценки (ОО), а также подмножества реализации для понимания режима безопасности (таблица 1).

Таблица 1. Оценочный уровень доверия ОУД 4

Класс доверия	Компоненты доверия
ALC: Поддержка жизненного цикла	ALC_CMC.4 Поддержка производства, процедуры приемки и автоматизации
	ALC_CMS.4 Охват УК отслеживания проблем
	ALC_DEL.1 Процедуры поставки
	ALC_DVS.1 Идентификация мер безопасности
	ALC_LCD.1 Определенная разработчиком модель ЖЦ
	ALC_TAT.1 Полностью определенные инструментальные средства разработки

Известно, что ОУД 4 представляет значительное увеличение степени доверия по сравнению с ОУД 3, требуя более детальное

описание проекта, реализации для всех функций безопасности объекта (ФБО) и улучшенные механизмы и/или процедуры, что дает уверенность в том, что в ОО не будут внесены искажения во время разработки [40]. Следует отметить, что в класс доверия ACL включены компоненты ALC_DVS.1 и ALC_LCD.1, что устанавливает требования по идентификации мер безопасности и наличие определенной разработчиком модели жизненного цикла (ЖЦ). Эти два компонента применены в оценивании безопасности ИТ-компонент в облаке.

3. Постановка задачи. В качестве исходных данных рассматриваются существующие виды экспертиз, которые могут быть применены в процессе оценивания безопасности ИТ-компонент. Как показано в [11], проблема получения *оценки соответствия* (в формулировке стандартов ISO/IEC [38-40] – оценка соответствия установленным критериям безопасности) в определенной предметной области может быть решена при наличии определенного количества экспертиз (таблица 2).

Таблица 2. Типы экспертиз для получения результатов процесса оценивания соответствия установленным критериям

Наименование типа экспертизы	Достоинства	Недостатки
Индивидуальная экспертиза (ИЭ)	Оперативно, конфиденциально, просто	Низкая объективность и достоверность
Шаблонная экспертиза (ШЭ)	Требования доступны и стандартизированы	Значительная погрешность в силу слишком большого обобщения требований
Расчетная экспертиза (РЭ)	Точность, обусловленная квалифицированным выбором методик измерения и современным уровнем инженерных и научных задач	Требуется высокая квалификация для выбора методики измерения и интерпретации результатов

Графически пространство исходных комбинаций экспертиз можно представить в виде треугольника (рис. 6).

Как показывает практика [41, 42], значительное количество проблемных вопросов может быть успешно решено как при использовании одной экспертизы, так и произвольной их комбинации. Например, для многих заказчиков вполне достаточно только ШЭ (на соответствие, например, НМД ФСТЭК России) или только ИЭ (например, для создания различных программных компонент, к которым изначально не предъявляются требования оценивания

соответствия [9]). Проблема заключается в поиске сочетания экспертиз, обеспечивающего взаимную компенсацию недостатков и максимальное усиление достоинств. Вершины треугольника символизируют полюса экспертиз (см. рис. 6). Точка «Б» внутри треугольника либо точка «А» на его стороне символизируют некоторое частное предпочтительное сочетание экспертиз.

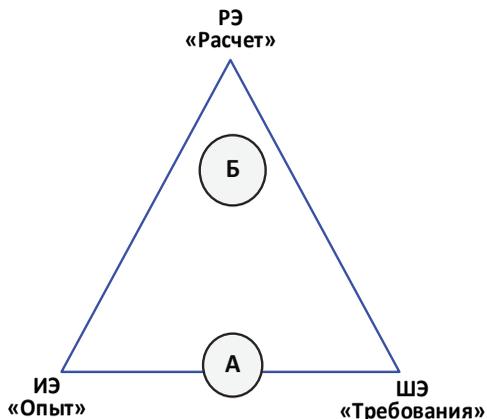


Рис. 6. Схема экспертиз оценки соответствия

Легко заметить, что подавляющее большинство проектов (работ) в области создания защищенных ИТ проходят экспертизу ИЭ, и лишь некоторые демонстрируют результаты прохождения ШЭ. Этот вывод, высказанный ранее [10, 11], можно подтвердить доступными актуальными данными: в частности, в отчете [2] показано, что организации, внедряющие изначально безопасность в ЖЦ ПО, демонстрируют лучшие результаты в обеспечении ИБ. Такие же данные приводятся в отчете [43] о формальном соответствии требованиям известных стандартов ISO/IEC. В простейшем случае ШЭ выполняется по требованиям ФСТЭК России и/или ФСБ России, для более серьезных проектов ШЭ выполняется по требованиям функциональной безопасности (Safety Integrity Level, SIL) дополнительно [44-46]. Точку сочетания экспертиз технически необходимо сдвинуть со стороны ИЭ-ШЭ внутрь треугольника в направлении вершины РЭ (точка «Б»), добавив точный расчет и формируя область оптимума для конкретных применений (рис. 7).

В качестве критериев предлагается рассматривать существующие международные стандарты ISO и/или ISO/IEC и их национальные аналоги в системе ГОСТ Р. С учетом исходных данных,

эти критерии можно сопоставить по рассмотренным выше полюсам. Состояние российских ИЭ и ШЭ, к сожалению, далеко от необходимого уровня, диктуемого современными вызовами противоборствующих сторон, в том числе для рассматриваемых облачных сервисов. Именно поэтому для России очень важна «подвижка» точки сочетания экспертиз от стороны треугольника ИЭ-ШЭ в направлении вершины РЭ. Для этой цели в России могут применяться национальные ГОСТ Р ИСО/МЭК, для наполнения полюса ШЭ:

- ISO/IEC серии 15408 [38-40];
- ISO/IEC серии 27001 [47];
- ISO/IEC серии 27005 [48].

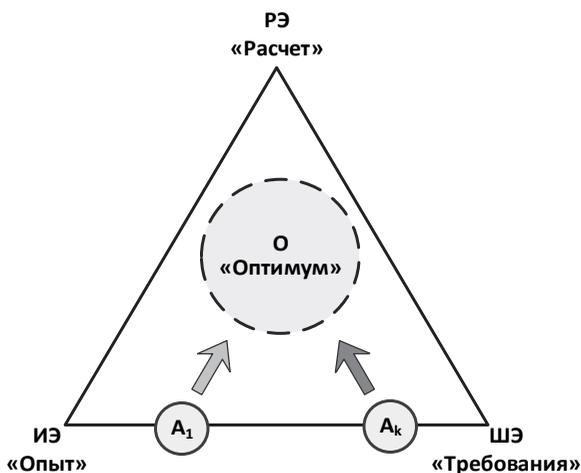


Рис. 7. Поиск оптимума видов экспертиз

Необходимо отметить, что ISO/IEC серии 15408 может быть использован не только для полюса ШЭ, но и для полюса РЭ, что обусловлено достаточно мелкой ценой деления и заложенной возможностью практически любой адаптации различных множеств требований ФБ и требований доверия к безопасности под текущие потребности для конкретных решений (рис. 8).

Отметим сопоставление нотаций ИСО/МЭК 27001 и ИСО/МЭК 15408 – почти по всем основным сущностям (объект, состав, риски, меры защиты) наблюдаются аналогии, что может быть эффективно применено на практике при выполнении оценки соответствия установленным критериям.

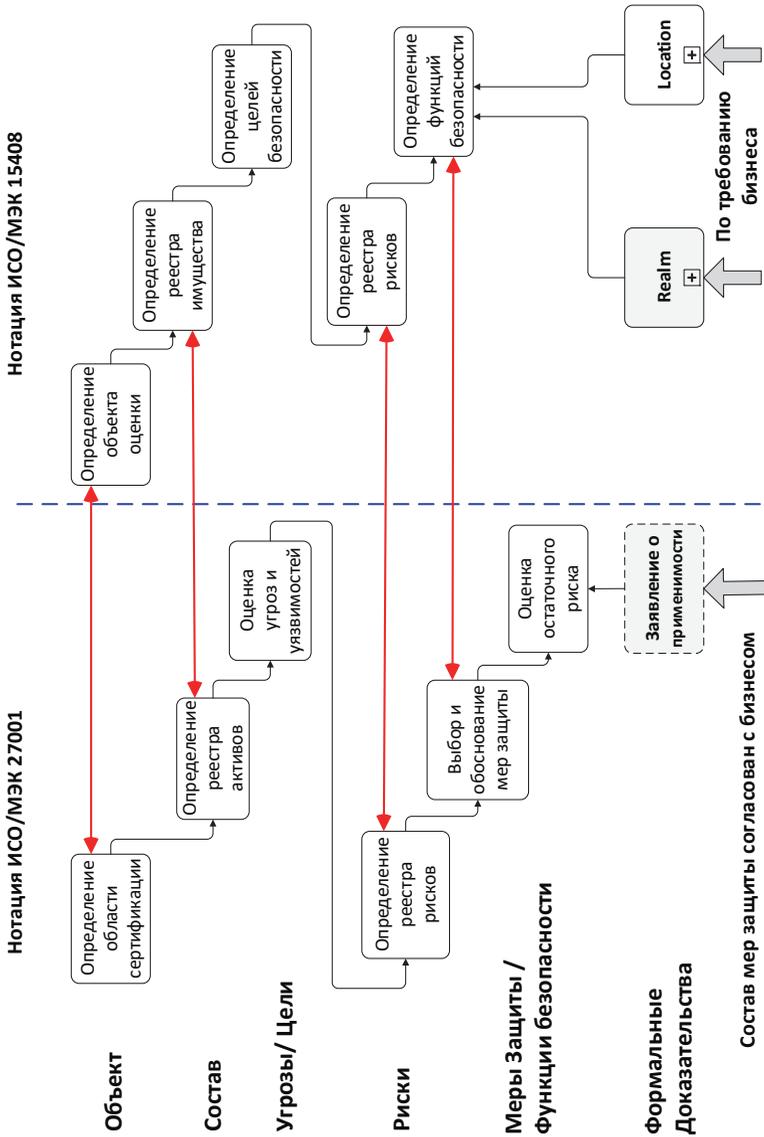


Рис. 8. Сопоставление компонент ISO/МЭК 27001 и ISO/МЭК 15408

В качестве ограничений, прежде всего, рассматриваются ограничения множества ФБ, которые могут быть выбраны из существующих стандартов и применены для обеспечения безопасности ИТ-компонент, ограничения компетенций привлекаемых экспертов для получения достоверных результатов процесса оценивания соответствия установленным критериям и ограничения времени, установленные в ряде НМД для оценки значимых объектов КИИ. В качестве двух важнейших допущений рассматриваются возможность метода формировать воспроизводимые и объективные оценки рисков безопасности для облачных ИТ-компонент, которые могут быть предъявлены для проверки независимой группе оценщиков, и возможность надежной и независимой верификации данных статистики по ряду проектов для оценки априорных вероятностей угроз ИБ.

4. Описание метода. В предлагаемом методе оценивания безопасности облачных ИТ-компонент вероятности реализации угроз ИБ исчисляются на основании статистических данных, в отличие от установленных в НМД России. Соответственно, в существующих НМД России не обеспечивается логическая цепочка зависимости от сформированного исходного множества угроз ИБ, полученных далее оценок актуальности этих угроз ИБ, результативности применения рекомендованных средств защиты информации (в том числе сертифицированных), до принятия финального решения об общем уровне обеспечения безопасности ИТ. В новом методе оценивания безопасности облачных ИТ-компонент предполагается рассмотрение ОО как функционирующего в установленных границах (Trusted boundaries, ТВ), определяемых на модели СОИ. Именно ТВ ставятся в соответствие, с одной стороны, требования ФБ, требования доверия к безопасности [38-40] и требования к менеджменту ИБ [37, 47] (таблица 3), а с другой стороны, СОИ, в которых реализуются ТВ.

В новом методе оценивания безопасности облачных ИТ-компонент дополнительно могут быть включены требования ФБ (таблица 4). Отметим, что дополнение мер обеспечения ИБ из ISO/IEC серии 27001 [47] требованиями ФБ из IEC серии 61508 ([44-46]) позволяет оценить аспекты безопасности применяемых ИТ-компонент по всей вертикали стека ISO/OSI.

ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

Таблица 3. Меры обеспечения ИБ для облачных сервисов

ISO/IEC 27001 (Приложение А)	Наименование меры обеспечения ИБ
A.6.1.1	Роли и ответственность в рамках ИБ
A.7.1.1	Проверка благонадежности
A.7.2.2	Осведомленность по ИБ, обучение и инструктажи
A.8.1.1	Инвентаризация активов
A.8.2.3	Приемлемое использование активов
A.9.2.2	Инициализация доступа пользователя
A.9.4.1	Ограничение доступа к информации
A.10.1.1	Политика использования средств криптографии
A.11.2.4	Техническое обслуживание оборудования
A.12.1.2	Управление изменениями
A.12.1.3	Управление мощностями
A.12.3.1	Резервируемая информация
A.13.2.4	Соглашение о неразглашении информации
A.16.1.2	Оповещение о событиях ИБ
A.16.1.5	Реагирование на инциденты ИБ
A.17.1.2	Внедрение непрерывности ИБ
A.18.2.1	Независимый пересмотр (аудит) ИБ
A.18.2.2	Соответствие политикам безопасности и стандартам
A.18.2.3	Проверка соответствия техническим требованиям

Таблица 4. Требования функциональной безопасности для облачных сервисов

№	Стандарт	Требование
1.	п. 1.2 g) 61508-1	Спецификации требований безопасности систем, связанных с безопасностью, могли быть определены на основе систематического анализа рисков
2.	п. 6.2.1 61508-1	Организация, ответственная за систему, связанную с безопасностью, или за одну или несколько стадий ЖЦ всей системы безопасности, должна выделить ... сотрудников, несущих полную ответственность за: <ul style="list-style-type: none"> – координацию действий, связанных с безопасностью, которые выполняются на этих стадиях; – взаимодействие между этими стадиями и другими стадиями, выполняемыми другими организациями; – удостоверение того, что функциональная безопасность достигнута и продемонстрировано соответствие целям и требованиям настоящего стандарта

Продолжение таблицы 4.

3.	п. 6.2.14 61508-1	<p>Соответствие компетентности должно рассматриваться для конкретной области применения с учетом всех факторов, включая:</p> <ul style="list-style-type: none"> – возможные последствия в случае отказа систем, связанных с безопасностью; – уровни полноты безопасности систем, связанных с безопасностью; – инженерные знания в области безопасности, соответствующие применяемой технологии; – знание законодательной базы и нормативно-правовой базы в области безопасности
4.	п. 7.3.2.2 61508-2	<p>При планировании подтверждения соответствия системы, связанной с безопасностью, должны быть использованы:</p> <ul style="list-style-type: none"> – требования, определенные в спецификации требований к системе безопасности и в спецификации требований к проектированию системы; – процедуры, применяемые для подтверждения соответствия полноте безопасности каждой функции безопасности по критериям «прошла испытания/не прошла испытания»; – процедуры оценочных испытаний (с обоснованиями)
5.	п. 7.4.8.2 61508-3	<p>Проверки интеграции системы ПО должны определять:</p> <ul style="list-style-type: none"> – контрольные примеры и контрольные данные; – типы проверок, которые должны быть проведены; – условия тестирования, конфигурацию и программы; – условия, при которых проверка считается выполненной; – процедуры, которые необходимо выполнить, если проверка дала отрицательный результат

Метод оценивания безопасности облачных ИТ-компонент по критериям существующих стандартов предусматривает последовательность следующих этапов:

- структурирование ИТ, при этом выполняется структурирование всей совокупности ИТ-компонент, обеспечивающих автоматизацию бизнес-процессов, на несколько областей (R);
- структурирование физического пространства, при этом выполняется структурирование пространства, занимаемого ИТ-компонентами, на несколько локаций (L);
- формирование модели СОИ, при этом определяется необходимое количество моделей;

– определение проблемы безопасности, при этом последовательно определяются угрозы ИБ, политики безопасности и предположения безопасности для заданной среды функционирования;

– определение целей безопасности, при этом предоставляется краткое изложение предполагаемого решения проблемы, определенной ранее. Обосновывается заключение, что если все цели безопасности достигнуты, то ранее определенная проблема безопасности решена, всем выявленным угрозам обеспечено эффективное противостояние, а предположения безопасности реализованы.

Угрозы, которым должна противостоять СОИ, определяются по реестру рисков (например, по возрастанию значимости [48]). Реестр рисков либо формируется по модели СОИ, либо используется уже существующий в организации [42, 49]. Однако следует принять во внимание, что объемные каталоги и таксономии сотен угроз, применение которых определено в действующих НМД регуляторов, уже не имеют практического применения, как 20-30 лет назад. В частности, это определяется незначительной долей известных уязвимостей, через которые реально можно реализовать угрозы: по данным [50], только 2-5% от всех критических уязвимостей действительно эксплуатируются в реальных атаках. Схожие данные показаны в [51]: только 5,5% уязвимостей используются в реальных атаках (из 76 тыс. багов, выявленных в период с 2009 по 2018 гг., эксплуатировались лишь около 4 тыс., и только для половины из этих 4 тыс. уязвимостей были свободно доступны эксплойты). По данным [52], доля уязвимостей, для которых реально есть эксплойты, всего лишь 1,4%. Здесь необходимо сделать отступление и акцентировать внимание на том, что угрозы определяются именно через риски вне зависимости от отраслевой принадлежности (финансы, транспорт, промышленность, здравоохранение, ИТ) [44-46]. Практикуемое в России формирование фиксированных моделей угроз ИБ свидетельствует об игнорировании международного опыта (ISO, NIST, FIPS, IATA и пр.) [53]. В результате оценивания безопасности облачных ИТ-компонент по новому методу бизнес получает документальные свидетельства достаточности и корректности контрмер [47]. Достаточность контрмер определяется в измеряемых единицах – ФБ, сопоставленных с ТВ [38-40]. Корректность контрмер определяется в измеряемых единицах – требованиях доверия к безопасности и требованиях к менеджменту ИБ, в точном соответствии с критериями существующих стандартов. Достаточные и корректные контрмеры обеспечивают минимизацию риска (остаточного риска) для активов. Таким образом, достигается «доверие через оценку». Этот процесс дает воспроизводимые и объективные свидетельства

оценивания СОИ, которые могут быть предъявлены для проверки независимой группе оценщиков, имеющих должную квалификацию. Отчет об оценивании, выраженный в измеряемых величинах, является веским аргументом в пользу безопасности ИТ-компонент, а также облачных ИТ-компонент. При этом метод оценивания безопасности облачных ИТ-компонент опирается на национальные стандарты ГОСТ Р [44-46] в России, которые соответствуют международным стандартам ISO и/или ISO/IEC. Дополнительным преимуществом использования критериев существующих стандартов является возможность оперировать отчетом оценки в интересах бизнеса в пределах и российской, и зарубежных юрисдикций.

5. Практические результаты исследования. Рассмотрим пример применения метода оценивания безопасности облачных ИТ-компонент по критериям существующих стандартов. Известно, что заложенная в стандартах [38-40] гибкость допускает применение множества методов оценки по отношению к множеству свойств безопасности ИТ-продуктов, а также указанные стандарты позволяют существенно упростить процесс оценивания безопасности для ОО, например, при описании границ доверия (ТВ), процессов (Р), целей и предположений безопасности. На рисунке 9 представлен пример описания облачного сервиса в новой нотации, в котором указаны процессы, выполняющие обработку информации в составе СОИ и взаимодействующие либо с процессами, либо с конечными сущностями (*External Entity*, EE). Соответственно, для оценивания рисков (и остаточных рисков [47, 48]) новый метод позволяет проследить не сам отдельный факт инцидента ИБ (в действительности, только с его дискретной вероятностью и последствиями), а факт наличия в нужном месте последовательности реализованных (встроенных) ТВ для СОИ как достаточной оцениваемой преграды для инцидентов ИБ.

В данном примере показано, что в локации L4 в единой области R4.1 размещены несколько критичных процессов (P5 – P7) СОИ, доступ к которым предоставляется только по защищенным каналам (пара ТВ1.1 и ТВ 4.1, соответственно, в областях R1.1 и R 4.1). Обратим внимание, что указанная пара на практике может быть реализована как VPN (например, на базе российских или зарубежных решений). При этом конкретные VPN-решения для указанной пары могут иметь сертификацию (например, в системе ФСБ России или FIPS 140-2), допускать резервирование (например, основной канал – проводной и резервный – спутниковый), но описание СОИ и суть выполнения оценки через доверие от этого не меняются.

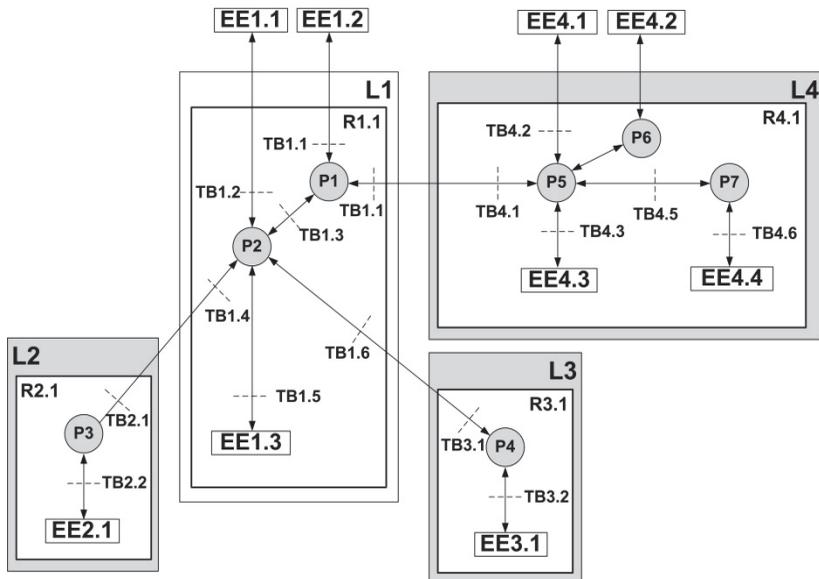


Рис. 9. Пример описания облачного сервиса

Также обратим внимание, что бизнес-заказчик может принять во внимание свои резоны при проектировании особо защищенного доступа к облачным сервисам, например обеспечивая единый доступ к провайдеру только одним внешним каналом (рассмотренная выше пара ТВ1.1 и ТВ 4.1) и реализуя собственными силами и по своим регламентам внутренние защищенные коммуникации – например, пары ТВ1.6 и ТВ 3.1 и пары ТВ1.4 и ТВ 2.1. Практически это означает применение различных программных (программно-аппаратных) решений для построения множества каналов VPN, соответствующих как национальным требованиям (сертифицированные в ФСБ России средства криптографической защиты информации), так иным криптографическим стандартам (например RSA и 3DES) для защищенных коммуникаций с зарубежными партнерами. С другой стороны, бизнес-заказчик надежно контролирует через «свои» ТВ (ТВ1.2, ТВ 1.1, ТВ 1.5, ТВ 2.2 и ТВ3.2) только «свои» ЕЕ (в частности, ЕЕ1.1, ЕЕ1.2, ЕЕ1.3, ЕЕ2.1 и ЕЕ3.1), но вынужден доверять провайдерам облачных сервисов в локации L4 в части обеспечения безопасного доступа к потенциально недоверенным ЕЕ4.1, ЕЕ4.2, ЕЕ4.3 и ЕЕ4.4. Следует предположить, что и «чужие» ЕЕ могут, в свою очередь, контролироваться далее в цепочке провайдерами других облачных сервисов в следующих потенциально недоверенных

локациях и, следовательно, необходимо учесть «эффект домино». Однако на практике такие риски хорошо идентифицируются и парируются на базе известных мер безопасности из [47, 48] и известных требований к поставщикам [44-46], что позволяет бизнесу применять SLA и формировать процедуры оценки соответствия указанным критериям. Можно отметить предположения безопасности, что все указанные EE4.* в локации L4 оснащены достаточным количеством эффективных ТВ, находящихся под определенным и разумным контролем провайдера, и это может быть объективно подтверждено в установленном порядке аудита [47].

Можно отметить, что метод оценивания безопасности облачных ИТ-компонент по критериям существующих стандартов отличается важным преимуществом – возможностью вычислять априорные риски с учетом множества угроз ИБ, характерных для каждой конкретной ИТ-компоненты и в целом для СОИ. Это преимущество может быть весьма ценным и в российской юрисдикции (ФСБ России или ФСТЭК России), и в международной (ISO/IEC серии 15408 или IEC серии 61508 и/или 61511). Например, при исследовании оценок рисков безопасности для современного морского порта такими ИТ-компонентами могут быть промышленные контроллеры Honeywell котельной и очистных сооружений, станции промышленной сети Wi-Fi Huawei и прочие. Для оценивания рисков ИБ применялись компоненты «ущерб» (*size of impact*) и «вероятность» (*probability*), точно так же, как и при определении риска (остаточного риска) [47, 48]. Владелец СОИ определяет необходимый уровень детализации, в частности фиксируются ТВ, контекст, меры (средства) обеспечения ИБ и прочее. Соответственно, все оценки для СОИ формируются в расчетных (проверяемых) оценках вероятности надежной и бесперебойной работы. Например, для терминалов промышленной сети Wi-Fi могут быть определены статистические данные отказов, основанные как на данных владельца, собирающего информацию об инцидентах ИБ (FW, SIEM, IPS/IDS, SOC и пр.), так и поставщиков в данном конкретном регионе с учетом температурно-влажностного режима.

Количественная оценка рисков СОИ для одной j -угрозы области R_i вычисляется следующим образом:

$$R_{ij} = \frac{V_{ij}^k \cdot S_{ij}^n}{V^{max} \cdot S^{max}}, \quad (1)$$

где $V_{ij}^{(k)}$ – априорная вероятность реализации j -угрозы в области R_i ; $S_{ij}^{(n)}$ – априорное значение ущерба j -угрозы в области R_i ; V^{max} – максимальная

величина вероятности реализации угрозы; S^{max} – максимальная априорная величина ущерба реализации угрозы; k – максимальное значение вероятности (количественная оценка вероятности); n – максимальное значение ущерба (количественная оценка ущерба).

Установлены ограничения при расчете по формуле (1):

$$0 \leq R_{ij} \leq 1; V^{(k)}_{ij} \leq k; S^{(n)}_{ij} \leq n.$$

Значения аргументов $V^{(k)}_{ij}$ и $S^{(n)}_{ij}$, как и значения максимальных величин V^{max} и S^{max} в (1), определяются в общем случае владельцем соответствующих ИТ-компонент или в простейшем случае – владельцем СОИ. Как показано ранее, одной из отличительных особенностей нового метода оценивания безопасности облачных ИТ-компонент является возможность вычислять априорные риски с учетом множества угроз ИБ, характерных для каждой конкретной ИТ-компоненты и в целом для СОИ. Например, для примера морского порта принимались оценки на базе априорных значений по каждому ИТ-компоненту за пятилетний период наблюдений, а диапазон значений вероятности V^{max} и ущерба S^{max} при реализации угроз ИБ определены для V^{max} от 0 до 1 и для S^{max} от 0 до 3 соответственно. Эти же данные впоследствии применялись и в процессе категорирования данного объекта по требованиям КИИ (ФЗ-187), в частности, в соответствии с постановлением Правительства № 127 (п. 10 е) в качестве исходных данных учитывались статистические данные о компьютерных инцидентах, произошедших ранее. В таблице 5 представлен пример расчета рисков от 5 угроз ИБ для ИТ-компонент, размещенных в области R_4 локации L4 (см. рис. 9).

В таблице 5 представлены наиболее значимые угрозы (на основании Приложения С [48]), которые можно ожидать для каждой из четырех областей (R_i) в полной совокупности рассматриваемых локаций (L). Именно по этой причине индексы процессов P определены от 1 до 7, но в данной конкретной в области $R_{4.1}$ (локации L4) рассматриваются только 3 процесса: P_5 , P_6 и P_7 . Значение вероятности (V) находится в диапазоне (0;1), значение ущерба (S) находится в диапазоне (0;3), значения R_j (для одной угрозы) и R_{apri} (общий) находятся в диапазоне (0;1). Критерий принятия риска для данного конкретного примера (R_{cr}) определен как 10%.

Таблица 5. Пример расчета рисков реализации угроз

Угроза	Уязвимость	P (1;7)	V_{4j} (0;1)	S_{4j} (0;3)	R_{4j} (0,1)	R_{cr} (10%)	ТВ
Подслушивание	Плохой менеджмент паролей	P_5	0,50	2	0,33		A.10.1.1. A.12.1.2
Злоупотребление правами	Незащищенное хранение	P_7	0,25	2	0,17		A.9.2.2 A.16.1.2
Отказ телекоммуникационного оборудования	Единственная точка отказа	P_5	0,25	1	0,08	ОК	A.10.1.1 A.17.1.2
Преступное использование ПО	Недостатки найма персонала	P_6	0,05	3	0,05	ОК	A.8.1.2 A.16.1.2
Незаконная обработка данных	Малое число ревизий	P_7	0,05	2	0,03	ОК	A.9.4.1 A.18.2.3

Необходимо дать некоторые пояснения по расчету отдельных рисков для конкретных угроз R_{4j} : для угрозы «преступное использование ПО» (например, при обеспечении процесса бухгалтерского учета) вероятность реализации угрозы определена $V^{(1)}_4 = 0,05$, уровень величины ущерба составляет $S^{(3)}_4 = 3$ (максимальный), что по формуле (1) при $V^{max} = 1$ и $S^{max} = 3$ позволяет определить значение риска $R_{41} = 0,05$. Следует отметить, что вероятность $V^{(1)}_4 = 5\%$ получена ранее на основе статистики в ряде проектов, и такие же данные представлены в [23], то есть все эти исходные данные могут быть верифицированы надежно и независимо. После оценки всех R_{4j} (для каждой j -угрозы) по таблице 5 следует, что значимых рисков только 2 (соответственно, R_{41} и R_{42}).

Далее выполняется определение количественной оценки риска R_{apri} для СОИ по формуле:

$$R_{apri} = \frac{1}{j} \sum_{j=1}^m R_{ij} \cdot K_j, \quad (2)$$

где R_{apri} – оценка априорного риска в области R_i ; R_{ij} – оценка риска для j -угрозы в области R_i ; K_j – весовой коэффициент критичности (значимости) риска в области R_i ; m – количество рисков в области R_i , превышающих R_{cr} .

Установлены ограничения при расчете по формуле (2):

$$0 \leq R_{apr\ i} \leq 1; \sum K_j = 1.$$

Для данного примера СОИ априорный риск в области R4.1 (локации L4) R_{apr} составит 12,5% (при допущении $K_1 = K_2 = 0,5$):

$$R_{apr\ 4} = \frac{1}{2}(R_{41} \cdot K_1 + R_{42} \cdot K_2) = \frac{1}{2}(0,33 \cdot 0,5 + 0,17 \cdot 0,5) = 0,125.$$

Очевидно, может возникнуть вопрос, как отличались бы риски, рассчитанные по формулам (1) и (2), при тех же угрозах ИБ для ИТ-компонентов распределенной СОИ, например, находящейся под полным контролем бизнеса, без использования облачных сервисов. Ответ может быть следующий: для точного результата и сопоставления результатов по предложенному методу оценивания безопасности облачных ИТ-компонент необходимы данные реализованных мер защиты (в частности, ТВ), отражающие текущий уровень безопасности. Например, для рассмотренной распределенной СОИ при допущении более строгих мер контроля, в том числе встроенных ФБ (см. табл. 4) в применяемое ПО и дополнительных процедур, реализованных по требованиям бизнеса, можно ожидать более низкий уровень величин ущерба $S^{(1)}_4$ и $S^{(2)}_4$. Но в любом случае это предположение должно быть проверено в рамках выполняемого периодического оценивания (аудита) до принятия решения о переходе к облачным сервисам.

6. Заключение. Проблема обеспечения безопасности ИТ-компонент, в том числе обеспечения информационной безопасности объектов, использующих облачную инфраструктуру, в настоящий момент является весьма важной. Представлены результаты анализа известных методов обеспечения безопасности и оценивания степени обеспечения информационной безопасности отдельных ИТ-компонент. В статье предложен новый метод оценивания безопасности облачных ИТ-компонент на базе ранее разработанной гибридной методики с использованием формальных процедур, основанных на двух системах критериев – оценивании степени соответствия систем менеджмента (на базе ИСО/МЭК серии 27001) и оценивании требований функциональной безопасности (на базе МЭК серии 61508 и ИСО/МЭК серии 15408). Данный метод позволяет получить воспроизводимые и объективные оценки рисков безопасности

облачных ИТ-компонент, которые могут быть представлены для проверки независимой группе оценщиков. Полученные результаты могут быть применимы при формировании независимой оценки объектов критической информационной инфраструктуры.

Литература

1. *Лившиц И.И., Неклюдов А.В.* Применение гибридной методик при оценке безопасности информационных технологий для сложных промышленных объектов // Менеджмент качества. 2018. № 1. С. 48–61.
2. Six Pillars of DevSecOps. URL: <https://cloudsecurityalliance.org/artifacts/cloud-security-complexity> (дата обращения: 10.03.2020).
3. The 2019 Study on the Cyber Resilient Organization // Ponemon Institute. 2019. URL: <https://www.techrepublic.com/resource-library/whitepapers/2019-ponemon-institute-study-on-the-cyber-resilient-organization/> (дата обращения: 10.03.2020).
4. *Malladi A., Pothuri S.* A study on technologies in Cloud-based design and manufacturing // International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development. 2018. vol. 8. no. 6. pp. 187–192.
5. *Souri A., Navimipour N.J., Rahmani A.M.* Formal verification approaches and standards in the Cloud computing: A comprehensive and systematic review // Computer Standards & Interfaces. 2018. vol. 58. pp. 1–22.
6. *Bologa R., Lupu A.R., Boja C., Georgescu T.M.* Sustaining employability: A process for introducing Cloud computing, big data, social networks, mobile programming and cybersecurity into academic curricula // Sustainability. 2017. vol. 9. no. 12. pp. 2235.
7. *Barrett M.P.* Framework for Improving Critical Infrastructure Cybersecurity // National Institute of Standards and Technology Gaithersburg. 2018.
8. *Moore T., Dynes S., Chang F.R.* Identifying How Firms Manage Cybersecurity Investment // Workshop on the Economics of Information Security (WEIS). 2016. pp. 1–27.
9. *McIntosh S., Kamei Y., Adams B., Hassan A.E.* The Impact of Code Review Coverage and Code Review Participation on Software Quality: A Case Study of the Qt, VTK, and ITK Projects // Proceedings of International Working Conference on Mining Software Repositories (MSR 2014). 2014. pp. 192–201.
10. *Лившиц И.И., Неклюдов А.В.* Гибридная методика оценки безопасности информационных технологий // Автоматизация в промышленности. 2017. № 7. С. 36–41.
11. *Лившиц И.И., Неклюдов А.В.* Гибридная методика безопасности информационных технологий для критически важных объектов энергетики // Энергобезопасность и энергосбережение. 2017. № 4. С. 5–11.
12. *Jeong C.Y., Lee S.Y.T., Lim J.H.* Information Security Breaches and IT Security Investments: Impacts on Competitors // Information & Management. 2019. vol. 56. no. 5. pp. 681–695.
13. *Oltsik J.* Cybersecurity Snippets. URL: <https://www.csoonline.com/article/3406475/must-have-features-in-a-modern-network-security-architecture.html> (дата обращения: 10.03.2020).
14. *Tan D.P. et al.* An Embedded Cloud Database service Method for distributed industry monitoring // IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2018. vol. 14. no. 7. pp. 2881–2893.
15. *Akbaripour H., Houshmand M., van Woensel T., Mutlu N.* Cloud manufacturing service selection optimization and scheduling with transportation consideration: mixed-integer programming model // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2018. vol. 95. no. 1–4. pp. 43–70.
16. *Kobayashi N., Kume S., Lenz K., Masuya H.* Riken metadatabase: A database platform for health care and life sciences as a microcosm of linked open data cloud //

- International Journal on Semantic Web and Information Systems. 2018. vol. 14. no. 1. pp. 140–164.
17. *Kumar M.M., Nandakumar A.N.* Exploring multilateral Cloud computing security architectural design debt in terms of technical debt // *Smart Innovation, Systems and Technologies*. 2018. vol. 78. pp. 567–579.
 18. *Jun Z.* A security architecture for Cloud computing alliance // *Recent Advances in Electrical and Electronic Engineering*. 2017. vol. 10. no. 3. pp. 195–201.
 19. Using standards to mitigate risks. URL: https://www.dhs.gov/sites/default/files/publications/2018_AEP_Artificial_Intelligence.pdf (дата обращения: 10.03.2020).
 20. Жукова К. Хакеры открыли базы. URL: https://www.kommersant.ru/doc/3939724?from=four_tech (дата обращения: 10.03.2020).
 21. Обзор: Рынок ИТ-услуг. URL: http://www.cnews.ru/reviews/rynok_ituslug_2018/articles/vse_kak_servis_rynok_ituslug_rastet_ne_tolko_v_dengah (дата обращения 10.03.2020).
 22. Rise of Legitimate Services for Backdoor Command and Control. URL: <https://www.anomali.com/resources/anomali-labs-reports/rise-of-legitimate-services-for-backdoor-command-and-control> (дата обращения: 10.03.2020).
 23. Threats are rising. URL: [cisco.com/c/m/en/au/products/security/offers/cybersecurity-reports.html](https://www.cisco.com/c/m/en/au/products/security/offers/cybersecurity-reports.html) (дата обращения: 10.03.2020).
 24. Исследование утечек конфиденциальной информации через незащищенные облачные хранилища. URL: https://www.infowatch.ru/sites/default/files/report/analytics/russ/InfoWatch_Report_open_servers_2016_2018.pdf?rel=1 (дата обращения: 10.03.2020).
 25. *Crowley C.* Common and Best Practices for Security Operations Centers Survey. URL: <https://www.sans.org/media/vendor/Common-and-Best-Practices-for-Security-Operations-Centers.pdf> (дата обращения: 10.03.2020).
 26. *Bangui H. et al.* Multi-criteria decision analysis methods in the mobile Cloud offloading paradigm // *Journal of Sensor and Actuator Networks*. 2017. vol. 6. no. 4. pp. 25.
 27. The State of Threat Detection Report 2019. URL: <https://www.fidelissecurity.com/resource/report/threat-detection-2019> (дата обращения: 10.03.2020).
 28. Отсутствие автоматизации остается главной проблемой для безопасников. URL: <https://www.securitylab.ru/news/500340.php> (дата обращения: 10.03.2020).
 29. Strategic planning guides for leaders across the enterprise. URL: <https://www.gartner.com/en/insights/strategic-planning>, (дата обращения: 03.03.2020).
 30. Forrester оценила поставщиков решений для реализации стратегии ZTX. URL: <https://www.securitylab.ru/news/496550.php> (дата обращения: 03.03.2020).
 31. Zero Trust redefines security in a perimeter-less world. URL: <https://www.mobileiron.com/en/solutions/zero-trust> (дата обращения: 03.03.2020).
 32. *Hudic A., Smith P., Weippl E.R.* Security assurance assessment methodology for hybrid Cloud // *Computers & Security*. 2017. vol. 70. pp. 723–743.
 33. *Yin C. et al.* Code: An Erasure Code algorithm for big data storage system // *Journal of University of Science and Technology of China*. 2016. vol. 46. no. 3. pp. 188–199.
 34. *Goyal T. et al.* Big data handling over Cloud for internet of things // *International Journal of Information Technology and Web Engineering*. 2018. vol. 13. no. 2. pp. 37–47.
 35. The Forrester Wave™: Zero Trust eXtended (ZTX) Ecosystem Providers, Q4 2018. URL: <https://reprints.forrester.com/?fbclid=IwAR3iPICwQnteW1BF7VgoISlz0P2d5nVB11aoQsrEqYbHu4R2USf6wrFUG7w#/assets/2/219/RES141666/reports> (дата обращения: 03.03.2020).
 36. 5 Key Findings from Forbes Insights' 2019 Cybersecurity Survey. URL: <https://www.vmware.com/radius/forbes-insights-cybersecurity-strategy-report> (дата обращения: 03.03.2020).

37. ГОСТ Р ИСО/МЭК 15408-1 – 2012 Информационная технология. Методы и средства обеспечения безопасности. Критерии оценки безопасности информационных технологий. Часть 1. Введение и общая модель // М.: ФАТРИМ. 2012.
38. ГОСТ Р ИСО/МЭК 15408-2 – 2013 Информационная технология. Методы и средства обеспечения безопасности. Критерии оценки безопасности информационных технологий. Часть 2. Функциональные компоненты безопасности // М.: ФАТРИМ. 2013.
39. ГОСТ Р ИСО/МЭК 15408-3 – 2013 Информационная технология. Методы и средства обеспечения безопасности. Критерии оценки безопасности информационных технологий. Часть 3. Компоненты доверия к безопасности // М.: ФАТРИМ. 2013.
40. *Лившиц И.И.* Проектирование, создание и внедрение комплексных систем обеспечения информационной безопасности на базе ISO/IEC 27001:2005 // Электросвязь. 2010. № 4. С. 49–51.
41. *Лившиц И.И., Лившиц Н.В.* Подходы к синтезу моделей систем менеджмента информационной безопасности при оценке утечек конфиденциальных данных // Лизинг. 2013. № 3. С. 70–80.
42. State of Application Security: Balancing Speed and Risk. URL: <https://www.sans.org/reading-room/whitepapers/analyst/2017-state-application-security-balancing-speed-risk-38100> (дата обращения: 10.03.2020).
43. ГОСТ Р МЭК 61508-1—2012 «Функциональная безопасность систем электрических, электронных, программируемых электронных, связанных с безопасностью. Часть 1. Общие требования». 2012.
44. ГОСТ Р МЭК 61508-2—2012 «Функциональная безопасность систем электрических, электронных, программируемых электронных, связанных с безопасностью. Часть 2. Требования к системам». 2012.
45. ГОСТ Р МЭК 61508-3—2018 «Функциональная безопасность систем электрических, электронных, программируемых электронных, связанных с безопасностью. Часть 3. Требования к программному обеспечению». 2018.
46. *Schweizerische S.N.V.* Information technology-Security techniques-Information security management systems-Requirements //ISO/IEC International Standards Organization. 2013.
47. ISO/IEC 27005-2018 Information technology — Security techniques — Information security risk management, International Organization for Standardization. 2011. 68 p.
48. *Лившиц И.* Система менеджмента информационной безопасности по международным стандартам // Управление качеством. 2011. № 9. С. 6–11.
49. Представлена система оценки вероятности использования уязвимостей в реальных атаках. URL: <https://www.securitylab.ru/news/500398.php> (дата обращения: 10.03.2020).
50. Только 5,5% уязвимостей используются в реальных атаках. URL: <https://www.securitylab.ru/news/499359.php> (дата обращения: 10.03.2020).
51. Improving Vulnerability Remediation Through Better Exploit Prediction. URL: https://weis2019.econinfosec.org/wp-content/uploads/sites/6/2019/05/WEIS_2019_paper_53.pdf (дата обращения: 10.03.2020).
52. Artificial Intelligence: Potential Benefits and Ethical Considerations. URL: [http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2016/571380/IPOL_BRI\(2016\)571380_EN.pdf](http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2016/571380/IPOL_BRI(2016)571380_EN.pdf) (дата обращения: 10.03.2020).

Лившиц Илья Исифович — д-р техн. наук, доцент, факультет безопасности информационных технологий, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики (НИУ ИТМО). Область научных интересов: системный анализ, защита информации, риск-менеджмент. Число научных публикаций — 90. Livshitz.il@yandex.ru; ул. Ломоносова, 9, 191002, Санкт-Петербург, Россия; р.т.: +7 812 934-48-46.

I. LIVSHITZ
**METHOD FOR EVALUATING SECURITY OF CLOUD IT-
COMPONENTS BASED ON EXISTING STANDARDS CRITERIA**

Livshits I. Method for Evaluating Security of Cloud IT-Components based on Existing Criteria.

Abstract. The analysis of well-known methods for ensuring IT-security is presented, methods for evaluating security of IT-components and Cloud services in general are considered.

An attempt to analyze cloud services not from a commercial position of a popular marketing product, but from a position of system analysis is made. The previously introduced procedure for IT-components evaluation is not stable, since the end user has not a 100% guarantee of access to all IT-components, and even more so to the remote and uncontrolled Cloud service. A number of reviews point at increased efforts to create a secure network architecture and ability to continuously monitor deviations from established business goals. In contrast to the Zero Trust and Zero Trust eXtended models, according to which additional security functions are superimposed on existing IT-components, it is proposed to consider the set of IT-components as a new entity – an Information Processing System. This allows moving to formal processes for assessing the degree of compliance with the criteria of standards for both existing and prospective IT-components while ensuring security of Cloud services.

A new evaluation method based on the previously developed hybrid methodology using formal procedures based on two systems of criteria - assessment of the degree of compliance of Management systems (based on ISO/IEC 27001 series) and assessment of functional safety requirements (based on IEC 61508 series and ISO/IEC 15408 series) is proposed. This method provides reproducible and objective assessments of security risks of Cloud-based IT-components that can be presented to an independent group of evaluators for verification. The results obtained can be applied in the independent assessment, including critical information infrastructure objects.

Keywords: Management System, Risk, Information Technology, IT-security, Audit, Standard, Expertise, Assessment.

Livshitz Ilya — Ph.D., Dr.Sci., Associate Professor, Faculty of Secure Information Technologies, ITMO University (Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics). Research interests: system analyses, IT-security, risk-management. The number of publications — 90. Livshitz.il@yandex.ru; 9, Lomonosova str., 191002, St. Petersburg, Russia; office phone: +7 812 934-48-46.

References

1. Livshits I.I., Neklyudov A.V. [Application of hybrid methodology in the assessment of information technology security for complex industrial facilities]. *Menedzhment kachestva – Quality Management*. 2018. vol. 1. pp. 48–61. (In Russ).
2. Six Pillars of DevSecOps. Available at: <https://cloudsecurityalliance.org/artifacts/cloud-security-complexity> (accessed: 10.03.2020).
3. The 2019 Study on the Cyber Resilient Organization. Ponemon Institute. 2019. Available at: <https://www.techrepublic.com/resource-library/whitepapers/2019-ponemon-institute-study-on-the-cyber-resilient-organization/> (accessed: 10.03.2020).
4. Malladi A., Potluri S. A study on technologies in Cloud-based design and manufacturing. *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development*. 2018. vol. 8. no. 6. pp. 187–192.

5. Souri A., Navimipour N.J., Rahmani A.M. Formal verification approaches and standards in the Cloud computing: A comprehensive and systematic review. *Computer Standards & Interfaces*. 2018. vol. 58. pp. 1–22.
6. Bologa R., Lupu A.R., Boja C., Georgescu T.M. Sustaining employability: A process for introducing Cloud computing, big data, social networks, mobile programming and cybersecurity into academic curricula. *Sustainability*. 2017. vol. 9. no. 12. pp. 2235.
7. Barrett M.P. Framework for Improving Critical Infrastructure Cybersecurity. National Institute of Standards and Technology Gaithersburg. 2018.
8. Moore T., Dynes S., Chang F.R. Identifying How Firms Manage Cybersecurity Investment. Workshop on the Economics of Information Security (WEIS). 2016. pp. 1–27.
9. McIntosh S., Kamei Y., Adams B., Hassan A.E. The Impact of Code Review Coverage and Code Review Participation on Software Quality: A Case Study of the Qt, VTK, and ITK Projects. Proceedings of International Working Conference on Mining Software Repositories (MSR 2014). 2014. pp. 192–201.
10. Livshits I.I., Neklyudov A.V. [Hybrid method of information technology security assessment]. *Avtomatizatsia v promyshlennosti – Automation in industry*. 2017. vol. 7. pp. 36–41. (In Russ).
11. Livshits I.I., Neklyudov A.V. [Hybrid method of information technology security for critical energy facilities]. *Energobezopastnost' i Energoberezhenie – Energy Security and energy saving*. 2017. vol. 4. pp. 5–11. (In Russ).
12. Jeong C.Y., Lee S.Y.T., Lim J.H. Information Security Breaches and IT Security Investments: Impacts on Competitors. *Information & Management*. 2019. vol. 56. no. 5. pp. 681–695.
13. Oltsik J. Cybersecurity Snippets. Available at: <https://www.csoonline.com/article/3406475/must-have-features-in-a-modern-network-security-architecture.html> (accessed: 10.03.2020).
14. Tan D.P. et al. An Embedded Cloud Database service Method for distributed industry monitoring. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2018. vol. 14. no. 7. pp. 2881–2893.
15. Akbaripour H., Houshmand M., van Woensel T., Mutlu N. Cloud manufacturing service selection optimization and scheduling with transportation consideration: mixed-integer programming model. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018. vol. 95. no. 1-4. pp. 43–70.
16. Kobayashi N., Kume S., Lenz K., Masuya H. Riken metadatabase: A database platform for health care and life sciences as a microcosm of linked open data cloud. *International Journal on Semantic Web and Information Systems*. 2018. vol. 14. no. 1. pp. 140–164.
17. Kumar M.M., Nandakumar A.N. Exploring multilateral Cloud computing security architectural design debt in terms of technical debt. *Smart Innovation, Systems and Technologies*. 2018. vol. 78. pp. 567–579.
18. Jun Z. A security architecture for Cloud computing alliance. *Recent Advances in Electrical and Electronic Engineering*. 2017. vol. 10. no. 3. pp. 195–201.
19. Using standards to mitigate risks. Available at: https://www.dhs.gov/sites/default/files/publications/2018_AEP_Artificial_Intelligence.pdf (accessed: 10.03.2020).
20. Zhukova K. Hakery otkryli bazy [Hackers have opened the base]. Available at: https://www.kommersant.ru/doc/3939724?from=four_tech (accessed: 10.03.2020). (In Russ.).
21. Obzor: Rynok IT-uslug [Overview: IT Services Market]. Available at: http://www.cnews.ru/reviews/rynok_ituslug_2018/articles/vse_kak_servis_rynok_ituslug_rastet_ne_tolko_v_dengah (accessed: 10.03.2020). (In Russ.).

22. Rise of Legitimate Services for Backdoor Command and Control. Available at: <https://www.anomali.com/resources/anomali-labs-reports/rise-of-legitimate-services-for-backdoor-command-and-control> (accessed: 10.03.2020).
23. Threats are rising. Available at: cisco.com/c/m/en/au/products/security/offers/cybersecurity-reports.html (accessed: 10.03.2020).
24. Issledovanie utechek konfidencial'noj informacii cherez nezashchishchennye oblachnye hranilishcha [Research of personal data leakage from unprotected cloud storage]. Available at: https://www.infowatch.ru/sites/default/files/report/analytics/russ/InfoWatch_Report_o_pen_servers_2016_2018.pdf?rel=1 (accessed: 10.03.2020). (In Russ.).
25. Crowley C. Common and Best Practices for Security Operations Centers Survey. Available at: <https://www.sans.org/media/vendor/Common-and-Best-Practices-for-Security-Operations-Centers.pdf> (accessed: 10.03.2020).
26. Bangui H. et al. Multi-criteria decision analysis methods in the mobile Cloud offloading paradigm. *Journal of Sensor and Actuator Networks*. 2017. vol. 6. no. 4. pp. 25.
27. The State of Threat Detection Report 2019. Available at: <https://www.fidelissecurity.com/resource/report/threat-detection-2019> (accessed: 10.03.2020).
28. Otsustvie avtomatizacii ostaetsya glavnoj problemoj dlya bezopasnikov [The main problem still automation outstanding for IT-security personnel]. Available at: <https://www.securitylab.ru/news/500340.php> (accessed: 10.03.2020). (In Russ.).
29. Strategic planning guides for leaders across the enterprise. Available at: <https://www.gartner.com/en/insights/strategic-planning> (accessed 10.03.2020).
30. Forrester ocenila postavshchikov reshenij dlya realizacii strategii ZTX [Forrester was assessed the suppliers of ZTX]. Available at: <https://www.securitylab.ru/news/496550.php> (accessed: 10.03.2020). (In Russ.).
31. Zero Trust redefines security in a perimeter-less world. Available at: <https://www.mobileiron.com/en/solutions/zero-trust> (accessed: 03.03.2020).
32. Hudic A., Smith P., Weippl E.R. Security assurance assessment methodology for hybrid Cloud. *Computers & Security*. 2017. vol. 70. pp. 723–743.
33. Yin C. et al. Code: An Erasure Code algorithm for big data storage system. *Journal of University of Science and Technology of China*. 2016. vol. 46. no. 3. pp. 188–199.
34. Goyal T. et al. Big data handling over Cloud for internet of things. *International Journal of Information Technology and Web Engineering*. 2018. vol. 13. no. 2. pp. 37–47.
35. The Forrester Wave™: Zero Trust eXtended (ZTX) Ecosystem Providers, Q4 2018. Available at: <https://reprints.forrester.com/?fbclid=IwAR3iPICwQnteW1BF7VgoISlz0P2d5nVB1laoQsrEqYbHu4R2USf6wrFUG7w#/assets/2/219/RES141666/reports> (accessed: 03.03.2020).
36. 5 Key Findings from Forbes Insights' 2019 Cybersecurity Survey. Available at: <https://www.vmware.com/radius/forbes-insights-cybersecurity-strategy-report> (accessed: 03.03.2020).
37. GOST R ISO / IEC 15408-1 – 2012 [Information technology. Security techniques. Evaluation criteria for IT security. Part 1. Introduction and general model]. M.: FATRiM. 2012. (In Russ).
38. GOST R ISO / IEC 15408-2 – 2013 [Information technology. Security techniques. Evaluation criteria for IT security. Part 2. Security functional components]. M.: FATRiM. 2012. (In Russ).
39. GOST R ISO/IEC 15408-3 – 2013 [Information technology. Security techniques. Evaluation criteria for IT security. Part 3. Security assurance requirements]. M.: FATRiM. 2012. (In Russ).

40. Livshits I.I. [Design, creation and implementation of complex Information security systems based on ISO/IEC 27001:2005]. *Elektrosv'yaz – Telecommunication*. 2010. vol. 4. pp. 49–51. (In Russ).
41. Livshits I.I., Livshits N.V. [Approaches to the synthesis of models of Information Security Management Systems in the assessment of confidential data leaks]. *Lising – Leasing*. 2013. vol. 3. pp. 70–80. (In Russ).
42. State of Application Security: Balancing Speed and Risk. Available at: <https://www.sans.org/reading-room/whitepapers/analyst/2017-state-application-security-balancing-speed-risk-38100> (accessed: 10.03.2020).
43. GOST R ISO/IEC 61508-1-2012 [Functional safety of electrical, electronic, programmable electronic safety-related systems. Part 1. General requirements]. 2012. (In Russ.).
44. GOST R ISO/IEC 61508-2-2012 [Functional safety of electrical, electronic, programmable electronic safety-related systems. Part 2. Requirements for systems]. 2012. (In Russ.).
45. GOST R ISO/IEC 61508-3-2018 [Functional safety of electrical, electronic, programmable electronic safety-related systems. Part 3. Software requirements]. 2018. (In Russ.).
46. Schweizerische S.N.V. Information technology-Security techniques-Information security management systems-Requirements. ISO/IEC International Standards Organization. 2013.
47. ISO/IEC 27005-2018 Information technology — Security techniques — Information security risk management, International Organization for Standardization. 2011. 68 p.
48. Livshits I. [Information Security Management System according to International Standards]. *Menedzhment kachestva – Quality Management*. 2011. vol. 9. pp. 6–11. (In Russ).
49. Predstavlena sistema ocenki veroyatnosti ispol'zovaniya uyazvimostej v real'nyh atakah [System of likelihood assessment for vulnerabilities usage in real attach has been presented]. Available at: <https://www.securitylab.ru/news/500398.php> (accessed: 10.03.2020). (In Russ.).
50. Tol'ko 5,5% uyazvimostej ispol'zuyutsya v real'nyh atakah [Only 5,5 % vulnerabilities was implement in real attack]. Available at: <https://www.securitylab.ru/news/499359.php> (accessed: 10.03.2020). (In Russ.).
51. Improving Vulnerability Remediation Through Better Exploit Prediction. Available at: https://weis2019.econinfosec.org/wp-content/uploads/sites/6/2019/05/WEIS_2019_paper_53.pdf (accessed: 10.03.2020).
52. Artificial Intelligence: Potential Benefits and Ethical Considerations. Available at: [http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2016/571380/IPOL_BRI\(2016\)571380_EN.pdf](http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2016/571380/IPOL_BRI(2016)571380_EN.pdf) (accessed: 10.03.2020).

С.Ю. АНДРЕЕВ, Р.Б. ТРЕГУБОВ, А.Е. МИРОНОВ
**ЗАДАЧА ВЫБОРА ПРОПУСКНЫХ СПОСОБНОСТЕЙ
КАНАЛОВ СВЯЗИ ТРАНСПОРТНОЙ СЕТИ, УЧИТЫВАЮЩАЯ
РАЗБАЛАНСИРОВКУ ТРАФИКА РАЗЛИЧНОГО ПРИОРИТЕТА**

Андреев С.Ю., Трегубов Р.Б., Мионов А.Е. Задача выбора пропускных способностей каналов связи транспортной сети, учитывающая разбалансировку трафика различного приоритета.

Аннотация. Предлагается вариант решения задачи выбора пропускных способностей цифровых каналов связи транспортной сети, учитывающий разбалансировку трафика данных по приоритетам. Разработанный алгоритм выбора пропускных способностей гарантирует минимальные затраты на аренду цифровых каналов связи с оптимальной пропускной способностью при условии выполнения требований к качеству обслуживания протокольных блоков данных первого, второго и k -го приоритетов в разбалансированной по приоритетам транспортной сети связи. На первом этапе была разработана аналитическая модель транспортной сети связи, которая предполагает разбиение исходной сети на отдельные фрагменты, анализируемые независимо друг от друга с помощью систем массового обслуживания. На втором этапе с использованием множителей Лагранжа был разработан алгоритм выбора пропускных способностей цифровых каналов связи для сбалансированной по приоритетам транспортной сети связи. Высокое быстродействие данного алгоритма обеспечено за счет применения алгебраических операций над матрицами (сложение, умножение и др.). На третьем этапе с использованием обобщенного метода множителей Лагранжа было реализовано сравнение условных экстремумов функции затрат на аренду цифровых каналов связи для одиночных активных требований к качеству обслуживания протокольных блоков данных, для всех возможных пар активных требований к качеству обслуживания протокольных блоков данных, для всех возможных троек активных требований к качеству обслуживания протокольных блоков данных и так далее вплоть до случая, когда одновременно будут активны все требования. На четвертом этапе был рассмотрен пример решения задачи выбора пропускных способностей цифровых каналов связи разбалансированной по приоритетам транспортной сети, состоящей из восьми маршрутизаторов, которые обслуживают протокольные блоки данных трех приоритетов. На заключительном этапе оценена эффективность разработанного алгоритма методом имитационного моделирования. Для этого в среде сетевого симулятора OMNet++ исследована разбалансированная по приоритетам транспортная сеть связи, которая состоит из восьми маршрутизаторов, соединенных двенадцатью цифровыми каналами связи с оптимальной пропускной способностью.

Ключевые слова: пропускная способность канала связи, протокольный блок данных, метод множителей Лагранжа, обобщенный метод множителей Лагранжа.

1. Введение. Транспортные сети связи с коммутацией пакетов (ТСС с КП) обеспечивают перенос трафика, поступающего из сетей доступа. При этом потоки протокольных блоков данных (ПБД) предъявляют разные требования к параметрам качества обслуживания (QoS) (требования по задержке ПБД, вероятности потерь ПБД, вероятности ошибки в ПБД и др.). Отличительная особенность технологии дифференцированного обслуживания в том,

что при этом подходе не гарантируется сквозная поддержка параметров QoS в ТСС с КП [1-2], так как за каждый фрагмент отвечает отдельный администратор (оператор связи).

Задачи синтеза ТСС с КП с математической точки зрения являются задачами оптимизации [3-6]. Основные этапы синтеза включают:

- разработку математической модели ТСС с КП;
- определение внутренних параметров ТСС с КП, позволяющих получить оптимальные (наилучшие) значения ее внешних показателей.

Проведенный анализ аналитических моделей ТСС с КП, основанных на математическом аппарате сетей массового обслуживания [7-8], показывает, что они не позволяют учитывать особенности переноса трафика различного приоритета в ТСС с КП. В то же время метод декомпозиции, представленный в [9-10], позволяет описать исходную сеть связи с коммутацией пакетов в виде множества взаимодействующих систем массового обслуживания (СМО), входные и выходные процессы которых связаны между собой на уровне параметров (число приоритетов, интенсивность и средняя длина ПБД).

2. Аналитическая модель ТСС с КП. Аналитическая модель, представленная в [11], предполагает декомпозицию ТСС с КП на отдельные фазы обслуживания и базируется на следующих ограничениях:

- а) отсутствие ошибок при передаче ПБД по каналам связи;
- б) узлы коммутации и каналы связи абсолютно надежны;
- в) отсутствие задержек при обслуживании ПБД в узлах коммутации;
- г) полный прием ПБД в узлах коммутации;
- д) бесконечная емкость запоминающих устройств, предназначенных для хранения ПБД в узлах коммутации;
- е) длины ПБД распределены по экспоненциальному закону

$$f(x) = l^{-1} \cdot \exp(-l^{-1} \cdot x), \quad x \geq 0, \quad (1)$$

где l – средний размер ПБД (бит), x – случайный размер ПБД (бит);

ж) в i -й канал связи, поступает \tilde{R} независимых пуассоновских потоков ПБД с параметрами $\lambda_{i1}, \lambda_{i2}, \dots, \lambda_{i\tilde{R}}$ соответственно;

з) всякий раз, когда ПБД принимается в узле коммутации (УК) независимо по закону (1) выбирается его «новая» длина (ограничение о независимости длин ПБД, введенное Л. Клейнроком в [12]);

и) пропускные способности каналов связи могут принимать любые неотрицательные значения;

к) всякий раз, когда ПБД принимается в узле коммутации внутри ТСС с КП, независимо от частоты поступления потоков ПБД данного приоритета на выходе i -го канала связи j -й фазы обслуживания выбирается его «новый» приоритет (ограничение о независимости приоритетов ПБД, введенное в [11]);

л) ПБД потока m -го приоритета имеют более высокий приоритет по отношению к ПБД потока s -го приоритета, если $m < s$. Это преимущество выражается в следующем. Среди ПБД, ожидающих начало обслуживания, ПБД m -го приоритета обслуживаются раньше ПБД s -го приоритета. Для ПБД одного приоритета характерно обслуживание в порядке поступления. Если во время обслуживания ПБД s -го приоритета поступает ПБД m -го приоритета, его обслуживание не прерывается, а поступивший ПБД ставится в очередь.

Анализ перечисленных допущений позволяет сделать следующие выводы:

- независимость длин и приоритетов ПБД позволяет рассматривать работу каждого канала связи в виде СМО $\bar{M} / M / 1 / W / PRR$ (ограничения з) и к));

- вся ТСС с КП описывается совокупностью независимо функционирующих СМО $\bar{M} / M / 1 / W / PRR$;

- потери ПБД вследствие недоступности отдельных каналов связи отсутствуют (ограничение б));

- потери ПБД вследствие перегрузок отсутствуют (ограничение в));

- потери ПБД вследствие несоответствия не происходят (ограничение а)).

Таким образом, потери ПБД происходят только по причине недопустимой сетевой задержки ПБД. Однако опыт практической эксплуатации ТСС с КП показывает, что качество ее функционирования принято оценивать с помощью среднего значения задержки ПБД k -го приоритета.

Аналитическое выражение для расчета математического ожидания задержки ПБД k -го приоритета в каналах связи основывается на математическом ожидании времени пребывания заявкой k -го приоритета в СМО $\bar{M} / M / 1 / W / PRR$ и имеет следующий вид [11]:

$$\mathbf{T_link}_k = \text{diag} \left(\text{diag}(\mathbf{L})^{-1} \cdot \mathbf{C_new} - \sum_{i=1}^k \Lambda^{(i)} \right)^{-1} \times \quad (2)$$

$$\times \left(\text{diag} \left(\text{diag}(\mathbf{L})^{-1} \cdot \mathbf{C_new} - \varphi(k) \right)^{-1} \cdot \Lambda^{(0)} \right) + \text{diag}(\mathbf{C_new})^{-1} \cdot \mathbf{L} + \mathbf{T},$$

где $\mathbf{T_link}_k$ – вектор-столбец значений математического ожидания задержки ПБД k -го приоритета в каналах связи (КС); $\mathbf{L} = (l_1, l_2, \dots, l_s)^T$ – вектор-столбец среднего размера l_s ПБД для отдельных КС (бит); $\mathbf{T} = (t_1, t_2, \dots, t_s)^T$ – вектор-столбец задержки распространения t_s ПБД для отдельных КС (с); $\mathbf{C_new} = (c_new_1, c_new_2, \dots, c_new_s)^T$ – вектор-столбец пропускных

способностей c_new_s отдельных КС (бит/с); $\Lambda = \begin{pmatrix} \lambda_{00}, \lambda_{01}, \dots, \lambda_{0k}, \dots \\ \lambda_{10}, \lambda_{11}, \dots, \lambda_{1k}, \dots \\ \vdots \\ \lambda_{s0}, \lambda_{s1}, \dots, \lambda_{sk}, \dots \\ \vdots \end{pmatrix}$ –

матрица интенсивностей λ_{sk} поступления ПБД k -го приоритета в s -й канал связи, если $k=0$ – усредненная интенсивность ПБД по всем приоритетам (1/с); $\varphi(k)$ – функция, определяемая соотношением:

$$\varphi(k) = \begin{cases} 0, & \text{при } k = 1, \\ \sum_{i=1}^{k-1} \Lambda^{(i)}, & \text{при } k \geq 2. \end{cases} \quad (3)$$

Аналитическое выражение для расчета среднего взвешенного математического ожидания задержки ПБД k -го приоритета для ТСС с КП в целом определяется с учетом доли трафика того или иного информационного направления в суммарном потоке ПБД [11]:

$$\mathbf{T_net}_k = (\mathbf{T_link}_k)^T \cdot \left(\Lambda^{(k)} \cdot \left((\mathbf{\Gamma}^T)_k \right)^{-1} \right), \quad (4)$$

где $\mathbf{T_net}_k$ – значение среднего взвешенного математического ожидания задержки ПБД k -го приоритета для ТСС с КП;

$\Gamma = (\gamma_0, \gamma_1, \dots, \gamma_k, \dots)$ – вектор-строка интенсивности γ_k поступления ПБД k -го приоритета в ТСС с КП, если $k=0$, тогда это усредненная интенсивность ПБД по всем приоритетам ($1/c$).

Наиболее трудными проблемами проектирования ТСС с КП являются задача выбора пропускных способностей (ВПС) каналов связи [13-23] и задача распределения сетевых ресурсов поверх имеющихся вычислительных ресурсов в ТСС с КП [24-28].

Задачу выбора пропускных способностей каналов связи, обеспечивающих минимум затрат на их аренду в условиях заданных требований по допустимой сетевой задержке ПБД различного приоритета целесообразно формализовать следующим образом.

Дано: L, Q, T, Λ, Γ .

Минимизировать: Q_net .

Варируется: C_new .

Ограничение: $T_net \leq T_ad^T$.

Здесь $Q = (q_1, q_2, \dots, q_s)^T$ – вектор-столбец стоимости q_s аренды единицы пропускной способности для отдельных КС (руб·с/бит); $T_ad = (t_ad_0, t_ad_1, \dots, t_ad_k)$ – вектор-строка допустимых значений математического ожидания задержки t_ad_k ПБД k -го приоритета, если $k=0$ это усредненное допустимое значение математического ожидания задержки по всем приоритетам (с); Q_net – сумма затрат на аренду КС, при этом в работе рассматривается линейная стоимостная функция:

$$Q_net = Q^T \cdot C_new. \quad (5)$$

Полагается, что $L > 0$, $Q > 0$, $T \geq 0$, $\Lambda > 0$, $\Gamma^T > 0$, $T_net > 0$, $T_ad^T > 0$, $C_new > 0$, где $0 = (0, 0, \dots, 0)^T$ – вектор-столбец нулей. Предполагается также, что топологическая структура ТСС с КП задана и на сети реализована статическая маршрутизация.

3. Алгоритм выбора пропускных способностей каналов связи ТСС с КП. Рассмотрим сначала решение оптимизационной задачи сбалансированной по приоритетам ТСС с КП. Под сбалансированной по приоритетам ТСС с КП будем понимать такую сеть, у которой упорядоченные последовательности информационных направлений, полученных в результате ранжирования по интенсивностям ПБД разных приоритетов,

совпадают. Данная задача относится к классу задач нелинейного программирования с ограничениями в виде неравенств [29-31]. Целевая функция (выражение (5)) – линейная функция, при этом ограничения представлены в виде требования по допустимой сетевой задержке ПБД только для k -го приоритета и значатся нелинейными (выпуклыми) функциями. Важным условием является стационарный режим работы ТСС с КП, то есть когда коэффициент загрузки отдельных каналов связи для рассматриваемых ПБД k -го приоритета меньше единицы. Данный факт имеет решающее значение для решения поставленной задачи, так как в этом случае область допустимых значений является выпуклым многогранником и глобальный минимум будет находиться на границе выпуклого многогранника. В связи с этим ограничения по допустимой сетевой задержке для ПБД k -го приоритета возможно представить в виде равенств.

Алгоритм выбора пропускных способностей каналов связи сбалансированной по приоритетам ТСС с КП (далее по тексту $\text{Alg}_1(\mathbf{L}, \mathbf{Q}, \mathbf{T}, \mathbf{G}, \mathbf{T}_{\text{ad}}, \mathbf{\Lambda}, \hat{k})$) основывается на методе множителей Лагранжа и описан в работе [13]. Необходимо отметить, что в данной работе не предоставляется возможности взять смешанную производную функции Лагранжа. В связи с этим было предложено в качестве начальной точки выбрать решение, полученное Клейнроком в работе [12].

Для нахождения оптимальных значений пропускных способностей каналов связи сбалансированной по приоритетам ТСС с КП при условии выполнения требований для допустимой средней сетевой задержки ПБД k -го приоритета:

$$\begin{aligned} & \left(\mathbf{\Gamma}^{(k)}\right)^{-1} \cdot \left(\mathbf{\Lambda}^{(k)}\right)^T \cdot \left(\text{diag}\left(\text{diag}(\mathbf{L})^{-1} \cdot \mathbf{C}_{\text{new}} - \sum_{i=1}^k \mathbf{\Lambda}^{(i)}\right)^{-1} \times \right. \\ & \quad \times \left(1 + \text{diag}\left(\text{diag}(\mathbf{L})^{-1} \cdot \mathbf{C}_{\text{old}} - \varphi(k)\right)^{-1} \cdot \mathbf{\Lambda}^{(0)} - \right. \\ & \quad \left. \left. - \text{diag}\left(\text{diag}(\mathbf{L})^{-1} \cdot \mathbf{C}_{\text{old}}\right)^{-1} \cdot \sum_{i=1}^{k-1} \mathbf{\Lambda}^{(i)}\right) + \mathbf{T}\right) = \mathbf{T}_{\text{ad}}^{(k)}, \end{aligned} \quad (6)$$

необходимо составить функцию Лагранжа:

$$\begin{aligned}
 G(\mathbf{C}_{\text{new}}, \beta_k) = & \mathbf{C}_{\text{new}}^T \cdot \mathbf{Q} + \beta_k \cdot \left(\left(\mathbf{\Gamma}^{(k)} \right)^{-1} \cdot \left(\mathbf{\Lambda}^{(k)} \right)^T \times \right. \\
 & \times \left(\text{diag} \left(\text{diag}(\mathbf{L})^{-1} \cdot \mathbf{C}_{\text{new}} - \sum_{i=1}^k \mathbf{\Lambda}^{(i)} \right)^{-1} \times \right. \\
 & \times \left(1 + \left(\text{diag} \left(\text{diag}(\mathbf{L})^{-1} \cdot \mathbf{C}_{\text{old}} - \varphi(k) \right)^{-1} \cdot \mathbf{\Lambda}^{(0)} - \right. \right. \\
 & \left. \left. - \text{diag} \left(\text{diag}(\mathbf{L})^{-1} \cdot \mathbf{C}_{\text{old}} \right)^{-1} \cdot \sum_{i=1}^k \mathbf{\Lambda}^{(i)} \right) \right) + \mathbf{T} \left) - \mathbf{T}_{\text{ad}}^{(k)} \right),
 \end{aligned} \tag{7}$$

где β_k – неопределенный множитель Лагранжа с учетом допустимого значения средней сетевой задержки ПБД k -го приоритета.

Оптимальные значения пропускных способностей каналов связи сбалансированной по приоритетам ТСС с КП определяются следующим выражением [13]:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{C}_{\text{new}} = & \text{diag} \left(\sum_{i=1}^k \mathbf{\Lambda}^{(i)} \right) \cdot \mathbf{L} + \left(t_{\text{ad}_k} \cdot \mathbf{\Gamma}^{(k)} - \left(\mathbf{\Lambda}^{(k)} \right)^T \cdot \mathbf{T} \right)^{-1} \times \\
 & \times \left((\mathbf{L})^T \cdot \left(\text{diag} \left(\mathbf{\Lambda}^{(k)} \right) \cdot \text{diag}(\mathbf{Q}) \cdot \left(\text{diag}(\mathbf{C}_{\text{old}} - \psi(k))^{-1} \cdot \mathbf{\Lambda}^{(0)} - \right. \right. \right. \\
 & \left. \left. - \text{diag}(\mathbf{C}_{\text{old}})^{-1} \cdot \left(\sum_{i=1}^k \mathbf{\Lambda}^{(i)} \right) + \text{diag} \left(\text{diag}(\mathbf{L})^{-1} \right) \right)^{\frac{1}{2}} \right) \cdot \left(\text{diag}(\mathbf{Q})^{-1} \times \right. \\
 & \times \text{diag} \left(\left(\text{diag} \left(\mathbf{\Lambda}^{(k)} \right) \cdot \text{diag}(\mathbf{Q}) \cdot \left(\text{diag}(\mathbf{C}_{\text{old}} - \psi(k))^{-1} \cdot \mathbf{\Lambda}^{(0)} - \right. \right. \right. \\
 & \left. \left. - \text{diag}(\mathbf{C}_{\text{old}})^{-1} \cdot \left(\sum_{i=1}^k \mathbf{\Lambda}^{(i)} \right) + \text{diag} \left(\text{diag}(\mathbf{L})^{-1} \right) \right) \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \mathbf{L} \left. \right),
 \end{aligned} \tag{8}$$

где $\mathbf{C}_{\text{old}} = (c_{\text{old}_1}, c_{\text{old}_2}, \dots, c_{\text{old}_s})^T$ – вектор-столбец значений пропускных способностей КС, полученных на предыдущем

итерационном шаге. Значения пропускных способностей каналов связи сбалансированной по приоритетам ТСС с КП на первом итерационном шаге рассчитывают, используя решение Клейнрока [12]:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{C_old} = & \text{diag} \left(\sum_{i=1}^k \Lambda^{(i)} \right) \cdot \mathbf{L} + \left(\mathbf{T_ad}^{(k)} \cdot \mathbf{\Gamma}^{(k)} - \Lambda^{(k)\text{T}} \cdot \mathbf{T} \right)^{-1} \times \\
 & \times \left(\text{diag} \left(\sqrt{\sum_{i=1}^k \Lambda^{(i)}} \right) \cdot \sqrt{\mathbf{Q}} \right)^{\text{T}} \times \\
 & \times \sqrt{\mathbf{L}} \cdot \left(\text{diag}(\mathbf{Q})^{-1} \cdot \left(\text{diag} \left(\text{diag} \left(\sqrt{\sum_{i=1}^k \Lambda^{(i)}} \right) \cdot \sqrt{\mathbf{L}} \right) \cdot \sqrt{\mathbf{Q}} \right) \right),
 \end{aligned} \tag{9}$$

где $\psi(k)$ – функция, определяемая соотношением:

$$\psi(k) = \begin{cases} 0, & \text{при } k = 1, \\ \text{diag} \left(\sum_{i=1}^{k-1} \Lambda^{(i)} \right) \cdot \mathbf{L}, & \text{при } k \geq 2. \end{cases} \tag{10}$$

В этом случае обеспечивается выбор начальной точки в области допустимых значений.

$\text{Alg_1}(\mathbf{L}, \mathbf{Q}, \mathbf{T}, \mathbf{\Gamma}, \mathbf{T_ad}, \Lambda, \hat{k})$ можно записать в виде последовательности итерационных шагов.

1. Задают \mathbf{L} , \mathbf{Q} , \mathbf{T} , $\mathbf{\Gamma}$, $\mathbf{T_ad}$, Λ , \hat{k} – номер приоритета ПБД, для которого будет решаться задача выбора пропускных способностей каналов связи сбалансированной по приоритетам ТСС с КП.

2. Рассчитывают начальные значения пропускных способностей каналов связи ТСС с КП, используя решение Клейнрока [12] (выражение (9)).

3. Рассчитывают вектор значений пропускных способностей каналов связи сбалансированной по приоритетам ТСС с КП по формуле (8).

4. Рассчитывают сумму модуля отклонения между пропускными способностями каналов связи ТСС с КП, полученными на предыдущем и очередном итерационном шагах:

$$\Delta = \text{diag} \left(\text{identity}(\text{rows}(\mathbf{C_new})) \right)^{\text{T}} \cdot \sqrt{(\mathbf{C_new} - \mathbf{C_old})^2}, \tag{11}$$

где функция $\text{rows}(\mathbf{C_new})$ возвращает число строк в матрице $\mathbf{C_new}$, функция $\text{identity}(n)$ возвращает единичную матрицу размером $n \times n$. Если сумма модуля отклонения между пропускными способностями каналов связи ТСС с КП меньше 0,1 (бит/с), тогда работа алгоритма заканчивается. В противном случае $\mathbf{C_old} = \mathbf{C_new}$ и осуществляется переход на шаг 3.

Следует отметить, что при $\Delta \leq 0,1$ $\text{Alg_1}(\mathbf{L}, \mathbf{Q}, \mathbf{T}, \mathbf{\Gamma}, \mathbf{T_ad}, \mathbf{\Lambda}, \hat{k})$ определяет оптимальное решение менее чем за 100 итераций.

Для примера рассмотрим принцип работы разработанного алгоритма на примере фрагмента ТСС с КП, представленном на рисунке 1.

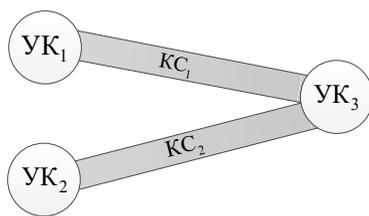


Рис. 1. Фрагмент ТСС с КП, состоящей из двух каналов связи

Исходными данными для фрагмента ТСС с КП являются:

$$\mathbf{L} = (4000 \ 4000)^T \text{ (бит)}, \quad \mathbf{Q} = (1 \ 1)^T \text{ (руб} \cdot \text{с/бит)},$$

$$\mathbf{T} = (0,015 \ 0,019)^T \text{ (с)}, \quad \mathbf{\Gamma} = (63 \ 25 \ 12 \ 26) \text{ (1/с)},$$

$$\mathbf{T_ad} = (1,372 \ 0,1 \ 0,2 \ 3) \text{ (с)}, \quad \mathbf{\Lambda} = \begin{pmatrix} 32 & 10 & 5 & 17 \\ 31 & 15 & 7 & 9 \end{pmatrix} \text{ (1/с)}.$$

Необходимо определить такие значения пропускных способностей каналов связи, при которых затраты на их аренду будут минимальны. С математической точки зрения задача состоит в том, чтобы найти такую допустимую точку (значения пропускных способностей), которой соответствует наименьшее значение целевой функции (выражение (5)).

На рисунках 2 а) – 2 в) проиллюстрирована геометрическая интерпретация решения поставленной задачи с использованием алгоритма $\text{Alg_1}(\mathbf{L}, \mathbf{Q}, \mathbf{T}, \mathbf{\Gamma}, \mathbf{T_ad}, \mathbf{\Lambda}, \hat{k})$ с учетом ограничения по допустимой сетевой задержке для ПБД первого, второго и третьего приоритетов соответственно.

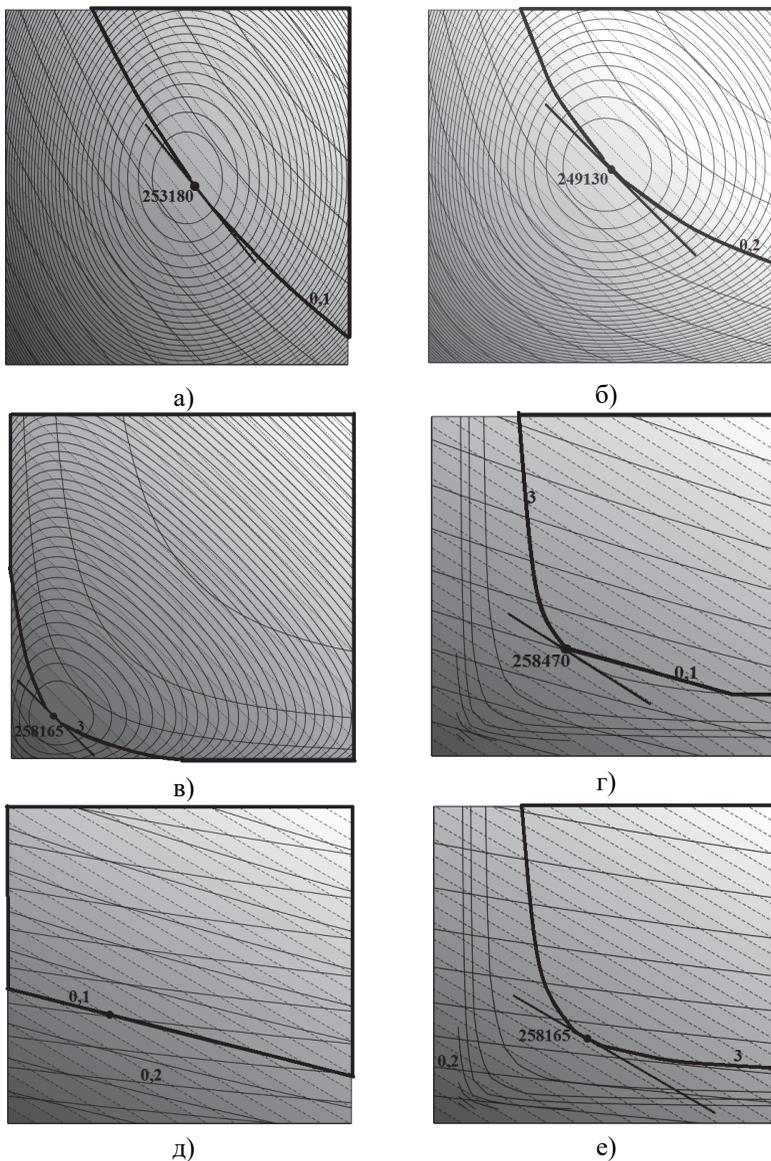


Рис. 2. Геометрическая интерпретация решения оптимизационной задачи

На данных рисунках круговые изолинии обозначают значения функции Лагранжа для k -го приоритета ПБД, жирной линией

выделена область допустимых значений. Значения целевой функции представлены пунктирными изолиниями. Функция сетевой задержки ПБД k -го приоритета представлена выпуклыми сплошными изолиниями. Стоит отметить, что направление увеличения значений целевой функции изменяется от темного цвета к светлому. Проанализировав данные решения, можно утверждать, что выполнив наиболее жесткое требование по допустимой сетевой задержке ПБД k -го приоритета, гарантировано выполнение требований по допустимой сетевой задержке ПБД других приоритетов. Как видно из рисунков 2 а) – 2 в), минимальное значение целевой функции (выражение (5)) лежит на границе выпуклого многогранника в точке, где изолиния целевой функции является касательной к области допустимых значений.

Однако разработанный алгоритм $\text{Alg}_1(\mathbf{L}, \mathbf{Q}, \mathbf{T}, \mathbf{G}, \mathbf{T}_{\text{ad}}, \mathbf{\Lambda}, \hat{k})$ не позволяет найти оптимальные значения пропускных способностей каналов связи разбалансированной по приоритетам ТСС с КП для случая, когда в качестве ограничения задан вектор допустимых сетевых задержек ПБД k -го приоритета. Под разбалансированной по приоритетам ТСС с КП будем понимать такую сеть, у которой упорядоченные последовательности информационных направлений, полученные в результате ранжирования по интенсивностям ПБД разных приоритетов не совпадают. В таком случае следует рассматривать комбинации ограничений по допустимой сетевой задержке ПБД разных приоритетов.

Для решения задачи выбора пропускных способностей каналов связи разбалансированной по приоритетам ТСС с КП был разработан алгоритм $\text{Alg}_2(\mathbf{L}, \mathbf{Q}, \mathbf{T}, \mathbf{G}, \mathbf{T}_{\text{ad}}, \mathbf{\Lambda})$, базирующийся на откорректированном обобщенном методе множителей Лагранжа, основная идея которого заключается в сравнении условных экстремумов целевой функции, полученных с учетом всех возможных наборов активных ограничений, то есть когда сначала отдельные ограничения делаются активными поочередно, затем рассматриваются пары активных ограничений и так до тех пор, пока все ограничения не станут активными.

На рисунках 2 г) – 2 е) проиллюстрирована геометрическая интерпретация решения поставленной задачи для комбинаций ограничений первого и третьего, первого и второго, второго и третьего приоритетов соответственно. Обратим внимание, что целевая функция линейна, ограничения по допустимой сетевой задержке ПБД k -го

приоритета являются выпуклыми функциями, а неопределенные множители Лагранжа являются положительными, при этом область допустимых значений является выпуклым многогранником. Все это позволяет сделать вывод, что необходимые условия теоремы Куна – Таккера являются также и достаточными, при этом глобальный оптимум целевой функции будет лежать на границе области допустимых значений. В связи с этим ограничения в виде неравенства можно заменить на ограничения в виде равенства.

$\text{Alg}_2(\mathbf{L}, \mathbf{Q}, \mathbf{T}, \mathbf{G}, \mathbf{T_ad}, \mathbf{\Lambda})$ можно представить в виде последовательности следующих шагов.

1. Задают $\mathbf{L}, \mathbf{Q}, \mathbf{T}, \mathbf{G}, \mathbf{T_ad}, \mathbf{\Lambda}$.
 2. Определяют число приоритетов ПБД, обслуживаемых в ТСС с КП $k = \text{cols}(\mathbf{\Lambda}) - 1$.

3. Находят число каналов связи в ТСС с КП $s = \text{rows}(\mathbf{\Lambda})$, где функция $\text{rows}(\mathbf{\Lambda})$ возвращает число строк в $\mathbf{\Lambda}$.

4. Определяют нижнюю границу пропускной способности для каждого канала связи $\mathbf{C_min} = \text{diag}(\mathbf{\Lambda}^{(0)}) \cdot \mathbf{L} + \frac{1}{100}$.

5. Вычисляют вектор, элементами которого являются все возможные комбинации из активных ограничений $\mathbf{MatKombPR} = \text{Alg}_3(k)$, где $\text{Alg}_3(k)$ алгоритм формирования вектора, элементами которого являются все возможные сочетания из k активных ограничений.

6. Вводят переменную, которая предназначена для хранения номера очередного исследуемого приоритета ПБД $\text{NumPR} = 2$.

7. Решают задачу выбора пропускных способностей каналов связи сбалансированной по приоритетам ТСС с КП для случая, когда в активном состоянии находится ограничение для k -го приоритета ПБД $\mathbf{Mat_C} = \text{Alg}_1(\mathbf{L}, \mathbf{Q}, \mathbf{T}, \mathbf{G}, \mathbf{T_ad}, \mathbf{\Lambda}, \text{NumPR} - 1)$.

8. Проверяют факт того, что номер исследуемого приоритета ПБД не превышает суммарное число приоритетов ПБД в анализируемой ТСС с КП $\text{NumPR} \leq k$. Если условие выполняется, то переходят на шаг 9, иначе на шаг 11.

9. Решают задачу выбора пропускных способностей каналов связи сбалансированной по приоритетам ТСС с КП для случая, когда в активном состоянии находится ограничение для очередного приоритета ПБД. Данное решение получают с использованием

$\text{Alg}_1(\mathbf{L}, \mathbf{Q}, \mathbf{T}, \mathbf{\Gamma}, \mathbf{T}_{\text{ad}}, \mathbf{\Lambda}, \text{NumPR})$ и добавляют к уже имеющемуся решению в виде нового столбца, который дописывается справа в соответствующей матрице

$\mathbf{Mat_C} = \text{augment}(\mathbf{Mat_C}, \text{Alg}_1(\mathbf{L}, \mathbf{Q}, \mathbf{T}, \mathbf{\Gamma}, \mathbf{T}_{\text{ad}}, \mathbf{\Lambda}, \text{NumPR}))$, где

функция $\text{augment}(\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}, \dots)$ возвращает массив, образованный размещением $\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}, \dots$ слева направо, при этом $\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}, \dots$ – это массивы с одинаковым числом строк.

10. Реализуют переход для исследования очередного приоритета ПБД $\text{NumPR} = \text{NumPR} + 1$ и возвращаются на шаг 9.

11. Определяют номер последнего элемента в векторе, элементами которого являются все возможные комбинации из активных ограничений $\text{Reg} = \text{last}(\mathbf{MatKombPR})$, где функция $\text{last}(\mathbf{MatKombPR})$ возвращает скалярный индекс последнего элемента вектора $\mathbf{MatKombPR}$.

12. Проверяют факт того, что еще не все элементы вектора, которыми являются все возможные комбинации из активных ограничений, были исследованы $\text{Reg} \geq 0$. Если условие выполняется, то переходят на шаг 13, иначе переходят на шаг 42.

13. Выбирают из вектора, элементами которого являются все возможные комбинации из активных ограничений, очередной элемент для исследования $\mathbf{KombPR} = \mathbf{MatKombPR}_{\text{Reg}}$.

14. С учетом выбранной комбинации из активных ограничений обнуляют такие решения задачи выбора пропускных способностей каналов связи ТСС с КП, которые получены для неактивных ограничений:

$$\mathbf{MatKomb_C} = \text{diag}(\text{stack}(\mathbf{KombPR}), 1) \times \\ \times \text{augmentation}(\text{Alg}_1(\mathbf{L}, \mathbf{Q}, \mathbf{T}, \mathbf{\Gamma}, \mathbf{T}_{\text{ad}}, \mathbf{\Lambda}, \text{NumPR}), \mathbf{C}_{\text{min}}),$$

где функция $\text{stack}(\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}, \dots)$ возвращает массив, образованный размещением $\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}, \dots$ сверху вниз, при этом $\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}, \dots$ – это массивы с одинаковым числом столбцов.

15. Из оставшихся вариантов решения задачи выбора пропускных способностей для каждого КС выбирают максимальное значение пропускной способности, что гарантирует выполнение требований по средней сетевой задержке ПБД относительно тех ограничений, которые активны в анализируемой комбинации активных ограничений

$$\mathbf{C_new} = \text{matrix}(\text{cols}(\mathbf{MatKomb_C}), 1, \text{Alg_4}(\mathbf{MatKomb_C})),$$

где $\text{Alg_4}(\mathbf{MatKomb_C})$ алгоритм выбора максимальных значений пропускных способностей каналов связи из имеющегося множества решений, которое получено для заданной комбинации активных ограничений, функция $\text{matrix}(m, n, \text{fun})$ возвращает матрицу размером $m \times n$, в которой (i, j) -й элемент равен $\text{fun}(i, j)$.

16. Находят новые значения пропускных способностей каналов связи $\mathbf{C_new} = \text{ceil}(\text{Alg_5}(\mathbf{C_old}, \mathbf{KombPR}, \Lambda, \mathbf{Q}, \mathbf{T_ad}, \Gamma, \mathbf{T}, \mathbf{L}))$, где $\text{Alg_5}(\mathbf{C_old}, \mathbf{KombPR}, \Lambda, \mathbf{Q}, \mathbf{T_ad}, \Gamma, \mathbf{T}, \mathbf{L})$ – алгоритм нахождения оптимальных значений пропускных способностей каналов, в основе которого лежит процедура ослабления ограничений по допустимой сетевой задержке ПБД, функция $\text{ceil}(z)$ возвращает наименьшее целое, большее или равное z (будет представлен далее).

17. Вводят номер приоритета ПБД, который будет исследоваться на предмет сетевой задержки в отдельных КС и сети связи в целом $\text{NumPR} = 1$.

18. Проверяют факт того, что номер приоритета ПБД, которые будут исследоваться на предмет сетевой задержки в отдельных КС и сети связи в целом, не является последним $\text{NumPR} \leq k$. Если условие выполняется, то переходят на шаг 19, иначе переходят на шаг 22.

19. Формируют очередной элемент вектора, элементами которого являются вектора сетевых задержек ПБД соответствующего приоритета в отдельных КС (выражение (2)).

20. Формируют очередной элемент вектора, элементами которого являются сетевая задержка ПБД соответствующего приоритета в сети связи в целом (выражение (4)).

21. Увеличивают на единицу номер приоритета ПБД $\text{NumPR} = \text{NumPR} + 1$ и переходят на шаг 18.

22. Формируют нулевой элемент вектора, элементами которого являются вектора сетевых задержек ПБД без учета приоритетов в отдельных КС:

$$\mathbf{T_link}_0 = \text{diag}\left(\text{diag}\left(\text{diag}(\mathbf{L})^{-1} \cdot \mathbf{C_new} - \Lambda^{(0)}\right)^{-1}\right) + \mathbf{T}. \quad (12)$$

23. Формируют нулевой элемент вектора сетевых задержек в сети связи в целом, используя сетевую задержку ПБД без учета приоритетов:

$$\mathbf{T_net}_0 = (\mathbf{T_link}_0)^T \cdot \left(\Lambda^{(0)} \cdot \left((\mathbf{\Gamma}^T)_0 \right)^{-1} \right). \quad (13)$$

24. Вычисляют суммарные затраты, связанные с арендой КС с учетом рассчитанной пропускной способностью $Q_net = \mathbf{Q}^T \cdot \mathbf{C_new}$.

25. Формируют очередной элемент вектора результатов, элементами которого является также вектор, включающий: вектор $\mathbf{C_new}$ оптимальных значений пропускных способностей каналов связи для соответствующей комбинации активных ограничений; вектор $\mathbf{T_link}$, элементами которого являются векторы сетевых задержек ПБД для всех приоритетов в отдельных КС; вектор $\mathbf{T_net}$, элементами которого являются сетевая задержка ПБД для всех приоритетов в сети связи в целом; анализируемый вариант \mathbf{KombPR} активных ограничений; суммарные затраты Q_net , связанные с арендой КС оптимальной пропускной способности:

$$\mathbf{MatRez}_{Reg} = (\mathbf{C_new}, \mathbf{T_link}, \mathbf{T_net}, \mathbf{KombPR}, Q_net)^T.$$

26. Проверяют факт того, что текущая комбинация активных ограничений не является последней $Reg \neq last(\mathbf{MatKombPR})$. Если условие выполняется, то переходят на шаг 27, иначе переходят на шаг 28.

27. Формируют новое оптимальное решение задачи выбора пропускных способностей каналов связи ТСС с КП, которое включает: вектор $\mathbf{C_new}$ оптимальных значений пропускных способностей каналов связи для соответствующей комбинации активных ограничений; вектор $\mathbf{T_link}$, элементами которого являются вектор сетевых задержек ПБД для всех приоритетов в отдельных КС; вектор $\mathbf{T_net}$, элементами которого являются сетевая задержка ПБД для всех приоритетов в сети связи в целом; анализируемый вариант \mathbf{KombPR} активных ограничений; суммарные затраты Q_net , связанные с арендой каналов связи оптимальной пропускной способности $\mathbf{Mat_OptRez} = (\mathbf{C_new}, \mathbf{T_link}, \mathbf{T_net}, \mathbf{KombPR}, Q_net)^T$ и переходят на шаг 41.

28. Вводят переменную, которая предназначена для хранения номера очередного исследуемого приоритета ПБД $NumPR = 0$.

29. Вводят переменную, с помощью которой будет подсчитываться для какого числа приоритетов ПБД сетевая задержка в отдельных КС больше или равна нулю $Control_T_link = 0$.

30. Проверяют факт того, что номер приоритета ПБД, которые будут исследоваться на предмет отрицательного значения сетевой задержки в отдельных КС, не является последним $NumPR \leq k$. Если условие выполняется, то переходят на шаг 31, иначе переходят на шаг 35.

31. Выбирают очередной вектор сетевых задержек ПБД соответствующего приоритета в отдельных КС $T_link_act = T_link_{NumPR}$.

32. Проверяют факт того, что в очередном векторе сетевых задержек ПБД соответствующего приоритета в отдельных КС нет отрицательных элементов, если этот факт подтверждается, тогда соответствующей переменной присваивается значение единица, иначе – ноль $Control_link = (\min(T_link_act) \geq 0)$.

33. Изменяют на единицу или оставляют без изменения значение переменной, которая учитывает, для какого числа приоритетов ПБД сетевая задержка в отдельных КС больше или равна нулю $Control_T_link = Control_T_link + Control_link$.

34. Увеличивают на единицу номер приоритета ПБД $NumPR = NumPR + 1$ и переходят на шаг 30.

35. Проверяют на отсутствие отрицательного значения сетевой задержки в отдельных КС для всех приоритетов, если для всех приоритетов ПБД сетевая задержка в отдельных КС больше или равна нулю, тогда соответствующая переменная принимает значение единица, иначе – ноль

$$Control_T_link_Sum = (Control_T_link = (k + 1)).$$

36. Проверяют на отсутствие отрицательного значения сетевой задержки в сети связи в целом, если для всех приоритетов ПБД сетевая задержка в сети связи в целом больше или равна нулю, тогда соответствующая переменная принимает значение единица, иначе – ноль $Control_T_net = (\min(T_net) \geq 0)$.

37. Проверяют условие, если для всех приоритетов ПБД сетевая задержка в сети связи в целом удовлетворяет ограничению, введенному для соответствующего приоритета, тогда соответствующая переменная принимает значение единица, иначе – ноль $Control_Req = (\min(T_ad^T - T_net) \geq 0)$.

38. Проверяют условие, если суммарные затраты, связанные с арендой каналов связи для очередной комбинации активных ограничений меньше суммарных затрат, связанных с арендой каналов связи оптимальной пропускной способности, тогда соответствующая переменная принимает значение единица, иначе – ноль $Control_Q_net = (Q_net \leq Mat_OptRez_4)$.

39. Проверяют факт того, что для очередной комбинации активных ограничений выполняются следующие условия: для всех приоритетов ПБД сетевая задержка в отдельных каналах связи и в сети связи в целом больше или равна нулю и удовлетворяет ограничению, введенному для соответствующего приоритета; суммарные затраты, связанные с арендой каналов связи меньше, чем суммарные затраты, связанные с арендой каналов связи оптимальной пропускной способности:

$$(Control_T_net \wedge Control_Req \wedge Control_Q_net \wedge \wedge Control_T_link_Sum) = 1.$$

Если условие выполняется, то переходят на шаг 40, иначе переходят на шаг 41.

40. Формируют новое оптимальное решение задачи выбора пропускных способностей каналов связи ТСС с КП, которое включает: вектор **C_new** оптимальных значений пропускных способностей каналов связи для соответствующей комбинации активных ограничений; вектор **T_link**, элементами которого являются вектор сетевых задержек ПБД для всех приоритетов в отдельных КС; вектор **T_net**, элементами которого являются сетевая задержка ПБД для всех приоритетов в сети связи в целом; анализируемый вариант **KombPR** активных ограничений; суммарные затраты Q_net , связанные с арендой каналов связи оптимальной пропускной способности $Mat_OptRez = (C_new, T_link, T_net, KombPR, Q_net)^T$, и переходят на шаг 41.

41. Приступают к исследованию очередного элемента вектора элементами, которого являются все возможные комбинации из активных ограничений $Reg = Reg - 1$ и переходят на шаг 12.

42. Формируют последний элемент вектора результатов $MatRez_{last(MatKombPR)+1} = Mat_OptRez$.

43. Выводят результаты работы алгоритма в виде вектора результатов, элементами которого является также вектор,

включающий: вектор оптимальных значений пропускных способностей каналов связи для соответствующей комбинации активных ограничений; вектор, элементами которого являются вектор сетевых задержек ПБД для всех приоритетов в отдельных КС; вектор, элементами которого являются сетевая задержка ПБД для всех приоритетов в сети связи в целом; анализируемый вариант активных ограничений; суммарные затраты, связанные с арендой каналов связи оптимальной пропускной способности

$$\mathbf{Mat_OptRez} = (\mathbf{C_new}, \mathbf{T_link}, \mathbf{T_net}, \mathbf{KombPR}, \mathbf{Q_net})^T.$$

Учитывая тот факт, что на входе порта маршрутизатора формируется не более восьми очередей из ПБД, можно утверждать, число шагов за которое сходится $\text{Alg_2}(\mathbf{L}, \mathbf{Q}, \mathbf{T}, \mathbf{G}, \mathbf{T_ad}, \mathbf{\Lambda})$ определяется количеством различных комбинаций из активных ограничений, то есть $2^8 - 1$.

Алгоритм $\text{Alg_5}(\mathbf{C_old}, \mathbf{KombPR}, \mathbf{\Lambda}, \mathbf{Q}, \mathbf{T_ad}, \mathbf{G}, \mathbf{T}, \mathbf{L})$ предназначен для нахождения глобального оптимума, который можно представить в виде последовательности следующих шагов.

1. Задают \mathbf{L} , \mathbf{Q} , \mathbf{T} , \mathbf{G} , $\mathbf{T_ad}$, $\mathbf{\Lambda}$, $\mathbf{C_old}$, \mathbf{KombPR} .
2. Определяют вектор начальных значений пропускных способностей КС разбалансированной по приоритетам ТСС с КП $\mathbf{C_old}$ с учетом активных ограничений.
3. Задают комбинацию активных ограничений $\mathbf{KombPR_act} = \text{stack}(0, \mathbf{KombPR})$.
4. Определяют число приоритетов ПБД, обслуживаемых в ТСС с КП $k = \text{cols}(\mathbf{\Lambda}) - 1$.
5. Задают текущие требования по допустимой сетевой задержке ПБД $\mathbf{T_ad_act} = \mathbf{T_ad}^T$.
6. Вводят переменную, которая предназначена для хранения номера очередного исследуемого приоритета ПБД $\text{NumPR} = 1$.
7. Проверяют факт того, что номер исследуемого приоритета ПБД не превышает суммарное число приоритетов ПБД в анализируемой ТСС с КП $\text{NumPR} \leq k$. Если условие выполняется, то переходят на шаг 8, иначе на шаг 10.
8. Формируют очередной элемент вектора, элементами которого являются сетевая задержка ПБД соответствующего приоритета в сети связи в целом (выражение (4)).

9. Увеличивают на единицу номер приоритета ПБД $NumPR = NumPR + 1$ и переходят на шаг 7.

10. Формируют нулевой элемент вектора сетевых задержек в сети связи в целом, используя сетевую задержку ПБД без учета приоритетов (выражение (13)).

11. Рассчитывают разницу между вектором допустимых сетевых задержек ПБД k -го приоритета и вектором сетевых задержек ПБД k -го приоритета, полученных на предыдущем шаге (шаг 8):

$$\Delta T = \text{diag}(T_{ad}^T - T_{net}) \cdot \text{KombPR}_{act} . \quad (14)$$

12. Рассчитывают новый вектор допустимых сетевых задержек ПБД k -го приоритета:

$$T_{ad_new} = T_{ad} + \Delta T . \quad (15)$$

13. Рассчитывают вектор значений пропускных способностей каналов связи разбалансированной по приоритетам ТСС с КП с учетом активных ограничений, вектора значений пропускных способностей, полученные на предыдущем шаге, и нового вектора допустимых сетевых задержек ПБД k -го приоритета C_{new} .

14. Рассчитывают сумму модуля отклонения между пропускными способностями каналов связи ТСС с КП, полученными на предыдущем и очередном итерационном шагах (выражение (11)).

15. Проверяют факт того, что сумма модуля отклонения между пропускными способностями каналов связи разбалансированной по приоритетам ТСС с КП больше 0,1 (бит/с) $\Delta > 0,1$. Если условие выполняется, то переходят на шаг 16, иначе на шаг 26.

16. Присваивают вектор пропускных способностей каналов связи разбалансированной по приоритетам ТСС с КП, полученных на шаге 13 в качестве значений, которые были получены на предыдущем итерационном шаге $C_{old} = C_{new}$.

17. Вводят переменную, которая предназначена для хранения номера очередного исследуемого приоритета ПБД $NumPR = 1$.

18. Проверяют факт того, что номер исследуемого приоритета ПБД не превышает суммарное число приоритетов ПБД в анализируемой ТСС с КП $NumPR \leq k$. Если условие выполняется, то переходят на шаг 19, иначе на шаг 21.

19. Формируют очередной элемент вектора, элементами которого являются сетевая задержка ПБД соответствующего приоритета в сети связи в целом (выражение (4)).

20. Увеличивают на единицу номер приоритета ПБД $NumPR = NumPR + 1$ и переходят на шаг 18.

21. Формируют нулевой элемент вектора сетевых задержек в сети связи в целом, используя сетевую задержку ПБД без учета приоритетов (выражение (13)).

22. Рассчитывают разницу между вектором допустимых сетевых задержек ПБД k -го приоритета и вектором сетевых задержек ПБД k -го приоритета, полученных на предыдущем шаге (выражение (14)).

23. Рассчитывают новый вектор допустимых сетевых задержек ПБД k -го приоритета (выражение (15)).

24. Рассчитывают вектор значений пропускных способностей каналов связи разбалансированной по приоритетам ТСС с КП с учетом активных ограничений, вектора значений пропускных способностей, полученных на предыдущем шаге, и нового вектора допустимых сетевых задержек ПБД k -го приоритета C_new .

25. Рассчитывают сумму модуля отклонения между пропускными способностями каналов связи ТСС с КП, полученными на предыдущем и очередном итерационном шагах (выражение (11)), и переходят на шаг 15.

26. Выводят результаты работы алгоритма в виде вектора оптимальных значений пропускных способностей каналов связи разбалансированной по приоритетам ТСС с КП C_new .

Рассмотрим работу алгоритма Alg_2(L, Q, T, Г, T_ad, Λ) на фрагменте разбалансированной по приоритетам ТСС с КП, представленном на рисунке 3, при наличии следующих ограничений на математические ожидания задержки: для ПБД первого приоритета не более 0,13 (с), для второго приоритета не более 0,2 (с) и для третьего приоритета не более 0,3 (с). Матрица статических маршрутов представлена в таблице 1.

Таблица 1. Матрица статических маршрутов фрагмента ТСС с КП

Направления связи	Каналы связи											
	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
3-4		1			2				4		3	
3-7		1	2							3		4
2-6	1				2							
4-1						3				1		2
5-2			2	1				3				
5-8				1			2					
6-1	4							3	2		1	
7-8						1	2					

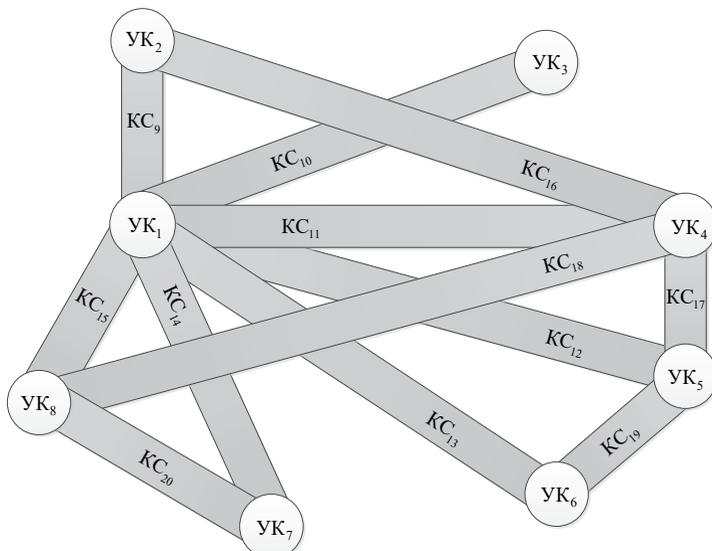


Рис. 3. Фрагмент ТСС с КП

1. Задают

$$L = \begin{pmatrix} 4000 & 4000 & 4000 & 4000 & 4000 & 4000 \\ 4000 & 4000 & 4000 & 4000 & 4000 & 4000 \end{pmatrix}^T \text{ (бит)}, \quad (16)$$

$$T = \begin{pmatrix} 0,015 & 0,019 & 0,021 & 0,03 & 0,03 & 0,023 \\ 0,019 & 0,022 & 0,023 & 0,028 & 0,026 & 0,018 \end{pmatrix}^T \text{ (с)}, \quad (17)$$

$$Q = (1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1)^T \text{ (руб} \cdot \text{с/бит)}, \quad (18)$$

$$\Lambda = \begin{pmatrix} 66 & 50 & 69 & 62 & 59 & 46 & 33 & 76 & 57 & 56 & 57 & 56 \\ 11 & 22 & 29 & 22 & 13 & 22 & 13 & 19 & 12 & 32 & 12 & 32 \\ 27 & 13 & 19 & 21 & 21 & 5 & 6 & 34 & 28 & 5 & 28 & 5 \\ 28 & 15 & 21 & 19 & 25 & 19 & 14 & 23 & 17 & 19 & 17 & 19 \end{pmatrix}^T \text{ (1/с)}, \quad (19)$$

$$\Gamma = (224 \ 77 \ 66 \ 81) \text{ (1/с)}, \quad (20)$$

$$T_{ad} = (0,212 \ 0,13 \ 0,2 \ 0,3) \text{ (с)}. \quad (21)$$

В таблице 2 представлены затраты на аренду каналов связи для различных комбинаций активных ограничений с проверкой выполняются или нет условия по допустимой сетевой задержке для ПБД первого, второго и третьего приоритетов, полученные с использованием алгоритма $\text{Alg}_2(\mathbf{L}, \mathbf{Q}, \mathbf{T}, \mathbf{\Gamma}, \mathbf{T}_{ad}, \Lambda)$.

Таблица 2. Затраты на аренду каналов связи для различных комбинаций активных ограничений

№ комбинации	Выполнение условий по задержке ПБД			Затраты
	1 приоритет	2 приоритет	3 приоритет	
$(1\ 1\ 1)^T$	Да	Да	Да	4370593
$(1\ 1\ 0)^T$	Да	Да	Нет	4371257
$(1\ 0\ 1)^T$	Да	Да	Да	4370593
$(0\ 1\ 1)^T$	Нет	Да	Да	3743815
$(1\ 0\ 0)^T$	Да	Да	Нет	4371257
$(0\ 1\ 0)^T$	Нет	Да	Нет	3525803
$(0\ 0\ 1)^T$	Нет	Да	Да	3743815

Анализ таблицы 2 показывает, что комбинация $(1\ 0\ 1)^T$ характеризуется тем, что выполняются все условия, используемые для проверки корректности решения, при этом затраты на аренду каналов связи являются минимальными. Результаты работы алгоритма представлены в матрице

$\mathbf{Mat_OptRez} = (\mathbf{C_new}, \mathbf{T_link}, \mathbf{T_net}, \mathbf{KombPR}, \mathbf{Q_net})^T$, где:

$$\mathbf{C_new} = \begin{pmatrix} 300357 & 379387 & 457514 & 391844 & 301719 & 374946 \\ 275567 & 377365 & 288904 & 467043 & 288904 & 467043 \end{pmatrix}^T, \quad (22)$$

$\mathbf{T_link}$ (таблицы 3–5), $\mathbf{T_net} = (0,17\ 0,127\ 0,166\ 0,214)^T$ (с),

$\mathbf{KombPR} = (1\ 0\ 1)^T$, $\mathbf{Q_net} = 4370593$ (руб·с/бит).

Используя таблицы 1, 3-5, можно сформировать таблицы вероятностно-временных характеристик (ВВХ) для информационных направлений (ИН) (табл. 6-7).

Таблица 3. Вероятностно-временные характеристики КС (начало)

Характеристика	$s = 9$	$s = 10$	$s = 11$	$s = 12$
T_{link_1}, c	0,042	0,0368	0,0368	0,0485
T_{link_2}, c	0,0561	0,041	0,0419	0,0551
T_{link_3}, c	0,2241	0,0482	0,0527	0,0716

Таблица 4. Вероятностно-временные характеристики КС (продолжение)

Характеристика	$s = 13$	$s = 14$	$s = 15$	$s = 16$
T_{link_1}, c	0,0558	0,0405	0,0421	0,0433
T_{link_2}, c	0,0661	0,0433	0,0453	0,057
T_{link_3}, c	0,1299	0,0481	0,0519	0,1328

Таблица 5. Вероятностно-временные характеристики КС (окончание)

Характеристика	$s = 17$	$s = 18$	$s = 19$	$s = 20$
T_{link_1}, c	0,0499	0,0422	0,0529	0,0322
T_{link_2}, c	0,0662	0,0448	0,0692	0,0348
T_{link_3}, c	0,153	0,0481	0,156	0,0381

Таблица 6. Вероятностно-временные характеристики ИН (начало)

Характеристика	3-4	3-7	2-6	4-1
T_{inf_1}, c	0,195	0,148	0,098	0,115
T_{inf_2}, c	0,243	0,163	0,122	0,123
T_{inf_3}, c	0,487	0,187	0,354	0,134

Таблица 7. Вероятностно-временные характеристики ИН (окончание)

Характеристика	5-2	5-8	6-1	7-8
T_{inf_1}, c	0,129	0,091	0,188	0,083
T_{inf_2}, c	0,154	0,1	0,249	0,089
T_{inf_3}, c	0,257	0,124	0,666	0,1

Для нахождения ВВХ сети связи в целом необходимо взвесить ВВХ отдельных ИН (таблицы 6-7) с учетом доли трафика, поступающего в соответствующее ИН к суммарному трафику, который поступает в сеть связи:

$$\begin{aligned} T_{\text{net}_1} = & \frac{7}{77} \cdot 0,195 + \frac{15}{77} \cdot 0,148 + \frac{6}{77} \cdot 0,098 + \frac{17}{77} \cdot 0,115 + \\ & + \frac{14}{77} \cdot 0,129 + \frac{8}{77} \cdot 0,091 + \frac{5}{77} \cdot 0,188 + \frac{5}{77} \cdot 0,083 = 0,13; \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} T_{\text{net}_2} = & \frac{11}{66} \cdot 0,243 + \frac{2}{66} \cdot 0,163 + \frac{10}{66} \cdot 0,122 + \frac{3}{66} \cdot 0,123 + \\ & + \frac{17}{66} \cdot 0,154 + \frac{4}{66} \cdot 0,1 + \frac{17}{66} \cdot 0,249 + \frac{2}{66} \cdot 0,089 = 0,182; \end{aligned} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} T_{\text{net}_3} = & \frac{7}{81} \cdot 0,487 + \frac{8}{81} \cdot 0,187 + \frac{18}{81} \cdot 0,354 + \frac{11}{81} \cdot 0,134 + \\ & + \frac{13}{81} \cdot 0,257 + \frac{6}{81} \cdot 0,124 + \frac{10}{81} \cdot 0,666 + \frac{8}{81} \cdot 0,1 = 0,3. \end{aligned} \quad (25)$$

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод, что рассчитанные пропускные способности каналов связи разбалансированной по приоритетам ТСС с КП минимизируют затраты на аренду каналов связи (выражение (1)) и при этом обеспечивают выполнение требований (выражение (21)) на математическое ожидание задержки ПБД первого, второго и третьего приоритетов (выражения (23–25)).

4. Оценивание эффективности разработанного алгоритма

Alg_2(L, Q, T, Г, T_ad, Λ) методом имитационного

моделирования. Для оценки эффективности аналитических моделей и разработанных на их основе алгоритмов оптимизации в области телекоммуникаций широко применяется метод имитационного моделирования [32–34]. Имитационная модель ТСС с КП, учитывающая особенности переноса трафика различного приоритета разрабатывается в среде сетевого симулятора *OMNet++*. Она включает рабочие станции (*StandardHost*), маршрутизаторы (*Router*) и каналы связи (*DatarateChannel*) (рис. 4). Для соединения рабочих станций и маршрутизаторов, а также маршрутизаторов между собой используются порты *ppp*. На всех портах запрещается фрагментирование ПБД (параметру *mtu* присваивается значение 9192 байт). Параметры каналов связи задаются с помощью пропускной способности (параметр *datarate*) и задержки распространения (параметр *delay*).

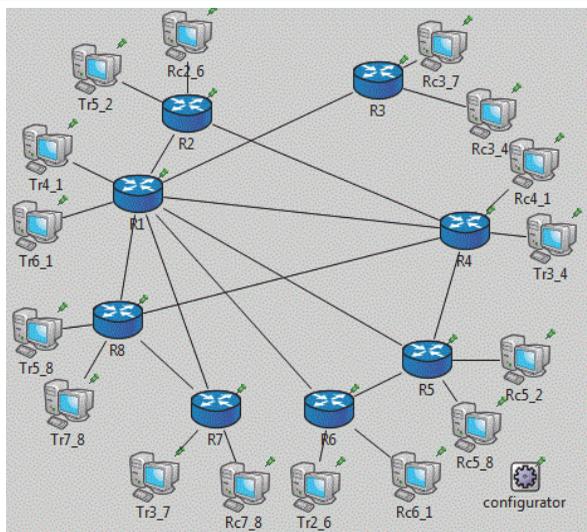


Рис. 4. Имитационная модель фрагмента ТСС с КП

Рабочие станции делятся на две группы: передатчики и приемники. Каждая рабочая станция является передатчиком или приемником трафика данных от трех приложений (*UdpBasicApp* для передатчиков и *UdpSink* для приемников).

Случайная длина ПБД выбирается с помощью экспоненциального распределения с параметром, который равен средней длине протокольных блоков данных в байтах. Случайный интервал времени между смежными ПБД выбирается с помощью экспоненциального распределения с параметром, который равен обратной величине от интенсивности поступления ПБД. Поток ПБД каждого информационного направления генерируется с помощью описанных выше двух экспоненциальных распределений и направляется в очередь порта *ppp* рабочей станции (передатчика).

Модуль приоритетного обслуживания (рис. 5) реализован с использованием: классификатора (*MultiFieldClassifier*), определяющего порт назначения ПБД и отправляющего его в соответствующий выход классификатора на основании правила, который описан в *XML*-файле; очереди для различных приоритетов (*DropTailQueue*), подключенных к соответствующим выходам классификатора; планировщика обслуживания (*PriorityScheduler*), который в случае, если канал связи свободен, проверяет, есть ли ПБД в очереди самого высокого приоритета, если такого ПБД нет, тогда он обращается к очереди меньшего приоритета и так далее пока не будет

найден ПБД или не будут просмотрены все очереди. Очереди для различных приоритетов имеют бесконечные размеры (параметру *frameCapacity* присваивается значение 0). Модуль приоритетного обслуживания устанавливается на физическом уровне в качестве очереди каждого порта *ppp* (в *ini*-файле проекта прописывается строка `**.ppp[*].queue.typeName = "Prior_Queue"`, где *Prior_Queue* – название модуля приоритетного обслуживания).

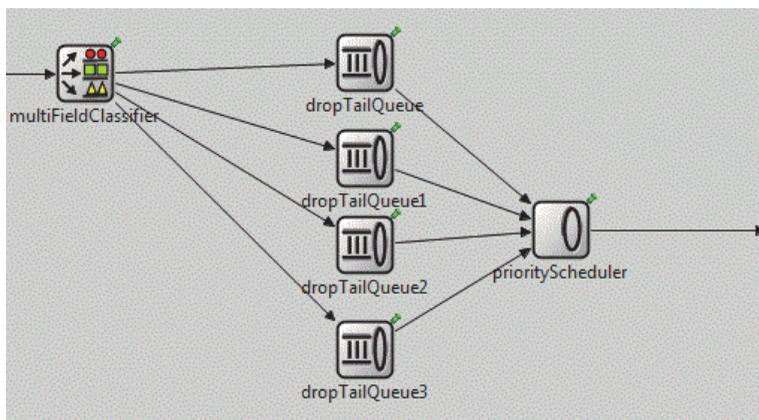


Рис. 5. Модуль приоритетного обслуживания маршрутизатора

Для каналов связи, соединяющих рабочие станции с маршрутизаторами, устанавливаются максимальная пропускная способность (параметру *datarate* присваивается значение 100000 Гб/с) и нулевая задержка распространения (параметру *delay* присваивается значение 0 с). Для каналов связи, соединяющих маршрутизаторы, устанавливаются требуемая пропускная способность (параметру *datarate* присваивается значение в соответствии вектор-столбцом (выражение (22)) и требуемая задержка распространения (параметру *delay* присваивается значение в соответствии вектор-строкой (выражение (17)).

Для конфигурирования сетевого взаимодействия используется компонент *Ipv4NetworkConfigurator*. В таблице маршрутизации компонента *Ipv4NetworkConfigurator* следует отключить поиск оптимального маршрута. Таблица маршрутизации компонента *Ipv4NetworkConfigurator* конфигурируется таким образом, чтобы реализовать статическую маршрутизацию в соответствии таблицей 1.

При достижении ПБД рабочей станции (приемника) он уничтожается, и в файле анализа результатов создается

соответствующая запись, которая включает информацию о времени жизни ПБД (другие характеристики, касающиеся ПБД, следует отключить при конфигурировании проекта, это позволит значительно уменьшить размер файла анализа результатов). Время имитационного моделирования устанавливается равным 86400 с, в этом случае имитационная модель ТСС с КП работает в установленном режиме и обслуживает в среднем $2 \cdot 10^6$ ПБД.

В таблице 8 представлены результаты сетевой задержки ПБД k -го приоритета в ИН, полученные методами аналитического и имитационного моделирования.

Таблица 8. Задержка ПБД k -го приоритета в ИН для аналитического и имитационного моделирования (с), и расхождения между ними (%)

Направления связи	Способ моделирования	T_{link_1} , с	T_{link_2} , с	T_{link_3} , с
3-4	Аналитическое	0,195	0,243	0,487
	Имитационное	0,205	0,245	0,409
	ошибка в %	5,120	0,820	-16,020
3-7	Аналитическое	0,154	0,163	0,187
	Имитационное	0,148	0,166	0,185
	ошибка в %	-3,890	1,840	-1,070
2-6	Аналитическое	0,098	0,122	0,354
	Имитационное	0,099	0,121	0,344
	ошибка в %	1,020	-0,820	-2,820
4-1	Аналитическое	0,115	0,123	0,134
	Имитационное	0,119	0,126	0,136
	ошибка в %	3,480	2,440	1,490
5-2	Аналитическое	0,129	0,154	0,257
	Имитационное	0,133	0,156	0,249
	ошибка в %	3,100	1,300	-3,110
5-8	Аналитическое	0,091	0,100	0,124
	Имитационное	0,092	0,100	0,122
	ошибка в %	1,100	0	-1,610
6-1	Аналитическое	0,188	0,249	0,666
	Имитационное	0,198	0,251	0,595
	ошибка в %	5,320	0,800	-10,66
7-8	Аналитическое	0,083	0,089	0,100
	Имитационное	0,083	0,089	0,100
	ошибка в %	0	0	0

Для нахождения ВВХ сети связи в целом необходимо взвесить ВВХ отдельных ИН, полученные с помощью имитационной модели, с учетом доли трафика, поступающего в соответствующее ИН к суммарному трафику в сети связи:

$$\begin{aligned} \mathbf{T}_{\text{net}_1} = & \frac{7}{77} \cdot 0,205 + \frac{15}{77} \cdot 0,154 + \frac{6}{77} \cdot 0,099 + \frac{17}{77} \cdot 0,119 + \\ & + \frac{14}{77} \cdot 0,133 + \frac{8}{77} \cdot 0,092 + \frac{5}{77} \cdot 0,198 + \frac{5}{77} \cdot 0,083 = 0,135; \end{aligned} \quad (26)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{T}_{\text{net}_2} = & \frac{11}{66} \cdot 0,245 + \frac{2}{66} \cdot 0,166 + \frac{10}{66} \cdot 0,121 + \frac{3}{66} \cdot 0,126 + \\ & + \frac{17}{66} \cdot 0,156 + \frac{4}{66} \cdot 0,1 + \frac{17}{66} \cdot 0,251 + \frac{2}{66} \cdot 0,089 = 0,184; \end{aligned} \quad (27)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{T}_{\text{net}_3} = & \frac{7}{81} \cdot 0,409 + \frac{8}{81} \cdot 0,185 + \frac{18}{81} \cdot 0,344 + \frac{11}{81} \cdot 0,136 + \\ & + \frac{13}{81} \cdot 0,249 + \frac{6}{81} \cdot 0,122 + \frac{10}{81} \cdot 0,595 + \frac{8}{81} \cdot 0,1 = 0,281. \end{aligned} \quad (28)$$

Анализ результатов имитационного моделирования позволяет сделать вывод, что требование на математическое ожидание задержки для ПБД первого приоритета не выполнено и превышено на 3,54 %, требование на математическое ожидание задержки для ПБД второго приоритета не выполнено и превышено на 0,89 %, требование на математическое ожидание задержки для ПБД третьего приоритета перевыполнено на 6,38 %. Различие результатов аналитической и имитационной модели объясняется тем, что в $\text{Alg}_2(\mathbf{L}, \mathbf{Q}, \mathbf{T}, \mathbf{\Gamma}, \mathbf{T}_{\text{ad}}, \mathbf{\Lambda})$ не учитывается последствие, которое было исследовано в работе [11]. Для выполнения требований к задержкам ПБД рекомендуется произвести корректировку исходных данных, а именно уменьшить требование к математическому ожиданию задержки для ПБД первого приоритета на 3,54 % и для ПБД второго приоритета на 0,89 %. Затем повторно решить оптимизационную задачу с использованием $\text{Alg}_2(\mathbf{L}, \mathbf{Q}, \mathbf{T}, \mathbf{\Gamma}, \mathbf{T}_{\text{ad}}, \mathbf{\Lambda})$ и проверить корректность результатов на имитационной модели.

5. Заключение. В работе разработан алгоритм выбора пропускных способностей каналов связи разбалансированной по приоритетам транспортной сети с коммутацией пакетов, учитывающий особенности переноса трафика различного приоритета и обеспечивающий минимум затрат на аренду каналов связи при

наличии ограничений на математические ожидания задержки для ПБД первого, второго и k -го приоритетов.

Результаты имитационного моделирования позволяют сделать вывод, что в условиях, когда имеется два и более приоритета ПБД, каждый из которых характеризуется своей допустимой сетевой задержкой, а поступающие потоки ПБД в информационных направлениях имеют различные интенсивности поступления ПБД, разработанный алгоритм более эффективен, чем алгоритм, представленный в [13]. Направлением дальнейшего исследования является решение задачи выбора пропускных способностей логических каналов связи транспортной сети связи.

Литература

1. *Armitage G.* Quality of Service in IP Networks: Foundations for a Multi-Service Internet // Macmillan Technical Publishing. 2000. 285 с.
2. *Miraz M. H. et al.* Simulation and Analysis of Quality of Service (QoS) Parameters of Voice over IP (VoIP) Traffic through Heterogeneous Networks // International Journal of Advanced Computer Science and Applications. 2017. vol. 8. no. 7. pp. 242–248.
3. *Вишневский В.М.* Теоретические основы проектирования компьютерных сетей // М.: Техносфера. 2003. 512 с.
4. *Назаров А.Н.* Модели и методы расчета показателей качества функционирования узлового оборудования и структурно-сетевых параметров сетей связи следующего поколения // Поликом. 2011. 491 с.
5. *Семенов Ю.В.* Проектирование сетей связи следующего поколения // Наука и Техника. 2005. 240 с.
6. *Трегубов Р.Б., Саитов И.А.* Теоретические основы анализа и оптимизации иерархических многоуровневых маршрутизирующих систем // Академия ФСО России. 2017. 585 с.
7. *Степанов С.Н.* Теория телетрафика: концепции, модели, приложения // М.: Горячая линия Телеком. 2015. 868 с.
8. *Башарин Г.П., Бочаров П.П., Коган Я.А.* Анализ очередей в вычислительных сетях. Теория и методы расчета // М.: Наука. 1989. 336 с.
9. *Courtois P.J.* Decomposability, instabilities, saturation in multiprogramming systems // Communications of the ACM. 1975. vol. 18. no. 7. pp. 371–377.
10. *Kuhn P.* Analysis of complex queuing networks by decomposition // 8th International Teletraffic Congress. 1976. pp. 236-1.
11. *Трегубов Р.Б., Андреев С.Ю., Переверзев А.Н.* Математическая модель транспортной сети связи с коммутацией пакетов, учитывающая особенности переноса трафика различного приоритета // Телекоммуникации. 2019. № 8 С. 36–48.
12. *Kleinrock L.* Queueing Systems, volume 2: Computer Applications // New York: Wiley. 1976. 576 p.
13. *Трегубов Р.Б., Андреев С.Ю., Тутов С.Ю.* Задача выбора пропускных способностей каналов связи транспортной сети связи, учитывающей особенности переноса трафика различного приоритета // Информационные системы и технологии. 2019. № 4(114). С. 93–102.

14. Будко П.А. Выбор пропускных способностей каналов при синтезе сети связи в условиях изменяющейся нагрузки // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2000. Т.3. № 3-4. С. 68–72.
15. Орешин Н.А., Орешин А.Н., Шумилин В.С., Панчук П.В. Методика оптимального распределения каналов и трактов на основе определения продуктивных путей с помощью автоматизированных систем управления связью // Телекоммуникации. 2016. № 10 С. 44–48.
16. Трегубов Р.Б. Мясин Н.И., Мясин К.И. Оптимизация скоростей передачи битового потока в каналах транспортной сети связи с коммутацией пакетов, обеспечивающая максимум вероятности своевременной доставки протокольных блоков данных // Т-Сопн: Телекоммуникации и транспорт. 2015. Т. 9. № 2. С. 34–40.
17. Дымарский Я.С., Нурмиева М.В. Оптимальное распределение ресурсов в сети с разнородными потоками // Вестник МАЙСУ. 2002. № 6. С. 31–35.
18. Tregubov R.B., Saitov I.A., Korolev A.V. Methods of Optimization of Characteristics in Small and Medium Connectivity Data Transmission Networks // Telecommunications and Radio Engineering. 2009. vol. 68. pp. 167–179.
19. Лузгачев М.В. Самуйлов К.Е. Метод решения задачи разделения ресурсов мультисервисной сети между виртуальными частными сетями с одноадресными и многоадресными соединениями. Вестник РУДН. 2010. № 2(1). С. 42–53.
20. Qu L., Assi C., Shaban K. Network function virtualization scheduling with transmission delay optimization // 2016 IEEE/IFIP Network Operations and Management Symposium. 2016. pp. 638–644.
21. Capone A. et al. Routing, scheduling and channel assignment in Wireless Mesh Networks: Optimization models and algorithms // Ad Hoc Networks. 2010. vol. 8(6). pp. 545–563.
22. Divakaran D.M., Gurusamy M. Towards flexible guarantees in clouds: Adaptive bandwidth allocation and pricing // IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems. 2015. vol. 26. no. 6. pp. 1754–1764.
23. Maglaris B.S., Schwartz M. Optimal fixed frame multiplexing in integrated line and packet switched communication networks // IEEE Transactions on Information Theory. 1982. vol. 28. № 2. pp. 263–273.
24. Qu L., Assi C., Shaban K. Delay-Aware Scheduling and Resource optimization with Network function virtualization // IEEE Transactions on communications. 2016. vol. 9. pp. 3746–3758.
25. Addis B., Belabed D., Bouet M., Secci S. Virtual network functions placement and routing optimization // 2015 IEEE 4th International Conference on Cloud Networking (CloudNet). 2015. pp. 171–177.
26. Dräxler S., Karl H., Mann Z.A. Jasper: Joint optimization of scaling, placement, and routing of virtual network services // IEEE Transactions on Network and Service Management. 2018. vol. 15. no. 3. pp. 946–960.
27. Dräxler S., Karl H. Specification, composition, and placement of network services with flexible structures // International Journal of Network Management. vol. 27. no. 2. pp. e1963.
28. Luizelli M.C., da Costa Cordeiro W.L., Buriol L.S., Gasparly L.P. A fix-and-optimize approach for efficient and large scale virtual network function placement and chaining // Computer Communications. 2017. vol. 102. pp. 67–77.
29. Майорова Н.Л., Глазков Д.В. Методы оптимизации: учебное пособие // Ярославль: ЯрГУ. 2015. 112 с.
30. Васильев Ф.П. Методы оптимизации // М.: Факториал Пресс. 2002. 824 с.
31. Гладких Б.А. Методы оптимизации и исследование операций для бакалавров информатики. Ч. II. Нелинейное и динамическое программирование: учебное пособие // НТЛ. 2011. 264 с.

32. *Burbank J.* Modeling and Simulation: A Practical Guide for Network Designers and Developers // IEEE Communications Magazine. 2009. vol. 47. no. 3. 118 p.
33. *Ткачев М.С.* Моделирование распределения потоков трафика с учетом перегрузок каналов связи MPLS-TE DIFFSERV // Вестник КРСУ. 2016. Т. 16. № 1 С. 110–112.
34. *Хабаров С.П.* Моделирование Ethernet сетей в среде OMNeT++ INET framework // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2018. Т. 18. № 3. С. 462–472.

Андреев Сергей Юрьевич — сотрудник, Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации (Академия ФСО России). Область научных интересов: теория графов, теория массового обслуживания, теория вероятностей, применение методов математического моделирования в телекоммуникациях. Число научных публикаций — 8. us12a@mail.ru; ул. Приборостроительная, 35, 302015, Орел, Россия; р.т.: +7(4862)54-9731.

Трегубов Роман Борисович — д-р техн. наук, сотрудник, Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации (Академия ФСО России). Область научных интересов: теория графов, теория массового обслуживания, теория вероятностей, применение методов математического моделирования в телекоммуникациях. Число научных публикаций — 65. treba@list.ru; ул. Приборостроительная, 35, 302015, Орел, Россия; р.т.: +7(4862)54-9731.

Мионов Александр Егорович — канд. техн. наук, сотрудник, Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации (Академия ФСО России). Область научных интересов: теория массового обслуживания, теория вероятностей, применение методов математического моделирования в телекоммуникациях. Число научных публикаций — 42. us12a@mail.ru; ул. Приборостроительная, 35, 302015, Орел, Россия; р.т.: +7(4862)54-9731.

S. ANDREEV, R. TREGUBOV, A. MIRONOV
**PROBLEM OF SELECTING COMMUNICATION CHANNELS
BANDWIDTH OF TRANSPORT NETWORK TAKING INTO
ACCOUNT IMBALANCE OF VARIOUS PRIORITY TRAFFIC**

Andreev S., Tregubov R., Mironov A. Problem of Selecting Communication Channels Bandwidth of Transport Network Taking into Account Imbalance of Various Priority Traffic.

Abstract. The paper proposes a solution to the problem of selecting the bandwidth capabilities of digital communication channels of a transport communication network taking into account the imbalance of data traffic by priorities. The algorithm for selecting bandwidth guarantees the minimum costs associated with renting digital communication channels with optimal bandwidth, provided that the requirements for quality of service of protocol data blocks of the first, second, and k-th priority in an unbalanced in terms of priorities transport communication network are met. At the first stage of solving the problem, using the method of Lagrange multipliers, an algorithm for selecting the capacities of digital communication channels for a balanced in terms of priorities transport network was developed. High performance of this algorithm was ensured by applying algebraic operations on matrices (addition, multiplication, etc.). At the second stage of solving the problem, using the generalized Lagrange multipliers method, we compared the conditional extrema of the cost function for renting digital communication channels for single active quality of service requirements for protocol data blocks, for all possible pairs of active quality of service requirements for protocol data blocks, for all possible triples of active requirements for the quality of service of protocol data units, and so on up to the case when all the requirements for quality of service maintenance of protocol data units are active simultaneously. At the third stage of solving the problem, an example of selecting the bandwidth capabilities of digital communication channels of the unbalanced by priorities transport network consisting of eight routers serving protocol data blocks of three priorities was considered. At the fourth stage of the solution of the problem of the choice of carrying capacities the estimation of efficiency of the developed algorithm by a method of simulation modeling was carried out. To this end, in the environment of the network simulator OMNet ++, the unbalanced in terms of priority transport communication network consisting of eight routers connected by twelve digital communication channels with optimal bandwidth was investigated.

Keywords: Communication Channel Capacity, Protocol Data Unit, Optimization, Lagrange Multipliers Technique.

Andreev Sergej — Researcher, Academy of Federal Security Guard Service of the Russian Federation. Research interests: graph theory, waiting theory, probability theory, application of mathematical model approaches in telecommunications. The number of publications — 8. us12a@mail.ru; 35, Priborostroitel'naya str., 302015, Orel, Russia; office phone: +7(4862)54-9731.

Tregubov Roman — Ph.D., Dr.Sci., Researcher, Academy of Federal Security Guard Service of the Russian Federation. Research interests: graph theory, waiting theory, probability theory, application of mathematical model approaches in telecommunications. The number of publications — 65. treba@list.ru; 35, Priborostroitel'naya str., 302015, Orel, Russia; office phone: +7(4862)54-9731.

Mironov Alexander — Ph.D., Researcher, Academy of Federal Security Guard Service of the Russian Federation. Research interests: graph theory, waiting theory, probability theory, application of mathematical model approaches in telecommunications. The number of publications — 42. us12a@mail.ru; 35, Priborostroitel'naya str., 302015, Orel, Russia; office phone: +7(4862)54-9731.

References

1. Armitage G. Quality of Service in IP Networks: Foundations for a Multi-Service Internet. Macmillan Technical Publishing, 2000. 285 c.
2. Miraz M. H. et al. Simulation and Analysis of Quality of Service (QoS) Parameters of Voice over IP (VoIP) Traffic through Heterogeneous Networks. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*. 2017. vol. 8. no. 7. pp. 242–248.
3. Vishnevsky V.M. *Teoreticheskie osnovy proektirovaniya komp'yuternykh setej* [Theoretical foundations of the design of computer networks]. M.: Technosfera. 2003. 512 p. (In Russ.).
4. Nazarov A.N., Sychev K.I. *Modeli i metody rascheta pokazatelej kachestva funkcionirovaniya uzlovoغو oborudovaniya i strukturno-setevykh parametrov setej svyazi sledujushhego pokoleniya* [Models and methods for calculating the quality indicators of the operation of nodal equipment and structural-network parameters of the next generation communication networks]. Polikom. 2011. 491 p. (In Russ.).
5. Semenov Yu.V. *Proektirovanie setej svyazi sledujushhego pokoleniya* [Design of communication networks of the next generation]. Nauka i Technika. 2005. 240 p. (In Russ.).
6. Tregubov R.B., Saitov I.A. *Teoreticheskie osnovy analiza i optimizacii ierarhicheskikh mnogourovnevnykh marshrutizirujushhih sistem* [Theoretical foundations of the analysis and optimization of hierarchical multi-level routing systems]. Akademiya FSO Rossii. 2017. 585 p. (In Russ.).
7. Stepanov S.N. *Teorija teletrafika: koncepcii, modeli, prilozhenija* [Teletraffic theory: concepts, models, applications]. M.: Goryachaya liniya Telekom. 2015. 868 p. (In Russ.).
8. Basharin G.P., Bocharov P.P., Kogan Y.A. *Analiz ocheredej v vychislitel'nykh setjah. Teorija i metody rascheta* [Analysis of queues in computer networks. Theory and calculation methods]. M.: Nauka. 1989. 336 p. (In Russ.).
9. Courtois P.J. Decomposability, instabilities, saturation in multiprogramming systems. *Communications of the ACM*. 1975. vol. 18. no. 7. pp. 371–377.
10. Kuhn P. Analysis of complex queuing networks by decomposition. 8th International Teletraffic Congress. 1976. pp. 236-1.
11. Tregubov R.B., Andreev S.Yu., Pereverzev A.N. [Mathematical model of a transport communication network with packet switching, taking into account the features of traffic transfer of different priority]. *Telekommunikacii – Telecommunication*. 2019. vol. 8. pp. 36–48. (In Russ.).
12. Kleinrock L. *Queueing Systems, volume 2: Computer Applications*. New York: Wiley. 1976. 576 p.
13. Tregubov R.B., Andreev S.Yu., Tutov S.Yu. [The problem of selecting the bandwidth of communication channels of a transport communication network, taking into account the features of traffic transfer of various priorities]. *Informacionnye sistemy i tehnologii – Information Systems and Technologies*. 2019. vol. 4(114). pp. 93–102. (In Russ.).
14. Budko P.A. [Choice of channel bandwidth in the synthesis of a communication network under a changing load]. *Fizika volnovykh processov i radiotekhnicheskie sistemy – Physics of Wave Processes and Radio Systems*. 2000. Issue 3. vol. 3-4. pp. 68–72. (In Russ.).
15. Oreshin N.A., Oreshin A.N., Shumilin V.S., Panchuk P.V. [Technique of the optimal distribution of channels and paths based on determining productive paths using automated communication control systems]. *Telekommunikacii – Telecommunication*. 2016. vol. 10. pp. 44–48. (In Russ.).
16. Tregubov R.B., Myasin N.I., Myasin K.I. [Optimization of bitrate transmission rates in the channels of a packet-switched transport communication network, providing maximum probability of timely delivery of protocol data units]. *T-Com: Telekommunikacii i transport – T-Comm: telecommunications in transport industry* 2015. Issue 9. vol. 2. pp. 34–40. (In Russ.).

17. Dymarsky Ya.S., Nurmieva M.V. [Optimal distribution of resources in a network with heterogeneous flows] *Vestnik MAISU – Journal of International Academy*. 2002. vol. 6. pp. 31–35. (In Russ.).
18. Tregubov R.B., Saitov I.A., Korolev A.V. *Methods of Optimization of Characteristics in Small and Medium Connectivity Data Transmission Networks*. Telecommunications and Radio Engineering. 2009. vol. 68. pp. 167–179.
19. Luzgachev M.V., Samuilov K.E. [Method for solving the problem of sharing resources of a multiservice network between virtual private networks with unicast and multicast connections]. *Vestnik RUDN – Bulletin of Peoples' Friendship University of Russia*. 2010. vol. 2 (1). pp. 42–53. (In Russ.).
20. Qu L., Assi C., Shaban K. Network function virtualization scheduling with transmission delay optimization. 2016 IEEE/IFIP Network Operations and Management Symposium. 2016. pp. 638–644.
21. Capone A. et al. Routing, scheduling and channel assignment in Wireless Mesh Networks: Optimization models and algorithms. *Ad Hoc Networks*. 2010. vol. 8(6). pp. 545–563.
22. Divakaran D.M., Gurusamy M. Towards flexible guarantees in clouds: Adaptive bandwidth allocation and pricing. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*. 2015. vol. 26. no. 6. pp. 1754–1764.
23. Maglaris B.S., Schwartz M. Optimal fixed frame multiplexing in integrated line and packet switched communication networks. *IEEE Transactions on Information Theory*. 1982. vol. 28. no. 2. pp. 263–273.
24. Qu L., Assi C., Shaban K. Delay-Aware Scheduling and Resource optimization with Network function virtualization. *IEEE Transactions on communications*. 2016. vol. 9. pp. 3746–3758.
25. Addis B., Belabed D., Bouet M., Secci S. Virtual network functions placement and routing optimization. 2015 IEEE 4th International Conference on Cloud Networking (CloudNet). 2015. pp. 171–177.
26. Dräxler S., Karl H., Mann Z.A. Jasper: Joint optimization of scaling, placement, and routing of virtual network services. *IEEE Transactions on Network and Service Management*. 2018. vol. 15. no. 3. pp. 946–960.
27. Dräxler S., Karl H. Specification, composition, and placement of network services with flexible structures. *International Journal of Network Management*. vol. 27. no. 2. pp. e1963.
28. Luizelli M.C., da Costa Cordeiro W.L., Buriol L.S., Gasparly L.P. A fix-and-optimize approach for efficient and large scale virtual network function placement and chaining. *Computer Communications*. 2017. vol. 102. pp. 67–77.
29. Mayorova N.L., Glazkov D.V. *Metody optimizacii: uchebnoe posobie* [Methods of optimization: a training manual]. Yaroslavl' YarGU. 2015. 112 p. (In Russ.).
30. Vasiliev F.P. *Metody optimizacii* [Optimization Methods]. M. 2002. 824 p. (In Russ.).
31. Gladkih B.A. *Metody optimizacii i issledovanie operacij dlya bakalavrov informatiki. CH. II. Nelinejnoe i dinamicheskoe programirovanie: uchebnoe posobie* [Optimization methods and operations research for bachelors of computer science. Part II. Nonlinear and dynamic programming: a tutorial]. NTL. 2011. 264 p. (In Russ.).
32. Burbank J. *Modeling and Simulation: A Practical Guide for Network Designers and Developers*. *IEEE Communications Magazine*. 2009. vol. 47. no. 3. 118 p.
33. Tkachev M.S. *Modelirovanie raspredelenija potokov trafika s uchetom peregruzok kanalov svyazi MPLS-TE DIFFSERV* [Modeling the distribution of traffic flows taking into account congestion of communication channels MPLS-TE DIFFSERV]. *Vestnik KRSU – Bulletin of KRSU*. 2016. Issue 16. vol. 1. pp. 110–112. (In Russ.).
34. Khabarov S.P. *Modelirovanie Ethernet setej v srede OMNeT++ INET framework* [Modeling Ethernet networks in an OMNeT ++ INET framework]. *Nauchno-tehnicheskij vestnik informacionnyh tekhnologij, mekhaniki i optiki – Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics, and Optics*. 2018. Issue 18. vol. 3. pp. 462–472. (In Russ.).

К.В. САЗОНОВ, М.В. ТАТАРКА, А.С. ЦЫГАНОВ, В.Е. БЕССОЛЬЦЕВ
**ИДЕНТИФИКАЦИЯ АБОНЕНТСКИХ ТЕРМИНАЛОВ
ИНФОРМАЦИОННО-ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СЕТЕЙ
НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ ФОРМИРОВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ В
СОВРЕМЕННЫХ КОМПЬЮТЕРНЫХ СИСТЕМАХ**

Сазонов К.В., Татарка М.В., Цыганов А.С., Бессольцев В.Е. Идентификация абонентских терминалов информационно-телекоммуникационных сетей на основе модели формирования изображений в современных компьютерных системах.

Аннотация. Одной из важных задач таких теорий, как теория распознавания образов и теория защиты информации, является задача идентификации абонентских терминалов информационно-телекоммуникационных сетей.

Актуальность данной темы обусловлена необходимостью исследования методов идентификации абонентских терминалов влияющих на построение систем защиты информации транслируемой в информационно-телекоммуникационных сетях.

Основными параметрами, позволяющими уникально идентифицировать абонентские терминалы в сети, являются адресно-коммутационная информация, а также параметры, которые характеризуют программно-аппаратную часть компьютерной системы. На основе этих параметров формируются цифровые отпечатки абонентских терминалов.

Применение пользователями абонентских терминалов анонимных сетей и блокирования методов формирования и сбора параметров цифрового отпечатка не позволяет в ряде случаев достичь требуемой степени достоверности идентификации.

Из-за особенностей формирования цифровых изображений в современных компьютерных системах множество параметров преобразований накладывают свой отпечаток на выходной графический примитив, формируя тем самым цифровой отпечаток абонентского терминала, который зависит от размещения семплов в пикселе, от используемых алгоритмов вычисления степени влияния пикселей, а также от применяемых процедур сглаживания изображений в графической подсистеме.

Предлагается оригинальная модель формирования изображений средствами веб-обозревателя абонентского терминала, позволяющая повысить степень достоверности идентификации в условиях анонимизации пользователей информационно-телекоммуникационных сетей.

Выявлены особенности формирования цифровых изображений в графических подсистемах современных компьютерных систем. Данные особенности позволяют осуществлять идентификацию в условиях априорной неопределенности относительно режимов и параметров передачи информации.

Ключевые слова: идентификация, модель формирования изображений, абонентский терминал, цифровой отпечаток, деанонимизация.

1. Введение. Одним из основных параметров, который позволяет уникально идентифицировать абонентов в информационно-телекоммуникационных сетях (ИТКС), является IP-адрес [1, 2], поэтому первоочередная задача методов сохранения анонимности заключается в подмене или сокрытии данного параметра. Для скрытия IP-адреса используются следующие технологии (рис. 1):

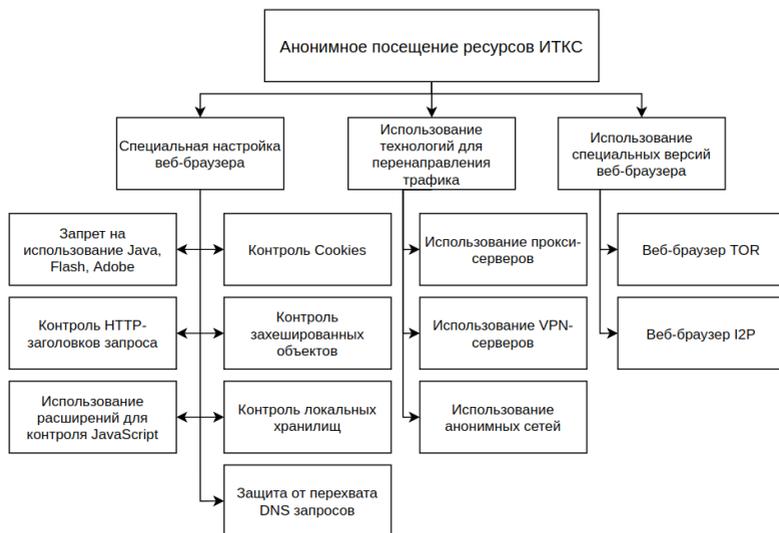


Рис. 1. Технологии анонимизации при передаче данных

– использование прокси-серверов. В этом случае анонимизация доступа к различным ресурсам ИТКС достигается скрыванием сведений об источнике запроса или пользователе, при этом целевой получатель видит только IP-адрес и другую информацию прокси-сервера. Возможно использование искажающего прокси-сервера, который передает целевому получателю ложную информацию об истинном адресе источника передаваемых данных;

– виртуальные частные сети – технология, посредством которой создают одно или более соединений поверх другой сети. При этом соединение между абонентом и сервером шифруется, благодаря чему создается максимально анонимный доступ в интернет;

– SSH-тоннель – это технология создания анонимных соединений в ИТКС посредством SSH-протокола. Его особенность в том, что информация шифруется на одном конце тоннеля и расшифровывается на другом. Провайдер и веб-ресурсы здесь используются только для передачи трафика;

– анонимные сети на основе «луковичной маршрутизации» – использующие послынную систему шифрования адресов маршрутизаторов, с помощью которой между пользователем и веб-ресурсами устанавливается анонимное соединение с защитой от перехвата сообщений;

– децентрализованные сети, которые работают поверх основного сетевого протокола ИТКС, при этом в них не используются IP-адреса. Доступ к ним обеспечивается открытым программным обеспечением, создающим специальный тоннель, в котором шифруется трафик и скрываются IP-адреса;

– настройки и плагины к браузерам, которые позволяют отключать функции, отвечающие за сбор сведений об их использовании. Плюсы плагинов для анонимности – простота использования и доступность. Минусы – слабая безопасность и относительная стабильность.

Для обеспечения анонимной передачи данных могут быть использованы сочетания методов обеспечения анонимности (рис. 2).



Рис. 2. Вариант построения комбинированной анонимной сети на базе TOR и VPN

Таким образом, современные технологии предоставляют широкий спектр возможностей по скрытию параметров абонентских терминалов (АТ) при действиях в ИТКС [10, 11], а существующие методики не позволяют идентифицировать АТ анонимных сетей без получения априорных данных о принципах функционирования системы передачи данных.

2. Методы идентификации абонентских терминалов в современных ИТКС. В условиях отсутствия доступа к коммутационно-адресной информации идентифицировать конкретный абонентский терминал ИТКС (а иногда и самого пользователя) можно посредством сбора и классификации доступной информации о параметрах программно-аппаратной реализации абонентских терминалов [18, 19, 21]. Параметры АТ могут быть получены благодаря специфике взаимодействия клиентов и серверов в ИТКС. Так для взаимодействия АТ пользователя с удаленными ресурсами, размещенными на сервере, необходимо специальное программное обеспечение. Основным программным средством для доступа к ресурсам сети интернет является веб-браузер. Схема взаимодействия АТ с удаленным сервером показана на рисунке 3.

Полученные данные формируют цифровой отпечаток – уникальный идентификатор программно-аппаратной конфигурации АТ ИТКС.

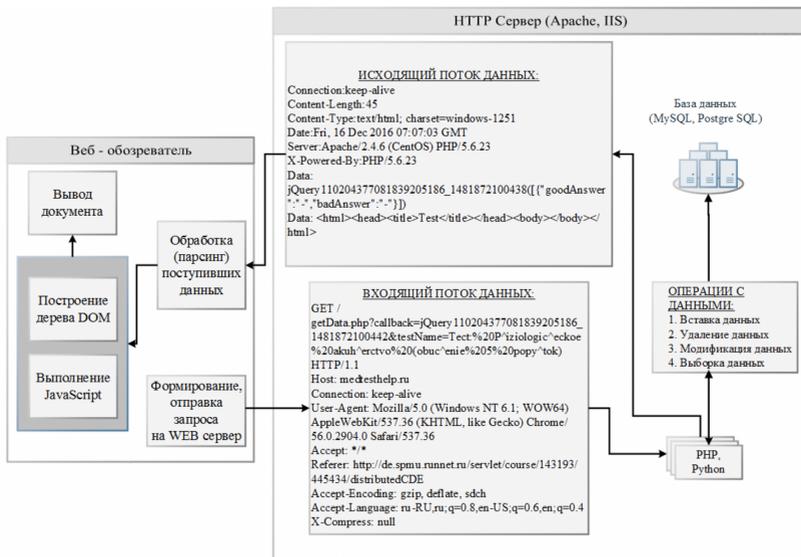


Рис. 3. Схема взаимодействия веб-браузера с удаленными ресурсами на сервере

Существующие методы позволяют получать цифровой отпечаток АТ с помощью сбора максимально доступной информации о настройках операционной системы, версиях и настройках веб-браузеров, установленных драйверах устройств и аппаратных особенностях АТ [3–7]. Классификация методов формирования и хранения цифрового отпечатка представлена на рисунке 4.

Наиболее известный и распространенный способ сохранения небольшого фрагмента данных на машине пользователя – это HTTP cookies, данный способ позволяет гарантированно распознавать и вести статистику обращений АТ к конкретному серверу. Однако в настоящее время существует хорошо отработанная методика защиты от данного способа отслеживания АТ, а именно автоматическая очистка файла, содержащего cookies, использование веб-браузера в режиме «инкогнито», использование специализированных расширений веб-браузера, которые позволяют блокировать и редактировать cookies. Для формирования цифрового отпечатка могут быть использованы различные технологии отображения данных. Так, при использовании флештехнологий (Flash Local Shared Objects) можно сформировать и хранить на АТ уникальный идентификатор веб-браузера.

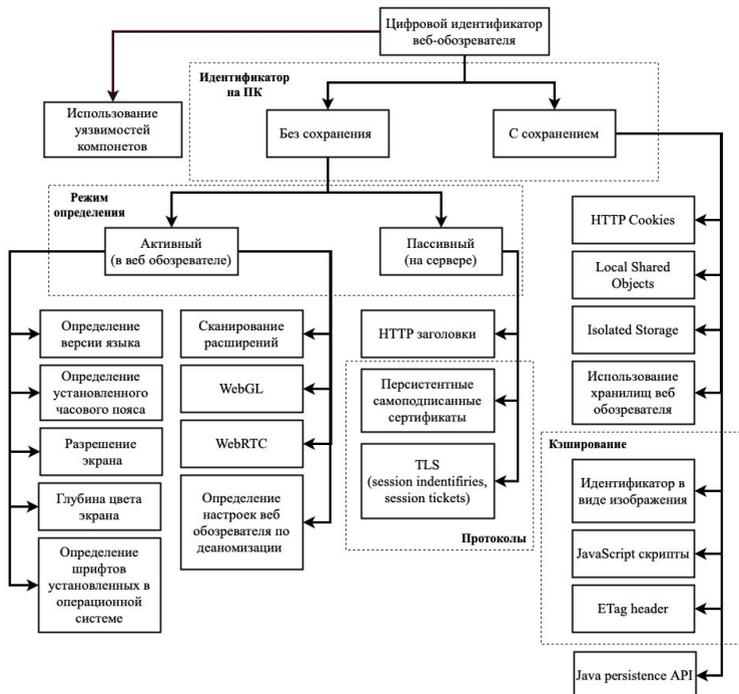


Рис. 4. Классификация способов получения цифрового отпечатка абонентского терминала

Один из самых эффективных пассивных способов формирования и хранения цифрового отпечатка основан на использовании хранилища параметров обозревателя, которые не удаляются при полной очистке и доступны из любых вкладок различных веб-браузеров [17].

Все современные веб-браузеры поддерживают кэширование – временное сохранение файлов на машине пользователя, применяемое для уменьшения нагрузки на сервер. Существуют следующие способы сохранения идентификатора в хранилищах веб-браузера:

- файл JavaScript (идентификатор помещается в переменную);
- изображение (идентификатор помещается внутрь изображения);
- помещение идентификатора в заголовки eTag запрашиваемых у сервера объектов (рис. 5).

Методы снятия цифрового отпечатка без сохранения результатов на АТ можно условно разделить на два режима: активный (в веб-браузере), пассивный (на сервере). Активный режим подразумевает работу в веб-

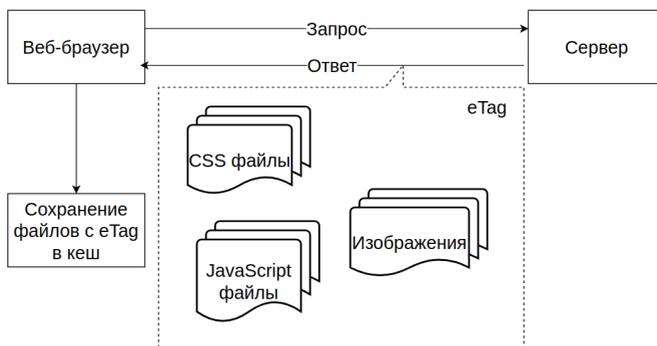


Рис. 5. Схема привязки eTag

браузере исполняемого кода, с помощью которого происходит определение таких характеристик АТ, как:

- версия языка веб-браузера;
- установленный часовой пояс в операционной системе пользователя;
- установленное разрешение экрана персонального компьютера (ПК) пользователя;
- установленная глубина цвета экрана ПК пользователя;
- установленные шрифты в операционной системе пользователя;
- установленные расширения в веб-браузере, в том числе и их версии.

К отдельным способам получения цифрового отпечатка в активном режиме (без сохранения идентификатора на машине пользователя) стоит отнести:

- построение идентификатора посредством анализа особенностей вывода изображения библиотекой WebGL;
- использование уникального идентификатора, создаваемого в WebRTC.

Пассивные режимы определения основаны на поиске или составлении уникального идентификатора на серверной стороне по приходящим данным с ПК пользователя. К ним можно отнести:

- анализ заголовков HTTP-запросов со стороны ПК пользователя к серверу. В результате такого анализа можно определить тип и версию веб-браузера, тип и версию интерпретатора веб-браузера, тип операционной системы пользователя, установленной на ПК, состояние доступа к cookies, состояние кешируемых объектов (на сколько часто происходит удаление);

– персистентные самоподписанные сертификаты, формируемые по запросу серверной стороны, являются уникальным объектом, данные о котором передаются серверу при каждом обращении к нему;

– WebRTC – технология, позволяющая устанавливать соединение между двумя веб-браузерами (соединение типа точка-точка) без управляющих серверов посредников. WebRTC входит в рекомендации консорциума W3C и поддерживается всеми основными браузерами, включая Chrome, Firefox и Opera. Угроза анонимизации с использованием технологии WebRTC заключается в раскрытии реального IP-адреса пользователя;

– идентификация веб-браузера посредством идентификатора кеша session identifiers, session tickets.

Проведенный анализ позволил определить, что наиболее перспективным методом идентификации является активный метод – вследствие устранения возможности подмены личности при посещении ресурсов сети интернет. Однако стоит отметить, что современное антивирусное программное обеспечение проводит мониторинг потенциально уязвимого содержимого, загружаемого в веб-браузер при посещении удаленных ресурсов, кроме того, многие пользователи производят отключение и блокировку уязвимого содержимого, которое позволяет идентифицировать АТ пользователей ИТКС.

Полноценный доступ к современным удаленным ресурсам сети интернет не возможен без использования некоторых технологий. Блокирование технологий веб-браузера приведет к значительным изменениям запрашиваемых данных и, как следствие, к полной невозможности восприятия пользователем полученной информации. Это утверждение относится и к анонимным сетям передачи данных. Такой технологией является использование кода на языке программирования JavaScript как языка сценариев для придания интерактивности веб-страницам.

По состоянию на конец 2018 года примерно 94,5% всех сайтов сети Интернет используют JavaScript для выполнения сценариев на стороне клиента, которые незаметно для пользователя интегрируются в HTML на стороне сервера с помощью кроссплатформенного механизма выполнения.

Таким образом, учитывая механизмы блокировки методов получения цифрового отпечатка, при применении пользователями ИТКС для передачи информации анонимных сетей, использование JavaScript является практически единственным средством сбора информации в интересах дальнейшей идентификации АТ пользователя с применением пассивного метода.

3. Модель системы формирования изображений абонентского терминала. Развитие современных информационно-

коммуникационных сетей влечет за собой создание и модернизацию существующих стандартов и протоколов передачи и представления данных. Так, несколько лет назад была анонсирована и оперативно осуществлена поддержка стандарта HTML5. В настоящее время разработчики активно используют возможности этого стандарта для улучшения уровня поддержки мультимедиа-технологий.

Одним из новых инструментов для расширенных приложений HTML5 является поверхность для рисования Canvas, на которой при помощи кода на JavaScript выполняется вывод графического изображения. При использовании Canvas с сервера загружается не картинка, а набор точек (или алгоритм прорисовки), по которым браузер выполняет вывод изображения.

Таким образом, Canvas – средство программирования, которое позволяет рисовать как простейшие графические примитивы – линии, фигуры, текст, так и создавать различные эффекты мультимедиа.

Рассмотрим модель формирования изображений в браузерах абонентских терминалов современных ИТКС (рис. 6).

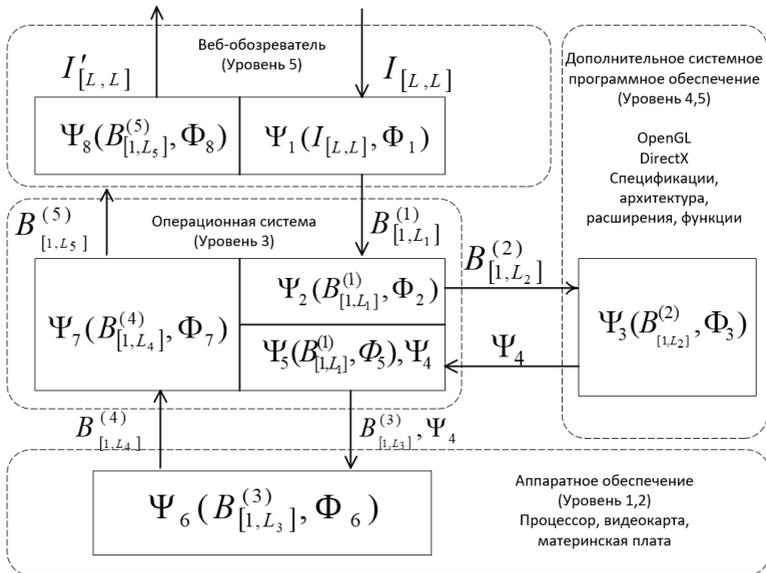


Рис. 6. Модель программно-аппаратной системы обработки графических изображений абонентского терминала ИТКС

При передаче запроса на сервер в браузер поступают данные совместно с кодом на вывод изображения $I_{[L,L]}$ в Canvas. В браузере выполняются преобразования полученных данных для передачи на следующий уровень обработки, при этом учитываются параметры Φ_1 , которые зависят от конкретной реализации веб-браузера (движок браузера).

В любой компьютерной системе взаимодействия прикладных программ с аппаратным обеспечением реализуется при помощи операционной системы.

Браузер с целью получения вычислительных ресурсов для обработки полученного изображения $I_{[L,L]}$, которое представлено исходным кодом шейдера, создает запрос к операционной системе. Запрос содержит обработанные браузером данные и последовательность команд для процессора $B_{[1,L_1]}^{(1)}$. Операционная система преобразует поступившие данные и команды и формирует процедуры взаимодействия с дополнительным системным программным обеспечением $\Psi_2(B_{[1,L_1]}^{(1)}, \Phi_2)$, при этом учитываются функционал и параметры операционной системы Φ_2 . Сформированная последовательность, включающая набор необходимых действий над изображением, и преобразованные данные изображения $B_{[1,L_2]}^{(2)}$ поступают на следующий уровень обработки.

На уровне 4,5 формируются инструкции для аппаратного оборудования $\Psi_3(B_{[1,L_2]}^{(2)}, \Phi_3)$, а именно определяется алгоритм для получения из исходного кода шейдера последовательности данных для вывода графического изображения. При этом на итоговый алгоритм Ψ_4 влияют особенности реализации спецификаций конкретных производителей аппаратной части абонентских терминалов Φ_3 .

Операционная система на основании Ψ_4 формирует последовательность команд Φ_5 для аппаратного оборудования и определяет порядок взаимодействия дополнительного системного программного обеспечения с видеокарты $\Psi_5(B_{[1,L_1]}^{(1)}, \Phi_5)$, Ψ_4 .

Множество возможных реализаций аппаратной части абонентского терминала и отсутствие строгой стандартизации технологического процесса их производства, так как использование комплектующих деталей порождает множество параметров Φ_6 , которые влияют на параметры формируемого графического изображения. При этом производитель может применять фирменные алгоритмы обработки Ψ_6 поступающих данных $B_{[1,L_3]}^{(3)}$ с учетом правила обработки Ψ_4 .

После вычислительных операций $\Psi_6(B_{[1,L_3]}^{(3)}, \Phi_6)$ обработанные данные $B_{[1,L_4]}^{(4)}$ передаются операционной системе, которая, выполнив

соответствующие преобразования $\Psi_7(B_{[1,L_4]}^{(4)}, \Phi_7)$ передает их выполнившему запросу приложению, то есть веб-браузеру. Браузер, в свою очередь, выводит в Canvas итоговое графическое изображение.

Исходя из особенностей формирования цифровых изображений в современных компьютерных системах, множество параметров преобразований накладывают свой отпечаток на выходной графический примитив, формируя тем самым цифровой отпечаток абонентского терминала.

4. Математическая модель цифрового изображения. В современных графических системах формирование цифрового изображения зависит от используемой цветовой модели и может быть представлено как n -мерный массив:

$$I_{[J,L^{(A)},L^{(B)}]}, \quad (1)$$

где J – количество слоев изображения в соответствии с цветовой моделью используемой в графической подсистеме АТ.

Величины $L^{(A)}, L^{(B)}$ определяются размерностью пиксельной сетки выводимого изображения (рис. 7).

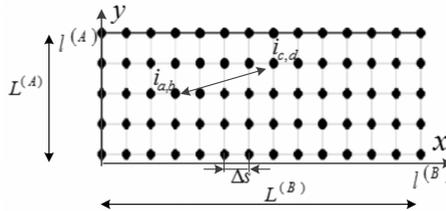


Рис. 7. Представление цифрового изображения в виде массива пикселей

В частном случае для одного слоя изображения функция $I_{[L^{(A)},L^{(B)}]}$ определяется двумерным массивом. Для простоты расчетов в работе все изображения определяются массивами $I_{[L,L]}$ ($L^{(A)} = L^{(B)} = L$):

$$I_{[L,L]} = \begin{bmatrix} i_{1,1} & i_{1,2} & \dots & i_{1,L} \\ i_{2,1} & i_{2,2} & \dots & i_{2,L} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ i_{L,1} & i_{L,2} & \dots & i_{L,L} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где $i_{l_1,l_2}, l_1 \in (1, \dots, L), l_2 \in (1, \dots, L)$ – значение соответствующего пикселя изображения.

Для отображения цветных изображений пиксели в современных компьютерных системах разделяют на триады (для цветовой модели RGB – красного, зеленого и синего цветов), которые в совокупности формиру-

ют один результирующий цвет пикселя. Для отрисовки изображения в графической подсистеме цвет каждого элемента задается путем выборки некоторого значения (индекса) из специальной таблицы — палитры цветов.

Каждая триада пикселя имеет в качестве цвета некий условный индекс, который расшифровывается по палитре цветов в реальные компоненты цвета, что позволяет для каждого такого элемента построить «истинный» цвет в заданной цветовой модели. Модель цифрового изображения графической системы современного компьютера состоит из определенного количества слоев и зависит от многомерной функции пространственного распределения значений яркости и прозрачности трех цветов:

$$I_{[J,L,L]} = (i_{j,l(x),l(y)})_{j=1,x=1,y=1}^{4,A,B}, \quad (3)$$

где $j \in 1, \dots, J$ – множество слоев изображения, для $RGB\alpha$ $J = 4$, A, B – размер изображения в соответствии с выражением (1) (R – красный, G – зеленый, B – синий, α – альфа-канал), $i_{1,l(x),l(y)} \in \{0, \dots, 255\}$, $i_{2,l(x),l(y)} \in \{0, \dots, 255\}$, $i_{3,l(x),l(y)} \in \{0, \dots, 255\}$, $i_{4,l(x),l(y)} \in [0; 1]$ – значения альфа-канала (0 – полностью прозрачный, 1 – не прозрачный).

Таким образом, цифровое изображение в современных компьютерных системах представляет собой многомерный массив значений палитры цветов. Простейшим элементом изображения является пиксель. Объединение пикселей различных цветов в некоторой области дает результирующий цвет в соответствии с применяемыми алгоритмами обработки и используемой цветовой моделью.

5. Алиасинг цифровых изображений. Использование подхода, который предполагает представление цифровых изображений как двухмерных массивов пикселей, может привести к проблеме, называемой алиасингом. Алиасинг в компьютерной графике – это эффект «ступенчатости» изображения (рис. 8).

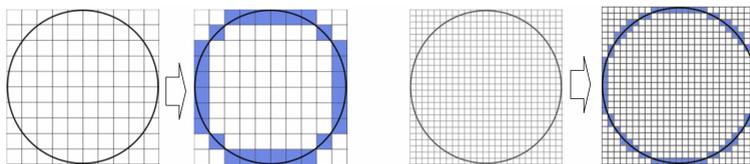


Рис. 8. Влияние эффекта алиасинга на точность представления аналоговой информации в цифровой форме

Для устранения эффекта алиасинга применяются алгоритмы сглаживания (антиалиасинга), идея которых заключается в преобразовании

цифрового изображения в удобном для восприятия зрительной системой человека виде. В общем виде результат применения метода сглаживания представлен на рисунке 9.

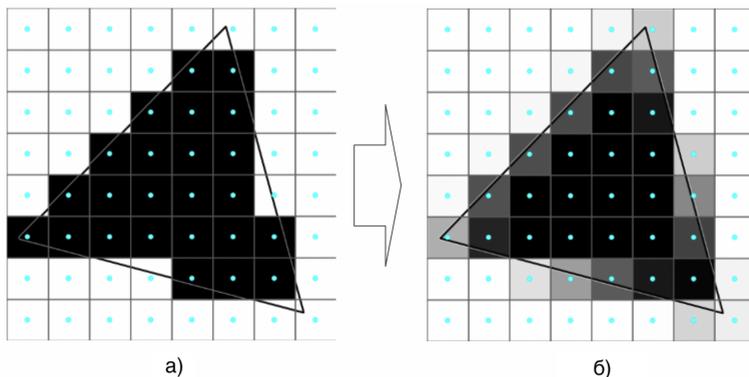


Рис. 9. Устранение эффекта алиасинга: а) изображение с алиасингом; б) изображение при применении алгоритма антиалиасинга

Из рисунка (9) видно, что при ступенчатом выводе границ изображения решение по цвету пикселя применяется исходя из положения центра пикселя относительно геометрии вывода изображения и принимает два значения, в то время как цвет пикселя с учетом антиалиасинга определяется в зависимости от функции расстояния до границы изображения и варьируется от 0 до 255.

Классификация видов антиалиасинга и реализующие их алгоритмы широко представлены в технической литературе [8,9,20], а также частично представлены программно-аппаратной документацией производителей комплектующих АТ.

6. Математическая модель системы сглаживания изображений в современных АТ ИТКС. Основным принципом сглаживания изображений в современных компьютерных системах является вычисление цветов пикселей в граничных участках графического отображения фигур и объектов. При этом алгоритмы этих вычислений основываются на особенностях зрительного восприятия графических отображений человеком.

С целью формирования итогового цвета для каждого пикселя необходимо сформировать решетку размещения семплов $G_{[H,H]}$ со сторонами равными H (рис. 10). После чего определить число семплов A и их положение на сформированной решетке. Элементы массива $G_{[H,H]}$ могут

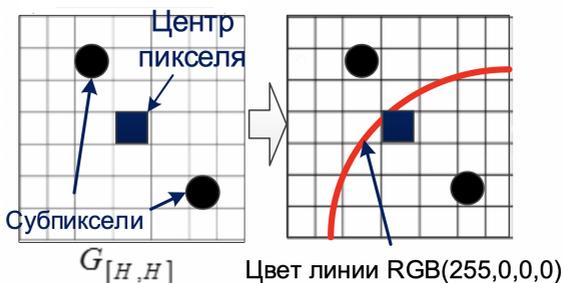


Рис. 10. Расположение семплов в пикселе

быть получены следующим образом:

$$g_{h_1, h_2} = \begin{cases} 1 & \text{для } h_1 \in X^{(G)}, h_2 \in Y^{(G)}; \\ 0 & \text{для } h_1 \notin X^{(G)}, h_2 \notin Y^{(G)}, \end{cases} \quad (4)$$

где $h_1 = 1(1)H, h_2 = 1(1)H$.

Размещение семплов зависит от координат:

$$X^{(G)} = \{x_1^{(G)}, \dots, x_A^{(G)}\}, Y^{(G)} = \{y_1^{(G)}, \dots, y_A^{(G)}\}, \quad (5)$$

где A – число семплов в пикселе.

Число семплов и их расположение зависит от аппаратной части графической подсистемы АТ ИТКС. Каждый производитель оборудования может устанавливать собственные параметры размера решетки и числа семплов, используемых для сглаживания изображений. Множество всех возможных значений числа семплов в пикселе можно представить как $A = \{2^0, 2^1, \dots, 2^n\}$. В современных графических устройствах, как правило, используется от 2 до 16 семплов на пиксель.

Существует несколько вариантов формирования итогового цвета пикселя. Один из таких вариантов основывается на числе семплов, попавших в область объекта $\Omega^{(\text{ОБЪЕКТ})}$, при этом значение цвета может быть представлено следующим образом (рис. 11):

$$C^{(\text{результат})} = \frac{N^{(\text{фигуры})}}{N^{(\text{пиксель})}} \times C^{(\text{фигуры})}, \quad (6)$$

где $C^{(результат)}$ – результирующий цвет пикселя; $C^{(фигуры)}$ – цвет фигуры; $N^{(фигуры)}$ – число семплов, попавших в область фигуры; $N^{(пиксель)}$ – общее число семплов в пикселе.

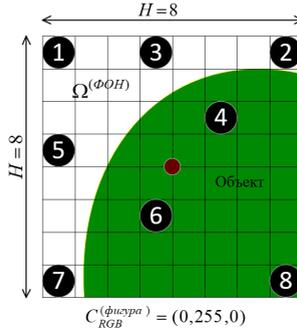


Рис. 11. Пример размещения семплов в пикселе при формировании объекта изображения

В приведенном на рисунке 11 примере результирующий цвет пикселя может быть рассчитан как:

$$C_{RGB}^{(пиксель)} = \frac{3}{8} \times (0, 255, 0) = (0, 95, 0). \quad (7)$$

При этом видно, что объект занимает большую часть пикселя, однако число пикселей, попавших в область объекта, меньше числа семплов фона, поэтому результирующий цвет будет не в полной мере влиять на сглаживание краев изображения. Для устранения этого эффекта используют такой параметр как расстояние от центра пикселя до семпла (рис. 12).

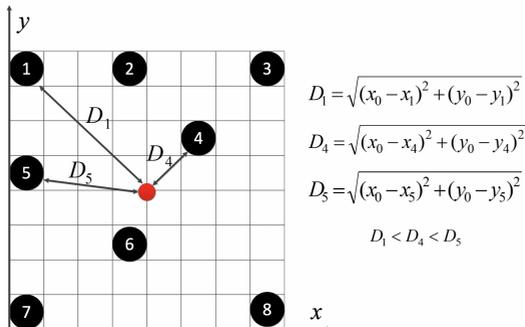


Рис. 12. Неоднородность расстояния между центром пикселя и семплами

Цвет пикселя в этом случае зависит от значений расстояний до семплов входящих в область объекта и может быть вычислен как:

$$C^{(\text{результат})} = \frac{\sum_{n=1}^{N(\text{фигуры})} k_n D_n}{\sum_{m=1}^{N(\text{пиксель})} k_m D_m} \times C^{(\text{фигуры})}, \quad (8)$$

где D_n – расстояние от семплов до центра пикселя; D_m – расстояние от всех семплов до центра пикселя; k_n – коэффициент влияния семпла на цвет относительно положения.

Производители вправе самостоятельно определять влияние расстояний на определение итогового цвета. Поэтому возможны следующие варианты задания коэффициентов k_n (рис. 13).

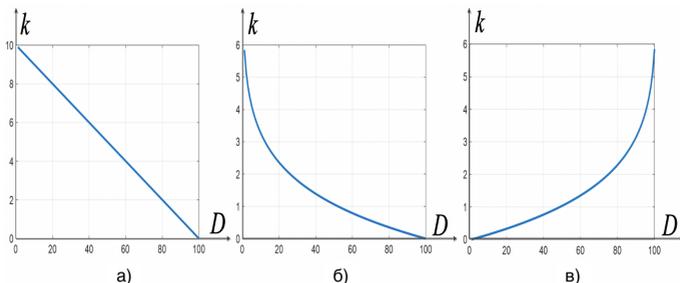


Рис. 13. Зависимость коэффициента значимости семпла от расстояния: а) линейная убывающая зависимость; б) нелинейная убывающая зависимость; в) нелинейная возрастающая зависимость

Коэффициенты значимости семпла могут быть представлены как массив значений $V_{[H,H]} = ||v_{h_1,h_2}||$ ($h_1 = 1(1)H, h_2 = 1(1)H$), где v_{h_1,h_2} – значение коэффициента значимости; H – размер массива коэффициентов.

Формирующая последовательность для массива коэффициентов значимости может быть представлена как $W = \langle w_1, w_2, \dots, w_H \rangle = \langle \beta_1 \times \omega, \beta_2 \times \omega, \dots, \beta_H \times \omega \rangle$, где $B = \langle \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_H \rangle$ – коэффициенты, задающие тип последовательности (линейный, нелинейный, убывающий, возрастающий), $\omega = 1(1)H$.

Таким образом, итоговый массив коэффициентов значимости может быть получен как:

$$V_{[H,H]} = ||v_{h_1,h_2}||, \text{ где } v_{h_1,h_2} = f(w) = w_{h_1} \times w_{h_2}. \quad (9)$$

Пример массива коэффициентов значимости представлен на рисунке 14.

$$W = \langle 1, 2, 3, 4, 5, 6, 6, 5, 4, 3, 2, 1 \rangle$$

1	2	3	4	5	6	6	5	4	3	2	1
2	4	6	8	10	12	12	10	8	6	4	2
3	6	9	12	15	18	18	15	12	9	6	3
4	8	12	16	20	24	24	20	16	12	8	4
5	10	15	20	25	30	30	25	20	15	10	5
6	12	18	24	30	36	36	30	24	18	12	6
6	12	18	24	30	36	36	30	24	18	12	6
5	10	15	20	25	30	30	25	20	15	10	5
4	8	12	16	20	24	24	20	16	12	8	4
3	6	9	12	15	18	18	15	12	9	6	3
2	4	6	8	10	12	12	10	8	6	4	2
1	2	3	4	5	6	6	5	4	3	2	1

$$W = \langle 1, 2, 4, 8, 14, 25, 25, 14, 8, 4, 2, 1 \rangle$$

1	2	4	8	14	25	25	14	8	4	2	1
2	4	8	16	28	50	50	28	16	8	4	2
4	8	16	32	56	100	100	56	32	16	8	4
8	16	32	64	112	200	200	112	64	32	16	8
14	28	56	112	196	350	350	196	112	56	28	14
25	50	100	200	350	625	625	350	200	100	50	25
25	50	100	200	350	625	625	350	200	100	50	25
14	28	56	112	196	350	350	196	112	56	28	14
8	16	32	64	112	200	200	112	64	32	16	8
4	8	16	32	56	100	100	56	32	16	8	4
2	4	8	16	28	50	50	28	16	8	4	2
1	2	4	8	14	25	25	14	8	4	2	1

$$W = \langle 25, 14, 8, 4, 2, 1, 1, 2, 4, 8, 14, 25 \rangle$$

625	350	200	100	50	25	25	50	100	200	350	625
350	196	112	56	28	14	14	28	56	112	196	350
200	112	64	32	16	8	8	16	32	64	112	200
100	56	32	16	8	4	4	8	16	32	56	100
50	28	16	8	4	2	2	4	8	16	28	50
25	14	8	4	2	1	1	2	4	8	14	25
25	14	8	4	2	1	1	2	4	8	14	25
50	28	16	8	4	2	2	4	8	16	28	50
100	56	32	16	8	4	4	8	16	32	56	100
200	112	64	32	16	8	8	16	32	64	112	200
350	196	112	56	28	14	14	28	56	112	196	350
625	350	200	100	50	25	25	50	100	200	350	625

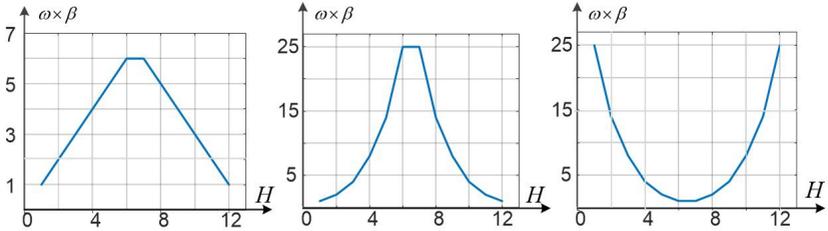


Рис. 14. Массив коэффициентов значимости

На основании массивов размещения семплов $G_{[H,H]}$ и массива коэффициентов значимости $V_{[H,H]}$ формируется массив семплов $R_{[H,H]}$, в котором каждый семпл обладает определенным весом $R_{[H,H]} = G_{[H,H]} \times V_{[H,H]}$.

Пример формирования весового массива семплов представлен на рисунке 15.

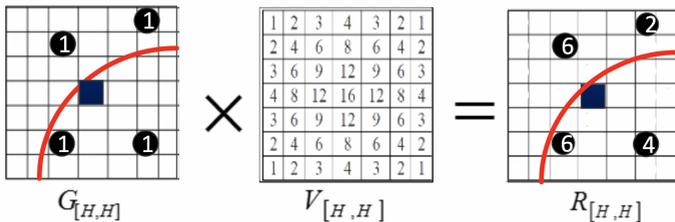


Рис. 15. Формирование весового массива семплов

Степень влияния семплов массива $R_{[H,H]}$ может быть представлена массивом $P_{[H,H]}$, элементы которого отражают долю влияния каждого семпла на итоговый цвет пикселя и рассчитывается следующим образом:

$$p_{h_1, h_2} = \frac{r_{h_1, h_2}}{\sum_{n_1=1}^H \sum_{n_2=1}^H r_{n_1, n_2}}, r_{h_1, h_2} \in R_{[H, H]}. \quad (10)$$

При этом массив семплов, попавших в область объекта изображения, может быть получен как:

$$p_{h_1, h_2}^{(C)} = \begin{cases} p_{h_1, h_2}, & \text{при } g_{h_1, h_2} \in \Theta \\ 0, & \text{при } g_{h_1, h_2} \notin \Theta \end{cases}, h_1 = 1(1)H, h_2 = 1(1)H. \quad (11)$$

где Θ – область объекта изображения.

Итоговый цвет пикселя C' в этом случае получается в результате суммирования по строкам и столбцам всех значений массива семплов, попавших в область объекта изображения Θ :

$$C' = C \times \sum_{h_1=1}^H \sum_{h_2=1}^H p_{h_1, h_2}^{(C)}, \quad (12)$$

где C – исходный цвет объекта изображения.

На рисунке 16 представлен процесс формирования итогового цвета пикселя.

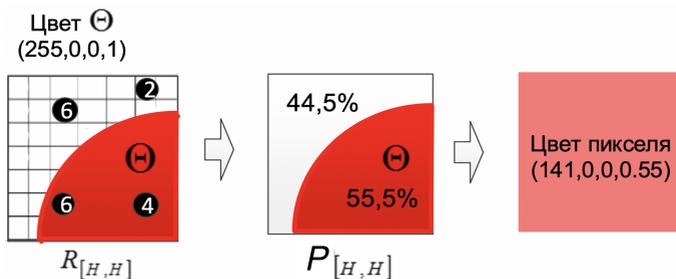


Рис. 16. Формирование весового массива семплов

В зависимости от производителя графической системы и комплекта программных средств вычисление результирующих значений цвета пикселей могут дополняться более сложными алгоритмами. Так современные АТ ИТКС используют более 50 различных алгоритмов сглаживания.

Таким образом, цифровой отпечаток устройства зависит от размещения семплов в пикселе, от используемых алгоритмов вычисления

степени влияния пикселей, а также от применяемых процедур сглаживания изображений в графической подсистеме.

7. Информативный признак неоднородности программно-аппаратных реализаций АТ ИТКС. При формировании изображений результаты сглаживания в различных реализациях графических систем АТ ИТКС имеют разную степень отличия. Чтобы выявить отличия необходимо последовательно сравнивать значения каждого пикселя многомерного массива изображений $I_{[J,L,L]}$, формируемого терминалом с эталоном изображения полученным без эффекта сглаживания.

Для выявления отличий в многомерных массивах $I_{[J,L,L]}^{(AT)}$ каждый j -ый массив многомерного массива представляется в виде последовательности значений:

$$Z^{(j)} = \langle Z_1^{(j)}, Z_2^{(j)}, \dots, Z_L^{(j)} \rangle, \quad (13)$$

где $Z_n^{(j)} = \langle i_{1,n}, i_{2,n}, \dots, i_{L,n} \rangle$ – строка массива $I_{[j,L,L]}$ из многомерного массива $I_{[J,L,L]}$, $n = 1(1)L$.

Полученные последовательности для цветовой модели RGBA являются трансформацией представления цветов из двумерного пространства в одномерное. Изображение формируется из последовательности значений цветов пикселей – так называемая кадровая развертка (рис. 17). Поэтому перевод из массива в строку не противоречит самому принципу формирования цифровых изображений.

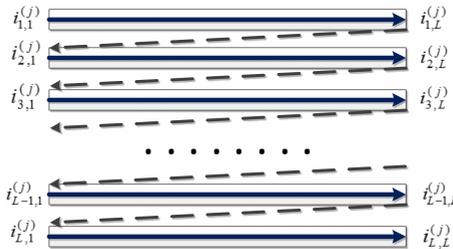


Рис. 17. Формирование цифрового изображения из последовательности значений цветов пикселей

Далее производится конкатенация значений цветов пикселей, полученных из массивов каждого цвета, и альфа-канала:

$$Z^{(\Sigma)} = \langle Z^{(1)} \oplus Z^{(2)} \oplus Z^{(3)} \oplus Z^{(4)} \rangle, \quad (14)$$

где \oplus – операция конкатенации последовательностей.

Для выявления особенностей формирования цифрового изображения конкретной графической системой необходим эталон для сравнения полученных последовательностей от разных систем. За такой эталон может быть принята последовательность, полученная из цифрового изображения, которое сформировано без учета сглаживания.

Пусть E последовательность, полученная из отображения графической информации без учета антиалиасинга и не учитывающая палитру цветов:

$$E = \langle e_1, e_2, \dots, e_{L \cdot L \cdot 4} \rangle, \quad (15)$$

тогда последовательность $U = Z(\Sigma) - E$ будет включать набор значений, которые свидетельствуют об особенностях реализации графической подсистемы АТ ИТКС, так как учитывает результаты сглаживания пересекающихся объектов изображения, которые зависят от определенного набора программно-аппаратных средств вывода графических примитивов.

Для информативного графического представления данных будем использовать контрольную карту кумулятивных сумм (ККС), которая предназначена для проверки на отклонение от некоторого эталонного значения. На такой карте информативны не абсолютные значения сумм, а угол наклона графика, определяемый по последовательным точкам, и его форма.

Метод кумулятивных сумм может быть применен при анализе данных для обнаружения любых различий между множеством входных последовательностей $k_\varepsilon = \sum_{n_1}^{\varepsilon} (e_n - z_n) = \sum_{n_1}^{\varepsilon} u_n$ ($\varepsilon = 1(1)L(\Sigma)$). Элементы индикаторной последовательности, полученные с помощью применения метода кумулятивных сумм:

$$K = \langle k_1, k_1, \dots, k_{L(\Sigma)} \rangle, \quad (16)$$

где $L(\Sigma) = L \cdot L \cdot 4$ – длина индикаторной последовательности.

В результате проведенных экспериментальных вычислений с использованием разработанной модели были выявлены особенности построения графиков индикаторных последовательностей при различных параметрах графических подсистем АТ ИТКС (рис. 18).

Для рисунков 18-23 эксперименты проводились на одном изображении, представляющем собой наложенные друг на друга геометрические фигуры с пересечением границ.

Из рисунка 18 следует, что индикаторные последовательности графических подсистем АТ ИТКС с различными параметрами аппаратной

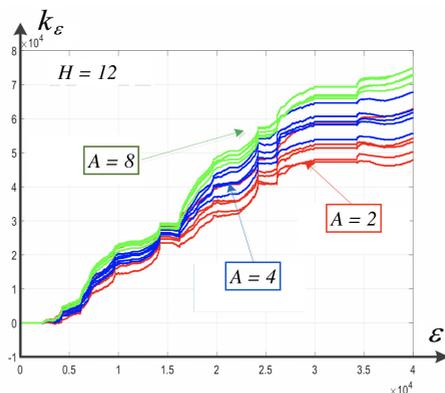


Рис. 18. Значения индикаторной последовательности при переменном числе семплов A в пикселе формируемого изображения

реализации имеют отличные углы наклона относительно координатных осей.

Расчеты производились при размере решетки семплов $H = 14$, размере пиксельной решетки $L = 200$, количестве слоев изображения $\Phi = 9$, палитре цветов $C = \{0, \dots, 255\}$.

Таким образом, возможно распознавание АТ ИТКС по особенностям определения итогового цвета пикселя, которое зависит от числа и размещения семплов в пикселе, так как в индикаторных последовательностях прослеживаются особенности графических подсистем.

На рисунке 19 показаны значения индикаторной последовательности при разных значениях размера решетки семплов, количестве семплов $A = 4$, расчет влияния семплов на итоговый цвет производился по одному алгоритму для всех вариантов формирования цифрового изображения.

Исходя из представленных на рисунок 19 зависимостей можно сделать вывод, что размер решетки семплов оказывает существенное влияние на формирование значений индикаторной последовательности и является параметром, который позволит выявить особенность формирования графического примитива конкретным АТ ИТКС.

Для исследования влияния на индикаторную последовательность минимального сдвига семпла в структуре пикселя были проведены вычислительные эксперименты. Вычисления проводились для разных размеров решетки семплов, число семплов $A = 4$, $L = 200$, $C = \{1, \dots, 255\}$.

Результаты экспериментов приведены на рисунке 20.

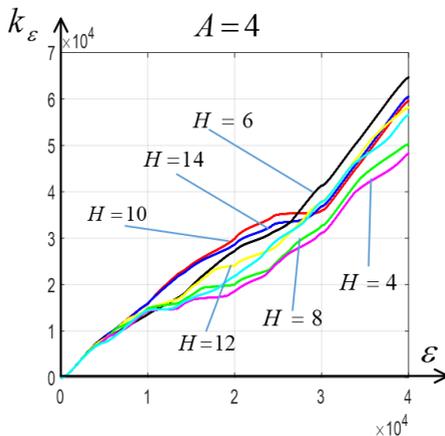


Рис. 19. Значения индикаторной последовательности при разном размере семпла

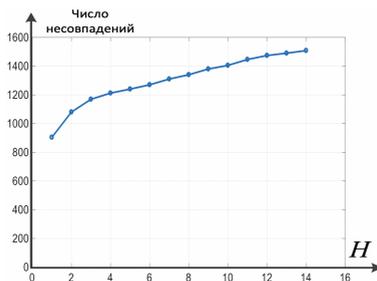


Рис. 20. Зависимость числа несовпадений двух индикаторных последовательностей при сдвиге одного семпла

В качестве меры отличия между индикаторными последовательностями принимается число пикселей, в которых отличался цвет изображений. Таким образом, минимальное изменение положения одного семпла оказывает значительное влияние на форму и угол наклона индикаторной последовательности, это влияние усиливается при увеличении размера решетки семплов.

При исследовании зависимости значений индикаторной последовательности от размеров пиксельной решетки выявлено, что размер пиксельной решетки не оказывает влияния на вид индикаторной последовательности. Таким образом, можно использовать изображения с более низким разрешением, что повысит оперативность обработки массивов цветовой модели и при этом не повлияет на качество распознавания.

При исследовании влияния количества слоев изображения на вид индикаторной последовательности установлена зависимость числа отличий цветов пикселей от числа слоев (рис. 21).

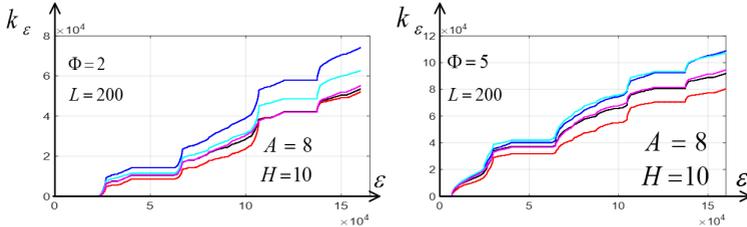


Рис. 21. Зависимость значений индикаторной последовательности от числа слоев изображения: а) два слоя; б) пять слоев

В качестве показателя отличий использовался средний коэффициент невязки всех индикаторных последовательностей, который можно представить следующим выражением:

$$\alpha = \frac{1}{2N^{(K)}} \sum_{i=1}^{N^{(K)}} \sum_{j=1}^{N^{(K)}} \left(\frac{1}{L^{(\Sigma)}} \sum_{n=1}^{L^{(\Sigma)}} (K_i - K_j) \right), \quad (17)$$

где i, j – номера участвующих в вычислительном эксперименте индикаторных последовательностей; K_i, K_j – индикаторные последовательности; $N^{(K)}$ – число индикаторных последовательностей.

Зависимость среднего коэффициента невязки от числа слоев изображения представлена на рисунке 22.



Рис. 22. Зависимость среднего коэффициента невязки от числа слоев изображения

При исследовании влияния палитры цветов на индикаторную последовательность получены следующие результаты (рис. 23).

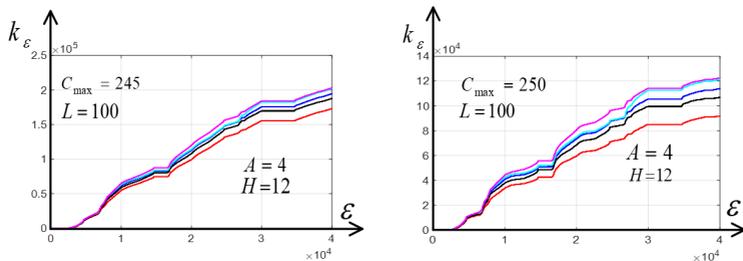


Рис. 23. Зависимость значений индикаторной последовательности от используемой палитры цветов

Таким образом, палитра цветов оказывает влияние на вид индикаторной последовательности. Так как палитра зависит от программно-аппаратной части графической системы, то получаемые значения являются отображениями реализации программно-аппаратной системы АТ ИТКС, что может использоваться в идентификации конкретного АТ.

8. Проведение экспериментальных исследований. Цель экспериментальных исследований состоит в анализе модели формирования изображения, учитывающей программно-аппаратную часть АТ. В рамках проведенных теоретических исследований и на основе модели формирования изображения разработан специализированный программный комплекс (СПК).

Работа СПК оценивалась на контрольном примере. В качестве АТ выбрано две группы ЭВМ:

1. Первая группа базируется на одинаковом программно-аппаратном составе, за исключением используемых видеоадаптеров.
2. Вторая группа базируется на одинаковом программно-аппаратном составе, за исключением используемого веб-браузера.

В качестве отображаемых веб-браузером графических примитивов используется изображение размерности 200×200 пикселей. На основе разработанного программного комплекса произведен расчет информативного признака для каждого АТ. На рисунке 24 показаны различия вывода изображений при сравнении с эталоном, линии представляют собой кумулятивную сумму, которая является значением информативного признака.

При проведении экспериментов в рамках второй группы АТ (одинаковый программно-аппаратный состав, за исключением используемого веб-браузера) были получены различия при выводе изображений (рис. 25), что подтверждает работоспособность метода идентификации АТ.

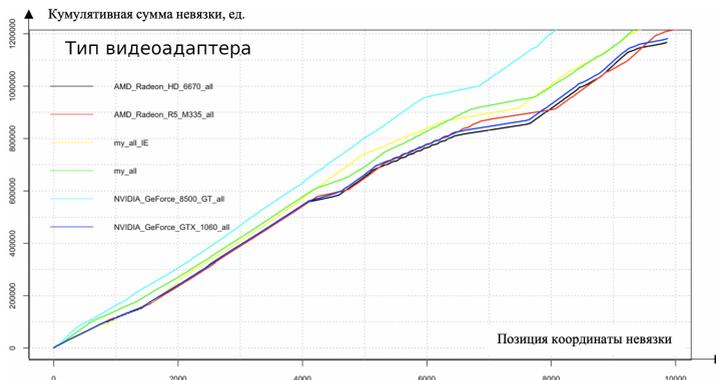


Рис. 24. Различия вывода изображения при сравнении с эталоном для первой группы (аппаратные отличия АТ)

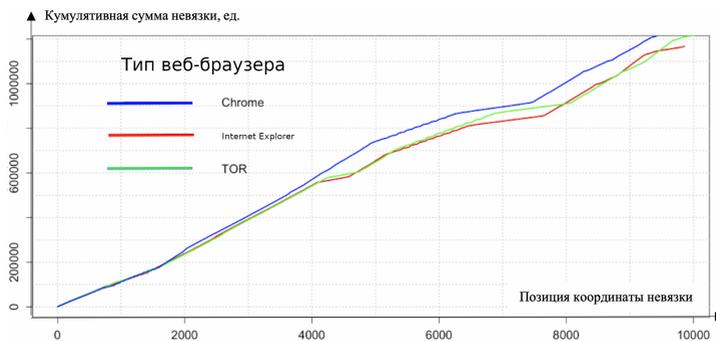


Рис. 25. Различия вывода изображения при сравнении с эталоном для второй группы (программные отличия АТ)

9. Заключение. Разработана аналитическая модель графической подсистемы формирования изображений в АТ ИТКС.

На основе разработанной модели сформирован информативный признак цифровых изображений АТ ИТКС, а именно угол наклона и форма индикаторной последовательности, которая, в свою очередь, служит мерой изменения случайной величины. Чем больше угол наклона линии, тем больше различие двух последовательностей значений цветов пикселей цифрового изображения.

Обоснованы особенности формирования цифровых изображений в графических подсистемах современных компьютерных систем. Данные особенности позволяют осуществлять идентификацию в условиях апри-

орной неопределенности относительно режимов и параметров передачи информации, а также создать условия для устранения неопределенности относительно принадлежности АТ ИТКС [12–16, 22].

Для информативного признака рассмотрены условия его проявления, что, в целом, дает возможность рассмотреть области его применимости.

Литература

1. *Invernizzi L. et al.* Cloak of visibility: detecting when machines browse a different web // Proceedings of the 37th IEEE Symposium on Security and Privacy. 2016. pp. 743–758.
2. *Mowery K., Bogenreif D., Yilek S., Shacham H.* Fingerprinting information in JavaScript implementations // Proceedings of W2SP. 2011. vol. 2. no. 11.
3. *Pham K., Santos A.S.R., Freire J.* Understanding website behavior based on user agent // Proceedings of the 39th International ACM SIGIR Conference on Research and Development in Information Retrieval. 2016. pp. 1053–1056.
4. *Torres C.F., Jonker H., Mauw S.* FP-Block: usable web privacy by controlling browser fingerprinting // European Symposium on Research in Computer Security. 2015. pp. 3–19.
5. *Xu H., et al.* Detecting and characterizing web bot traffic in a large e-commerce marketplace // European Symposium on Research in Computer Security. 2018. vol. 11099. pp. 143–163.
6. *Navpreet K. et al.* Browser Fingerprinting as user tracking technology // 2017 11th International Conference on Intelligent Systems and Control (ISCO). 2017. pp. 103–111.
7. *Queiroz J.S., Feitosa E.L.* A Web Browser Fingerprinting Method Based on the Web Audio API // The Computer Journal. 2019. vol. 62. no. 8. pp. 1106–1120.
8. *Carpenter L.* The A-buffer an Antialiased Hidden Surface Method // IEEE Computer Graphics and applications. 1984. vol. 18. no. 3. pp. 103–108.
9. *Crow F. C.* Comparison of Antialiasing Techniques // IEEE Computer Graphics and applications. 1981. vol. 1. no. 1. pp. 40–48.
10. *Сазонов К.В., Татарка М.В., Шуваев Ф.Л.* Метод структурного статистического распознавания режимов работы информационно-вычислительных сетей // Научно-технический журнал «Информация и космос». 2019. № 1. С. 40–46.
11. *Сазонов К.В., Татарка М.В., Шуваев Ф.Л.* Метод сокращения размерности вероятностных суффиксных деревьев // Информация космос. 2018. № 3. С. 55–61.
12. *Flach P.* Machine learning: the art of science of algorithms that make sense of data // Cambridge University press. 2012. 400 p.
13. *Jordan M.I., Mitchell T.M.* Machine learning: Trends, perspectives, and prospects // Science. 2015. vol. 349(6245). pp. 255–260.
14. *Айма V.A. et al.* Classification algorithms for big data analysis a map reduce approach // The International Archives of the Photogrammetry" in Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2015. vol. 40. no. 3. pp 17.
15. *Grolinger K. et al.* Challenges for MapReduce in Big Data // IEEE 10th World Congress on Services. 2014. pp. 182–189.
16. *Dhillon S., Kaur K.* Comparative Study of Classification Algorithms for Web Usage Mining // International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering. 2014. vol. 4(7). pp. 137–140.
17. *Nikiforakis N. et al.* Cookieless monster: Exploring the ecosystem of web- based device fingerprinting // 2013 IEEE Symposium on Security and Privacy (SP). 2013. pp. 541–555.

18. *Khan T.M., Khan M.A.U., Kong Y.* Fingerprint image enhancement using multi-scale DDFB based diffusion filters and modified Hong filters // *Optik*. 2014. vol. 125. no. 16. pp. 4206–4214.
19. *Khan M.A.U., Khan T.M., Bailey D.G., Kong Y.* A spatial domain scar removal strategy for fingerprint image enhancement // *Pattern Recognition*. 2016. vol. 60. pp. 258–274.
20. *Khan T.M., Khan M.A.U., Kittaneh O., Kong Y.* Stopping criterion for linear anisotropic image diffusion: A fingerprint image enhancement case // *EURASIP Journal on Image and Video Processing*. 2016. vol. 2016. no. 1. pp. 6.
21. *Dunbar C., Qu G.* A practical circuit fingerprinting method utilizing observability don't care conditions // *Proceedings of the 52nd Annual Design Automation Conference*. 2015. pp. 1–6.
22. *Dunbar C., Qu G.* Satisfiability don't care condition based circuit fingerprinting techniques // *The 20th Asia and South Pacific Design Automation Conference (ASPDAC'15)*. 2015. pp. 815–820.

Сазонов Константин Викторович — д-р техн. наук, доцент, начальник кафедры, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского (ВКА им. А.Ф. Можайского). Область научных интересов: теория вероятности и математическая статистика, распознавание образов, представление и обработка данных и знаний. Число научных публикаций — 40. Staffa78@mail.ru; ул. Ждановская, 13, 197198, Санкт-Петербург, Россия; р.т.: +7(812)347-97-70; факс: +7(812)237-12-49.

Татарка Максим Васильевич — канд. техн. наук, докторант, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского (ВКА им. А.Ф. Можайского). Область научных интересов: теория вероятности и математическая статистика, распознавание образов, анализ больших объемов данных. Число научных публикаций — 22. maksimtbv@gmail.com; ул. Ждановская, 13, 197198, Санкт-Петербург, Россия; р.т.: +7(812)347-97-70; факс: +7(812)237-12-49.

Цыганов Андрей Сергеевич — канд. техн. наук, старший преподаватель, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского (ВКА им. А.Ф. Можайского). Область научных интересов: теория вероятности и математическая статистика, распознавание образов, технический анализ сигналов. Число научных публикаций — 18. porudchik@mail.ru; ул. Ждановская, 13, 197198, Санкт-Петербург, Россия; р.т.: +7(812)347-97-70; факс: +7(812)237-12-49.

Бессольцев Виталий Евгеньевич — преподаватель, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского (ВКА им. А.Ф. Можайского). Область научных интересов: теория вероятности и математическая статистика, распознавание образов, веб-разработка. Число научных публикаций — 8. v.bessoltsev@gmail.com; ул. Ждановская, 13, 197198, Санкт-Петербург, Россия; р.т.: +7(812)347-97-70; факс: +7(812)237-12-49.

K. SAZONOV , M. TATARKA , A. TSYGANOV , V. BESSOLCEV
**IDENTIFICATION OF SUBSCRIBER TERMINALS OF
INFOCOMMUNICATION NETWORKS BASED ON THE MODEL
OF FORMING IMAGES IN MODERN COMPUTER SYSTEMS**

Sazonov K., Tatarka M., Tsyganov K., Bessolcev V. Identification of Subscriber Terminals of Infocommunication Networks based on the Model of Forming Images in Modern Computer Systems.

Abstract. One of the important tasks of such theories as theories of pattern recognition and the theory of information security, is the task of identifying terminals of information and telecommunication networks.

The relevance of the topic is due to the need to study methods for identifying computer network terminals and build information security systems based on the knowledge gained

The main parameters that allow uniquely identifying subscriber terminals in the network are address-switching information, as well as a number of parameters characterizing the software and hardware of the computer system. Based on the obtained parameters, digital fingerprints of subscriber terminals are generated.

The using anonymous networks by users of subscriber terminals and blocking of the methods of generating and collecting digital fingerprint parameters, does not allow to achieve the required degree of identification reliability in some cases.

Based on the peculiarities of digital image formation in modern computer systems, many transformation parameters make impact on the output graphic primitive, thereby forming a digital fingerprint of the subscriber terminal, which depends on the placement of samples in a pixel, the algorithms used to calculate the degree of pixels influence, and also the procedures used of smoothing images in the graphics subsystem.

In this paper an original model of image formation by means of a subscriber terminal web browser that allows to increase the degree of reliability of identification under conditions of anonymization of users of information and telecommunication networks is proposed.

Features of the digital images formation in the graphic subsystems of modern computer systems are substantiated. These features allow identification under a priori uncertainty regarding the modes and parameters of information transfer.

Keywords: Identification, Imaging Model, Subscriber Terminal, Digital Fingerprint, Deanonymization.

Sazonov Konstantin — Ph.D., Dr.Sci., Associate Professor, Head of Department, Mozhaisky Military Space Academy. Research interests: probability theory and mathematical statistics, pattern recognition, data and knowledge representation and processing. The number of publications — 40. Staffa78@mail.ru; 13, Zhdanovskaya str., 197198, St. Petersburg, Russia; office phone: +7(812)347-97-70; fax: +7(812)237-12-49.

Tatarka Maxim — Ph.D., Doctoral Student, Mozhaisky Military Space Academy. Research interests: probability theory and mathematical statistics, pattern recognition, analysis of data. The number of publications — 22. maksimtbv@gmail.com; 13, Zhdanovskaya str., 197198, St. Petersburg, Russia; office phone: +7(812)347-97-70; fax: +7(812)237-12-49.

Tsyganov Andrey — Ph.D., Senior Lecturer, Mozhaisky Military Space Academy. Research interests: probability theory and mathe-matical statistics, pattern recognition, technical analysis of

signals. The number of publications — 18. porudchik@mail.ru; 13, Zdanovskaya str., 197198, St. Petersburg, Russia; office phone: +7(812)347-97-70; fax: +7(812)237-12-49.

Bessolcev Vitaliy — Lecturer, Mozhaisky Military Space Academy. Research interests: probability theory and mathematical statistics, pattern recognition, web development. The number of publications — 8. v.bessolstsev@gmail.com; 13, Zhdanovskaya str., 197198, St. Petersburg, Russia; office phone: +7(812)347-97-70; fax: +7(812)237-12-49.

References

1. Invernizzi L. et al. Cloak of visibility: detecting when machines browse a different web. Proceedings of the 37th IEEE Symposium on Security and Privacy. 2016. pp. 743–758.
2. Mowery K., Bogenreif D., Yilek S., Shacham H. Fingerprinting information in JavaScript implementations. Proceedings of W2SP. 2011. vol. 2. no. 11.
3. Pham K., Santos A.S.R., Freire J. Understanding website behavior based on user agent. Proceedings of the 39th International ACM SIGIR Conference on Research and Development in Information Retrieval. 2016. pp. 1053–1056.
4. Torres C.F., Jonker H., Mauw S. FP-Block: usable web privacy by controlling browser fingerprinting. European Symposium on Research in Computer Security. 2015. pp. 3–19.
5. Xu H., et al. Detecting and characterizing web bot traffic in a large e-commerce marketplace. European Symposium on Research in Computer Security. 2018. vol. 11099. pp. 143–163.
6. Navpreet K. et al. Browser Fingerprinting as user tracking technology. 2017 11th International Conference on Intelligent Systems and Control (ISCO). 2017. pp. 103–111.
7. Queiroz J.S., Feitosa E.L. A Web Browser Fingerprinting Method Based on the Web Audio API. *The Computer Journal*. 2019. vol. 62. no. 8. pp. 1106–1120.
8. Carpenter L. The A-buffer an Antialiased Hidden Surface Method. *IEEE Computer Graphics and applications*. 1984. vol. 18. no. 3. pp. 103–108.
9. Crow F.C. Comparison of Antialiasing Techniques. *IEEE Computer Graphics and applications*. 1981. vol. 1. no. 1. pp. 40–48.
10. Sazonov K.V., Tatarka M.V., Shuvaev F.L. [The method of structural statistical recognition of the operating modes of information and computer networks]. *Information and Space – Informaciya i Kosmos*. 2019. vol. 1. pp. 40–46. (In Russ.).
11. Sazonov K.V., Tatarka M.V., Shuvaev F.L. [The method of reducing the dimension of probabilistic suffix trees]. *Information and Space – Informaciya i Kosmos*. 2018. pp. 55–61. (In Russ.).
12. Flach P. Machine learning: the art of science of algorithms that make sense of data. Cambridge University press. 2012. 400 p.
13. Jordan M.I., Mitchell T.M. Machine learning: Trends, perspectives, and prospects. *Science*. 2015. vol. 349(6245). pp. 255–260.
14. Ayma V.A. et al. Classification algorithms for big data analysis a map reduce approach. *The International Archives of the Photogrammetry "in Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2015. vol. 40. no. 3. pp 17.
15. Grolinger K. et al. Challenges for MapReduce in Big Data. IEEE 10th World Congress on Services. 2014. pp. 182–189.
16. Dhillon S., Kaur K. Comparative Study of Classification Algorithms for Web Usage Mining. *International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering*. 2014. vol. 4(7). pp. 137–140.
17. Nikiforakis N. et al. Cookieless monster: Exploring the ecosystem of web-based device fingerprinting. 2013 IEEE Symposium on Security and Privacy (SP). 2013. pp. 541–555.

18. Khan T.M., Khan M.A.U., Kong Y. Fingerprint image enhancement using multi-scale DDFB based diffusion filters and modified Hong filters. *Optik*. 2014. vol. 125. no. 16. pp. 4206–4214.
19. Khan M.A.U., Khan T.M., Bailey D.G., Kong Y. A spatial domain scar removal strategy for fingerprint image enhancement. *Pattern Recognition*. 2016. vol. 60. pp. 258–274.
20. Khan T.M., Khan M.A.U., Kittaneh O., Kong Y. Stopping criterion for linear anisotropic image diffusion: A fingerprint image enhancement case. *EURASIP Journal on Image and Video Processing*. 2016. vol. 2016. no. 1. pp. 6.
21. Dunbar C., Qu G. A practical circuit fingerprinting method utilizing observability don't care condition. *Proceedings of the 52nd Annual Design Automation Conference*. 2015. pp. 1–6.
22. Dunbar C., Qu G. Satisfiability don't care condition based circuit fingerprinting techniques. *The 20th Asia and South Pacific Design Automation Conference (ASPDAC'15)*. 2015. pp. 815–820.

Signed to print 25.03.2020

Printed in Publishing center GUAP, 67, B. Morskaya, St. Petersburg, 190000, Russia

The journal is registered in Russian Federal Agency for Communications
and Mass-Media Supervision, certificate ПИ № ФС77-41695 dated August 19, 2010 г.
Subscription Index П5513, Russian Post Catalog

Подписано к печати 25.03.2020. Формат 60×90 1/16. Усл. печ. л. 13,19. Заказ № 100.

Тираж 150 экз., цена свободная.

Отпечатано в Редакционно-издательском центре ГУАП, 190000, Санкт-Петербург, Б. Морская, д. 67

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи
и массовых коммуникаций,
свидетельство ПИ № ФС77-41695 от 19 августа 2010 г.

Подписной индекс П5513 по каталогу «Почта России»

РУКОВОДСТВО ДЛЯ АВТОРОВ

Взаимодействие автора с редакцией осуществляется через личный кабинет на сайте журнала «Труды СПИИРАН» <http://www.proceedings.spiiras.nw.ru>. При регистрации авторам рекомендуется заполнить все предложенные поля данных.

Подготовка статьи ведется с помощью текстовых редакторов MS Word 2007 и выше. Объем основного текста – от 20 до 30 страниц включительно. Формат страницы документа – А5 (148 мм ширина, 210 мм высота); ориентация – портретная; все поля – 20 мм. Верхний и нижний колонтитулы страницы – пустые. Основной шрифт документа – Times New Roman, основной кегль (размер) шрифта – 10 pt. Переносы разрешены. Абзацный отступ устанавливается размером в 10 мм. Межстрочный интервал – одинарный. Номера страниц не проставляются.

В основную часть допускается помещать рисунки, таблицы, листинги и формулы. Правила их оформления подробно рассмотрены на нашем сайте в разделе «Руководство для авторов».

AUTHOR GUIDELINES

Interaction between each potential author and the Editorial board is realized through the personal account on the website of the journal "SPIIRAS Proceedings" <http://www.proceedings.spiiras.nw.ru>. At the registration the authors are requested to fill out all data fields in the proposed form.

The submissions should be prepared using MS Word 2007 text editor or higher versions, at that, only manuscripts in *.docx format will be considered. The text of the paper in the main part of it should be from 20 – 30 pages of A5 size that is 210 X 148 mm; orientation – portrait; all margins – 20 mm. The font of the main paper text is Times New Roman of 10 pt font size. The pages' headers and footers should be empty; indentation – 10 mm; line spacing – single; pages are not numbered; hyphenations are allowed.

Certain figures, tables, listings and formulas are allowed in the main section, and their typography is considered by the paper template in more detail in journal web.

ISSN 2078-9181



9 772078 918785 >

