

---

---

# ДОКЛАДЫ БГУИР

---

---

**Выходит два раза в квартал**

Научный журнал издается с января 2003 года

**Главный редактор В.А. Богущ**

**Редакционная коллегия:**

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

**Редакционный совет:**

**И.И. Абрамов, В.Е. Агабеков, И.С. Азаров, В.В. Баранов, А.И. Белоус, И.В. Боднарь,**  
**С.В. Бордусов, С.В. Гапоненко, Н.В. Гапоненко, В.В. Голенков, В.Ф. Голиков, Л.И. Гурский,**  
**А.П. Достанко, В.А. Емельянов, А.А. Иванюк, В.М. Колешко, Ф.Ф. Комаров, Ф.П. Коршунов,**  
**С.П. Кундас, В.А. Куренев, В.И. Курмашев, Н.И. Листопад, С.В. Лукьянец, В.Е. Матюшков,**  
**Л.И. Минченко, Ф.И. Пантелеенко, В.А. Пилипенко, С.Л. Прищепа, А.М. Русецкий, Н.К. Толочко,**  
**А.А. Хмыль, В.Ю. Цветков, В.В. Цегельник, Г.П. Яблонский, В.Н. Ярмолик**

Адрес редакции: ул. П. Бровки, 6, к. 326, г. Минск, 220013, Беларусь

Телефон редакции: +375-17-293-88-41

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

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

## СОДЕРЖАНИЕ

*ЭЛЕКТРОНИКА, РАДИОФИЗИКА, РАДИОТЕХНИКА, ИНФОРМАТИКА*

<b>Шиманович Д.Л., Яковцева В.А.</b> Электрохимическая алюмооксидная технология для приборов силовой электроники.....	5
<b>Конопелько В.К., Липницкий В.А.</b> Новые непримитивные коды, образованные из примитивных БЧХ-кодов и кодов Хемминга и их норменная обработка.....	12
<b>Цветков В.Ю.</b> Сегментация в объектно-ориентированном кодировании и передаче многокурсных изображений.....	25
<b>Гапоненко Н.В.</b> Перспективы золь-гель технологии для нанофотоники и микроэлектроники.....	37
<b>Голенков В.В., Гулякина Н.А., Давыденко И.Т., Шункевич Д.В.</b> Семантические технологии проектирования интеллектуальных систем и семантические ассоциативные компьютеры.....	42
<b>Листопад Н.И.</b> Маршрутизация информационных потоков при многокритериальных требованиях.....	51

<b>Муха В.С.</b> Новые результаты в анализе многомерных данных: многомерно-матричный полиномиальный регрессионный анализ.....	57
<b>Леванцевич В.А., Ярмолик В.Н.</b> Многократное управляемое вероятностное тестирование.....	65
<b>Баранов В.В.</b> Изделия силовой электроники, датчики, биомедицинские технологии....	70
<b>Мордачев В.И., Синькевич Е.В., Ционенко Д.А., Орлов Е.Е.</b> Анализ электромагнитной совместимости локальных группировок радиоэлектронных средств.....	76

Корректор Л.В. КОНДАКОВА

Компьютерный дизайн и верстка О.В. БОЙПРАВ

---

Подписано в печать 02.04.2019. Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная. Отпечатано на ризографе.

Усл. печ. л. 10,7. Уч.-изд. л. 9,1. Тираж 130 экз. Заказ 75.

Индекс для индивидуальной подписки 00787.

Индекс для ведомственной подписки 007872.

---

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

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

---

---

# DOKLADY BGUIR

---

---

**Published twice quarterly**

The journal has been published since January, 2003

**Editor-in-chief V. A. Bogush**

**Editorial board:**

L.M. Lynkov (deputy editor-in-chief),  
A.N. Osipov (deputy editor-in-chief),  
T.V. Borbot'ko (executive secretary),  
M.P. Batura, V.E. Borisenko, A.L. Gursky, S.E. Karpovich,  
V.K. Konopelko, A.P. Kuznetsov, A.A. Kuraev, V.A. Labunov,  
L.M. Lynkov, V.V. Muravyov, A.N. Osipov, M.M. Tatur

**Editorial council:**

I.I. Abramov, V.E. Agabekov, I.S. Azarov, V.V. Baranov, A.I. Belous, I.V. Bodnar, S.V. Bordusov,  
S.V. Gaponenko, N.V. Gaponenko, V.V. Golenkov, V.F. Golikov, L.I. Gursky, A.P. Dostanko,  
V.A. Yemelyanov, A.A. Ivanyuk, V.M. Koleshko, F.F. Komarov, F.P. Korshunov, S.P. Kundas,  
V.A. Kurenev, V.I. Kurmashev, N.I. Listopad, S.V. Lukyanec, V.E. Matyushkov, L.I. Minchenko,  
F.I. Panteleenko, V.A. Pilipenko, S.L. Prishchepa, A.M. Rusetsky, N.K. Tolochko, A.A. Khmyl,  
V.Yu. Tsvetkov, V.V. Tsegelnik, G.P. Yablonsky, V.N. Yarmolik

Address of editorial office: P. Brovka st., 6, room 326, Minsk, 220013, Republic of Belarus

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

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

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

## CONTENTS

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

<b>Shimanovich D.L., Yakovtseva V.A.</b> Electrochemical alumina technology for power electronics devices .....	5
<b>Konopelko V.K., Lipnitski V.A.</b> New non-primitive codes formed from primitive BCH and Hamming codes and their norm evaluation .....	12
<b>Tsviatkou V.Yu.</b> Segmentation in object-oriented encoding and multi-view images transmission .....	25
<b>Gaponenko N.V.</b> Sol-gel technology prospects for nanophotonics and microelectronics .....	37

<b>Golenkov V.V., Gulyakina N.A., Davydenko I.T., Shunkevich D.V.</b> Semantic technologies of intelligent systems design and semantic associative computers.....	42
<b>Listopad N.I.</b> Routing of information flows with multicretirial requirements.....	51
<b>Mukha V.S.</b> A new results in the analysis of the multidimensional data: multidimensional-matrix polynomial regression analysis.....	57
<b>Levantsevich V.A., Yarmolik V.N.</b> Multiple controlled random testing.....	65
<b>Baranov V.V.</b> Schottky diodes, sensors, biomedical technologies.....	70
<b>Mordachev V.I., Sinkevich E.V., Tsyankenka D.A., Arlou Y.Y.</b> Analysis of electromagnetic compatibility in local complexes of radioequipment .....	76



УДК 621.794.61

## ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ АЛЮМООКСИДНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ДЛЯ ПРИБОРОВ СИЛОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

Д.Л. ШИМАНОВИЧ, В.А. ЯКОВЦЕВА

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь*

*Поступила в редакцию 1 марта 2019*

**Аннотация.** Обсуждается электрохимическая алюмооксидная технология для формирования теплопроводящих подложек алюминия с диэлектрическим слоем анодного оксида алюминия с пробивными напряжениями выше 6 кВ. Разработанная технология может быть использована при создании практически любого радиоэлектронного устройства для работы в области температур от 10 до 473 К и частот гигагерцового диапазона.

**Ключевые слова:** электрохимическая алюмооксидная технология, теплопроводящее основание, пробивное напряжение.

**Abstract.** The electrochemical alumina technology (ELAT) for the formation of heat-conducting aluminum substrates with a dielectric layer of anodic aluminum oxide with breakdown voltages above 6 kV is discussed. The developed technology can be used in the production of any electronic device operated in the temperature range from 10 to 473 K and frequencies of the gigahertz range.

**Keywords:** electrochemical alumina technology, heat-conducting base, breakdown voltage.

**Doklady BGUIR. 2019, Vol. 121, No. 3, pp. 5-11**

**Electrochemical alumina technology for power electronics devices**

**D.L. Shimanovich, V.A. Yakovtseva**

### Введение



Доктор технических наук, профессор,  
лауреат государственной премии Республики  
Беларусь, Сокол Виталий Александрович (1940–2018)

Электрохимическая алюмооксидная технология (ЭЛАТ) основана на использовании процесса анодного окисления (анодирования) вентильных металлов, преимущественно алюминия. ЭЛАТ активно развивается в Белорусском государственном университете информатики и радиоэлектроники (БГУИР) с 1975 года. Основы технологии разработаны доктором технических наук, профессором Соколом В. А. [1], запатентованы в США [2–4], защищены 60 авторскими свидетельствами СССР и Республики Беларусь. В 2000 г. авторам технологии присуждена Государственная премия Республики Беларусь. По результатам разработки и исследований технологии защищены 1 докторская и 12 кандидатских диссертаций.

Высокий уровень научных результатов обеспечил широкое признание школы В. А. Сокола.

Идеи сохраняются и развиваются при смене научных поколений: в настоящее время исследованиями в области анодного оксида алюминия в БГУИР активно занимается несколько научных лабораторий.

Кроме того, учениками В.А. Сокола открыты новые успешные предприятия за рубежом, выпуск продукции которых основан на электрохимической алюмооксидной технологии. В 1993 году бывший аспирант В.А. Сокола Семен Нефтин (Shimon Neftin) основал в Израиле компанию «Micro Components Ltd.», которая специализируется на выпуске многослойных алюмооксидных подложек для силовой электроники. В 2010 году в России при поддержке УК «РОСНАНО» была создана их дочерняя компания ООО «Русалокс» – высокотехнологичный разработчик и производитель подложек и печатных плат с высокой теплопроводностью, сделанных по электрохимической алюмооксидной технологии. А в 2017 году в Москве на территории инновационного центра Сколково была открыта еще одна дочерняя компания, занимающаяся алюмооксидной технологией – ООО «Русоксид».

### **Теплоотводящие алюмооксидные основания для приборов силовой электроники**

Силовая электроника – основа основ энергоэффективной экономики. Решить государственную задачу снижения энергопотребления возможно только с помощью высоких технологий, и в данном случае – через энергоэффективную преобразовательную технику, основу которой составляют приборы силовой электроники.

Когда в электронном устройстве используются компоненты, выделяющие значительную тепловую мощность (например, приборы силовой электроники, сверхяркие светодиоды, лазерные излучатели и т. д.), требуется монтаж компонентов выполнять на основаниях, обеспечивающих хороший теплоотвод. Ограниченные возможности диэлектрических подложек в обеспечении тепловых характеристик и электрофизических свойств вызывают необходимость использования подложек с более высокой механической и электрической прочностью, повышенной рассеиваемой мощностью и более низкой стоимостью.

Теплоотводящие печатные платы с металлическим основанием уже достаточно давно из экзотического продукта превратились в массовое, промышленное решение. Они прочно заняли свою нишу, которая в последние годы стремительно расширяется. Многие компании разрабатывают и производят материалы для таких плат. Самый важный элемент печатной платы, наиболее серьезно влияющий на ее свойства и стоимость, – это диэлектрики. Электрохимическая алюмооксидная технология позволяет создавать толстые (до сотен микрометров) диэлектрические слои (анодный оксид алюминия) на поверхности алюминиевых подложек с высокими пробивными напряжениями диэлектрического покрытия, в том числе на металлизированных отверстиях.

Напомним, что анодирование алюминия – это электрохимический процесс превращения исходного металла в его оксид. Анодирование осуществляется в ванне с электролитом, где размещается, например, алюминиевая пластина или образец с пленкой металла (анод), и к которой подводится положительный потенциал от источника питания. Второй электрод (катод), к которому подводится отрицательный потенциал от источника питания, представляет собой нейтральный по отношению к электролиту материал – нержавеющая сталь, никель, уголь и др. При прохождении тока между электродами в электролите на аноде происходит рост оксида.

В результате анодирования на алюминии возможно получение двух видов диэлектрических пленок  $Al_2O_3$  – плотных и пористых. Плотные пленки получают в электролитах, пренебрежимо мало растворяющих оксид, например, в водных растворах лимонной, борной или винной кислот. Плотный оксид представляет собой аморфный коррозионно-стойкий диэлектрик с хорошими диэлектрическими свойствами, однако его максимально достижимая толщина не превышает 1 мкм.

Для обеспечения высоких пробивных напряжений толщина пленки анодного оксида алюминия на алюминиевой подложке должна быть намного выше. Поэтому диэлектрический слой формируют в виде пленки пористого  $Al_2O_3$ , толщина которой может достигать сотен микрометров. Толщина оксида определяется плотностью тока ( $10\text{--}200\text{ мА/см}^2$ ) и временем

анодирования. Скорость роста определяется составом электролита и режимами анодирования и может составлять от долей до единиц микрометров в минуту.

Пористые пленки получают в электролитах, умеренно растворяющих оксид алюминия, например, в водных растворах ортофосфорной, щавелевой, серной и других кислот. Природа электролита является одним из определяющих параметров при проведении процесса электрохимического окисления алюминия. Для наиболее эффективного протекания процесса электрохимического окисления и получения оксида алюминия с хорошими диэлектрическими характеристиками электролит должен удовлетворять ряду требований, в том числе достижению максимальной производительности процесса при минимальных затратах мощности.

Пленки анодного оксида алюминия, обладающие хорошими электроизоляционными свойствами, получают при анодировании в щавелевокислом электролите. Для оксидных пленок, полученных из щавелевокислых электролитов, характерны малая пористость и хорошие адгезионные свойства. Раствор используют при комнатной температуре, однако существуют режимы анодирования при повышенных температурах (до 40 °С). Растворимость анодных пленок в щавелевой кислоте значительно меньше, следовательно, осуществляя процесс в этом электролите, проще получить толстые пленки, не прибегая к специальному охлаждению электролита.

По расходу тока стоимость анодирования в щавелевой кислоте выше, чем в серной кислоте. Но при анодировании в щавелевой кислоте более толстые покрытия можно получить без применения специальных методов, причем в течение первого часа увеличение толщины пленки находится почти в линейной зависимости от продолжительности обработки. Поэтому, когда требуется нанесение толстых покрытий, применяется анодирование в щавелевой кислоте. Кроме того, анодирование в растворе щавелевой кислоты позволяет увеличить эластичность анодной оксидной пленки за счет уменьшения размера ячеек при одновременном увеличении их количества на единице площади. Анодное покрытие, получаемое в растворе щавелевой кислоты, отличается повышенной износостойкостью – в два раза выше, чем у сернокислого.

Следует отметить, что оксидирование в щавелевой кислоте сопровождается значительным разогреванием электролита, что часто приводит к разъеданию пленки и металла. Поэтому необходимо соблюдать температурный режим и применять интенсивное перемешивание и охлаждение электролита. Температуру раствора следует контролировать в непосредственной близости от поверхности обрабатываемых изделий.

В процессе электролиза происходит уменьшение концентрации свободной щавелевой кислоты в результате связывания ее растворяющимся алюминием. За каждый ампер-час пропущенного через ванну электричества растворяется примерно 0,08–0,09 г металла и расходуется 0,13–0,14 г щавелевой кислоты. Исходя из этого, проводят периодическое корректирование электролита. Накопление в растворе алюминия ухудшает качество оксидных покрытий. При содержании его свыше 30 г/л электролит следует заменить свежеприготовленным. Не допускается также присутствие в растворе более 0,2 г/л хлоридов.

Введение добавок в щавелевокислый электролит уменьшает его растворяющее действие на формирующуюся оксидную пленку, что способствует получению компактных покрытий значительной толщины, при этом образуется поверхность с более ровным покрытием и уменьшается его пористость. Применение добавки в виде сульфата магния  $MgSO_4$  приводит к снижению внутренних напряжений в формируемой системе «Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>» и к увеличению параметров термоустойчивости оксида алюминия при длительных процессах термоциклирования.

Пористый оксид обладает ячеистой морфологией, похожей на пчелиные соты. В центре каждой ячейки перпендикулярно поверхности располагается капиллярный канал-пора. Диаметр ячейки и диаметр поры прямо пропорциональны напряжению между анодом и катодом и оцениваются как:  $D_{яч} = 3k \cdot U_a$ ;  $d_n = k \cdot U_a$ , где  $D_{яч}$  и  $d_n$  – диаметр ячейки и поры соответственно;  $k = 1$  нм/В – постоянный коэффициент;  $U_a$  – напряжение анодирования между анодом и катодом. Толщина пористого оксида может достигать сотен микрон.

Пористое анодирование алюминия можно проводить в потенциостатическом или гальваностатическом режимах. Эти режимы являются основными при практическом использовании процессов анодирования.

Размеры ячеек в пористом анодном оксиде алюминия прямо зависят от параметров анодирования. При анодировании в потенциостатическом режиме размеры анодной ячейки увеличиваются с увеличением напряжения анодирования, а количество пор соответственно уменьшается. Соотношение между размером ячеек и напряжением приблизительно линейное, т. е. чем больше напряжение, тем больше размеры ячейки. При анодировании в гальваностатическом режиме размеры анодной ячейки увеличиваются с увеличением плотности тока анодирования.

Анодирование при постоянном напряжении в течение всего процесса позволяет формировать пористый оксид алюминия с однородными структурными размерами (диаметром) пор, что положительно сказывается на механизме заполнения каналов пор при последующей грунтовке и на пробивные напряжения  $Al_2O_3$ .

Без предварительного индентирования поверхности процесс порообразования во время анодирования алюминия носит случайный характер. Во время этого процесса наблюдается объединение или прекращение развития каналов пор, в результате чего развивается нерегулярная структура пористой пленки анодного оксида алюминия (наблюдается большой разброс в диаметре пор, расстояний между порами и упорядоченности). Для решения этой проблемы было предложено [5] использовать прием так называемого двухстадийного анодирования, суть которого заключается в следующем. На первой стадии при постоянном напряжении формируют тонкий слой пористого оксида с регулярной структурой пор. Сформированный слой химически удаляют до поверхности алюминия в селективном травителе в смеси фосфорной и хромовой кислот. После этого на поверхности алюминиевой пластины остаются ямки травления полусферической формы – отпечатки дна ячеек первичного пористого оксида алюминия (предварительное индентирование поверхности алюминия). Далее проводят второе пористое анодирование алюминия при тех же электрохимических условиях (в том же электролите, при той же температуре и при том же постоянном напряжении анодирования). При втором пористом анодировании поры на поверхности алюминиевой пластины зарождаются не хаотически, а в местах отпечатков ячеек первичного оксида, повторяя размер диаметра ячейки.

Технологический подход позволяет создавать наноструктурированный оксид алюминия в виде высокоорганизованной и высокоупорядоченной пористой матрицы с параллельными каналами пор по всей глубине и минимальным разбросом диаметра пор (высокой однородностью пор). Отсутствие тупиковых пор и их извилистости позволяет улучшить качество заполнения пор грунтовочными материалами по всей глубине и повысить пробивные напряжения конечных диэлектрических покрытий.

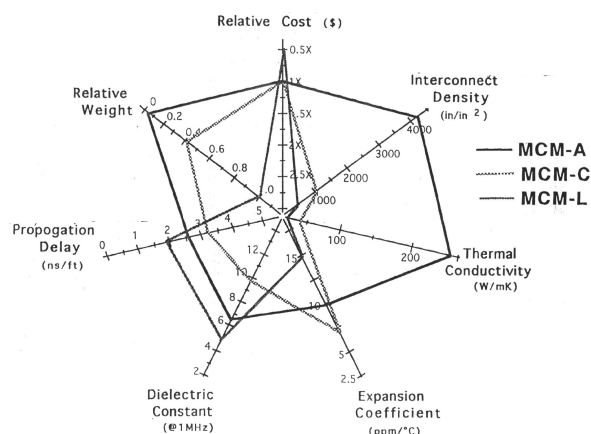
В БГУИР разработана технология (на основе оптимизированных составов электролитов, приемов, методик, режимов анодирования и грунтовки пористого оксида алюминия) получения анодированных теплопроводящих подложек алюминия с пробивными напряжениями диэлектрического слоя анодного оксида алюминия выше 6 кВ [6–12].

### **Перспективы использования ЭЛАТ**

Сравнение разработанной в БГУИР технологии ЭЛАТ, которая применительно к многокристальным модулям получила название технология МСМ-А (MultiChip Module-A, А – обозначает основную базовую операцию – анодирование) с аналогичными разработками (МСМ-L – более высокая версия печатных плат, МСМ-С – керамическое основание и толсто пленочная технология, МСМ-D – тонкопленочная технология), имеющимися за рубежом, проведенное компанией «Landis» (США) по заказу «East/West Technology Partners, Ltd.», показало, что разработанная технология превосходит имеющиеся разработки [13]. Сравнение технологий проводили по семи степеням доброкачественности, как показано на рисунке.

Разработанная технология может быть использована при создании практически любого радиоэлектронного устройства для работы в области температур от 10 до 473 К и частот гигагерцового диапазона. Особенно эффективно применение для мощных устройств (автомобилестроение, станкостроение, спецтехника, космос, и др.). Преимущества

электрохимической алюмооксидной технологии над конкурирующими – как слоистой/наращенной, так и керамической – в технических характеристиках и стоимости.



Сравнение электрохимической алюмооксидной технологии (MCM-A) с аналогичными разработками (MCM-C и MCM-L)

Применение разработанной технологии очень эффективно для создания устройств СВЧ диапазона. Дело в том, что при увеличении рабочей частоты необходимо уменьшать толщину диэлектрического слоя, и в области частот выше 50 ГГц толщина диэлектрика должна составлять 200–300 мкм. Эта проблема осложняется значительным повышением требований по частоте. В 1979 году 147 делегаций государств – членов МСЭ в Женеве провели межправительственную конференцию, решения которой имеют силу международного договора и по-прежнему оказывают решающее воздействие на развитие всех видов радиосвязи и радиовещания в XXI веке. Это была ВАРК-79 – World Administrative Radio Conference of 1979 (WARC-79) [14]. Прошло уже сорок лет с того момента, как ВАРК-79 полностью пересмотрела Регламент радиосвязи, вступивший в силу 1 января 1982 года, однако ряд соглашений применяется до сих пор. В их числе Соглашения, которые регулируют деятельность мировой отрасли, связанной с использованием радиочастотного спектра и спутниковой связи. Был утвержден план освоения микроволновой области свыше 40 ГГц, которая предусматривает разработку технологий крайне высоких (30–300 ГГц) и гипервысоких (300–3000 ГГц) частот. Для этих частот алюминиевые основания с диэлектрическим алюмооксидным слоем сейчас рассматриваются как единственный вариант, пригодный для использования.

### Заключение

Разработана технология получения анодированных теплопроводящих подложек алюминия с пробивными напряжениями диэлектрического слоя анодного оксида алюминия выше 6 кВ, которая может быть успешно использована при создании силовых многокристальных микроэлектронных модулей (диодных, тиристорных и IGBT-сборок, силовых ключей, релейных переключателей, AC/DC и DC/DC-преобразователей и др.) в авиационном и автомобильном приборостроении, в железнодорожной, сварочной, промышленной автоматике и т. д., что позволит снизить зависимость от импортных технологий и значительно увеличит срок службы в сравнении с используемыми в настоящий момент.

### Список литературы

1. Сокол В.А. Конструктивно-технологические методы создания гибридных микросхем на основе алюминия и его анодных оксидов: дисс. ... докт. техн. наук. Минск, 1988.
2. Process for making multilevel interconnections of electronic components: pat. 5580825 US / V.A. Labunov, V.A. Sokol, V.M. Parkun, A.I. Vorob'yova; published: 31.03.1996.
3. Method of making multilevel interconnections of electronic parts: pat. 5880021 US / V.A. Labunov, V.A. Sokol, V.M. Parkun, A.I. Vorob'yova; published: 03.09.1999.

4. Multilevel interconnections of electronic components: pat. 6069070 US / V.A. Labunov, V.A. Sokol, Steve Lerner; published: 30.05.2000.
5. Masuda H., Fukuda K. Ordered metal nanohole arrays made by a two-step replication of honeycomb structures of anodic alumina / Science. 1995. Vol. 268. P. 1466–1468.
6. Шиманович Д.Л. Оптимизация методов формирования толстослойных диэлектрических покрытий на основе анодного оксида алюминия при электрохимическом анодировании широкоформатных Al-подложек и теплопроводящих оснований с радиаторами // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. 2016. Т. 16, № 3. С. 116–119.
7. Шиманович Д.Л. Технологические режимы формирования дополнительных диэлектрических пленок на пористой поверхности алюмооксидных оснований и исследование электрофизических и теплофизических характеристик модифицированных покрытий // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. 2017. Т. 17, № 2. С. 573–576.
8. Sokol V., Yakovtseva V. Electrolyte Hydrodynamics in Anodic Alumina Pores // Russian Microelectronics. 2014. Vol. 43, № 5. P. 358.
9. Express-Method for the Study of Electrolyte Anion Profiles in the Bulk of Dense Anodic Alumina Films. MRS Advances / V. A. Yakovtseva [et al.]. 2018. Vol. 3, iss. 11. P. 569–574.
10. Технологические особенности сквозного двухстороннего анодирования при формировании алюмооксидных оснований для микрополосковых СВЧ-структур / Д.Л. Шиманович [и др.] // Сб. матер. Четвертого междисциплинарного междунар. науч. форума «Новые материалы и перспективные технологии». Москва, 2018. Т. 2. С. 771–774.
11. Исследование теплофизических и электрофизических свойств покрытий на основе анодного оксида алюминия, модифицированного вакуумно-осажденными диэлектрическими пленками / Д.Л. Шиманович [и др.] // Сб. матер. Четвертого междисциплинарного междунар. науч. форума «Новые материалы и перспективные технологии». Москва, 2018. Т. 2. С. 775–779.
12. Анодированные алюминиевые подложки для устройств гигагерцового диапазона / Д.Л. Шиманович [и др.] // Сб. трудов XXIV Междунар. науч.-техн. конф. «Радиолокация, навигация, связь». Воронеж, 2018. Т. 5. С. 422.
13. Report to East/West Technology Partners, Ltd. All Aluminum technology for multichip modules (MCM-A).
14. Final Acts of WARC-79. 1979. 984 p.

## References

1. Sokol V.A. Konstruktivno-tehnologicheskie metody sozdaniya gibridnyh mikroshem na osnove aljuminija i ego anodnyh oksidov: diss. ... dokt. tehn. nauk. Minsk, 1988. (in Russ.)
2. Process for making multilevel interconnections of electronic components: pat. 5580825 US / V.A. Labunov, V.A. Sokol, V.M. Parkun, A.I. Vorob'yova; published: 31.03.1996.
3. Method of making multilevel interconnections of electronic parts: pat. 5880021 US / V.A. Labunov, V.A. Sokol, V.M. Parkun, A.I. Vorob'yova; published: 03.09.1999.
4. Multilevel interconnections of electronic components: pat. 6069070 US / V.A. Labunov, V.A. Sokol, Steve Lerner; published: 30.05.2000.
5. Masuda H., Fukuda K. Ordered metal nanohole arrays made by a two-step replication of honeycomb structures of anodic alumina / Science. 1995. Vol. 268. P. 1466–1468.
6. Shimanovich D.L. Optimizacija metodov formirovanija tolstoslojnyh dijelektricheskikh pokrytij na osnove anodnogo oksida aljuminija pri jelektrohimičeskom anodirovanii širokoformatnyh Al-podlozhek i teploprovodjashhih osnovanij s radiatorami // Fundamental'nye problemy radiojelektroonnogo priborostroenija. 2016. T. 16, № 3. S. 116–119. (in Russ.)
7. Shimanovich D.L. Tehnologicheskie rezhimy formirovanija dopolnitel'nyh dijelektricheskikh plenok na poristoj poverhnosti aljumooksidnyh osnovanij i issledovanie jelektrofizicheskikh i teplofizicheskikh harakteristik modifitsirovannyh pokrytij // Fundamental'nye problemy radiojelektroonnogo priborostroenija. 2017. T. 17, № 2. S. 573–576. (in Russ.)
8. Sokol V., Yakovtseva V. Electrolyte Hydrodynamics in Anodic Alumina Pores // Russian Microelectronics. 2014. Vol. 43, № 5. P. 358.
9. Express-Method for the Study of Electrolyte Anion Profiles in the Bulk of Dense Anodic Alumina Films. MRS Advances / V. A. Yakovtseva [et al.]. 2018. Vol. 3, iss. 11. P. 569–574.
10. Tehnologicheskie osobennosti skvoznogo dvuhstoronnego anodirovanija pri formirovanii aljumooksidnyh osnovanij dlja mikropoloskovykh SVCh-struktur / D.L. Shimanovich [i dr.] // Sb. mater. Chetvertogo mezhdisciplinarnogo mezhdunar. nauch. foruma «Novye materialy i perspektivnye tehnologii». Moskva, 2018. T. 2. S. 771–774. (in Russ.)
11. Issledovanie teplofizicheskikh i jelektrofizicheskikh svojstv pokrytij na osnove anodnogo oksida aljuminija, modifitsirovannogo vakuumno-osazhdennymi dijelektricheskimi plenkami / D.L. Shimanovich [i dr.] // Sb. mater.

- Chetvertogo mezhdisciplinarnogo mezhdunar. nauch. foruma «Novye materialy i perspektivnye tehnologii». Moskva, 2018. T. 2. S. 775–779. (in Russ.)
12. Anodirovannye aljuminievye podlozhki dlja ustrojstv gigagercovogo diapazona / D.L. Shimanovich [i dr.] // Sb. trudov XXIV Mezhdunar. nauch.-tehn. konf. «Radiolokacija, navigacija, svjaz». Voronezh, 2018. T. 5. S. 422. (in Russ.)
  13. Report to East/West Technology Partners, Ltd. All Aluminum technology for multichip modules (MCM-A).
  14. Final Acts of WARC-79. 1979. 984 p.

#### **Сведения об авторах**

Шиманович Д.Л., заведующий лабораторией Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Яковцева В.А., к.т.н., ведущий научный сотрудник Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

#### **Адрес для корреспонденции**

220013, Республика Беларусь,  
г. Минск, ул. Бровки, 6  
Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники  
тел. 375-17-293-88-50;  
e-mail: shdl@tut.by  
Шиманович Дмитрий Леонидович

#### **Information about the authors**

Shimanovich D.L., head of the laboratory of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Yakovtseva V.A., PhD, leading researcher of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

#### **Address for correspondence**

220013, Republic of Belarus,  
Minsk, Brovki, 6,  
Belarusian state university  
of informatics and radioelectronics  
tel. 375-17-293-88-50;  
e-mail: shdl@tut.by  
Shimanovich Dmitry Leonidovich

УДК 512 (075.8)

## НОВЫЕ НЕПРИМИТИВНЫЕ КОДЫ, ОБРАЗОВАННЫЕ ИЗ ПРИМИТИВНЫХ БЧХ-КОДОВ И КОДОВ ХЕММИНГА И ИХ НОРМЕННАЯ ОБРАБОТКА

В.К. КОНОПЕЛЬКО<sup>1</sup>, В.А. ЛИПНИЦКИЙ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Военная академия Республики Беларусь, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 22 марта 2019

**Аннотация.** В работе проводится интегрированное завершение исследований БЧХ-кодов произвольных длин. Наибольшее внимание уделено кодам, длины которых являются промежуточными между примитивными длинами, которые получаются выбрасыванием специальным образом из проверочных матриц примитивных БЧХ-кодов большого количества столбцов, но с сохранением свойств цикличности, которые предлагается называть непримитивными БЧХ-кодами. Систематически исследуются свойства названного класса кодов. Доказывается, что по разнообразию длин примерно треть непримитивных БЧХ-кодов имеют кодовое расстояние, большее конструктивного, и, следовательно, они способны корректировать случайные ошибки, кратность которых существенно превышает конструктивные рамки. Коррекцию таких ошибок называем плюс-декодированием. Показано, что реализовать плюс-декодирование невозможно известными классическими методами и алгоритмами, а только имеющимися и развивающимися средствами теории норм синдромов. В работе предложены два алгоритма реализации плюс-декодирования перестановочными норменными методами. Непримитивные БЧХ-коды перспективны для приложений в реальных современных инфокоммуникационных системах.

**Ключевые слова:** минимальное расстояние кода, кратность ошибки, БЧХ-код, синдром ошибок, автоморфизм кода.

**Abstract.** Integrated studies completion of BCH codes of different lengths is devoted. Most attention is paid to codes whose lengths are intermediate between primitive lengths, which are obtained by throwing in a special way from the check matrices of primitive BCH codes of a large number of columns, but with preservation of cyclical properties, which are proposed to be called non-primitive BCH codes. The properties of the named code class are systematically investigated. It is proved that, according to the variety of lengths, about a third of the non-primitive BCH codes have a code distance greater than constructive, and, therefore, they are able to correct random errors, the multiplicity of which significantly exceeds the constructive frame. Correction of such errors is called plus-decoding. It is shown that it is impossible to implement plus-decoding by known classical methods and algorithms, but only by the available and developing means of the theory of norms syndromes. Two algorithms for the implementation of plus-decoding by permutation normal methods are proposed. Non-primitive BCH-codes are promising for applications in real modern information and communication systems.

**Keywords:** minimum code distance, error multiplicity, BCH code, error syndrome, code automorphism.

**Doklady BGUIR. 2019, Vol. 121, No. 3, pp. 12-24**  
**New non-primitive codes formed from primitive BCH**  
**and Hamming codes and their norm evaluation**  
**V.K. Konopelko, V.A. Lipnitski**



## Введение

Современная информационная эпоха, начавшаяся с 80-х годов XX века, характеризуется экспоненциальным ростом потоков передаваемой и хранимой информации, всеобщей компьютеризацией, технологической революцией. Она сопровождается всеобщей экспансией цифровых систем передачи информации. Надежность и достоверность передачи и хранения информации в них достигается применением спектра помехоустойчивых кодов. К последним предъявляются различные и порой противоречащие друг другу требования: применение кодов различной длины с высокой корректирующей способностью и высоким быстродействием, масштабируемостью.

Корректирующий потенциал каждого линейного кода обеспечивается объемом его спектра ошибок с попарно различными синдромами. Однако декодирование прямыми развязками типа «синдром–ошибка» эффективны лишь при исправлении одиночных ошибок. Современные же коды рассчитаны на исправление ошибок кратности  $v > 1$ . Как правило, этот потенциал реализуется в декодерах составлением и решением над полями Галуа алгебраических уравнений соответствующей степени. В современном помехоустойчивом кодировании наиболее острой является проблема «селектора». Суть ее – в быстром и надежном нахождении нужного вектора-ошибки среди огромной массы всего корректируемого многообразия ошибок [1, 2].

Белорусская алгебраическая школа и белорусская школа цифровой обработки сигналов хорошо известны в научном мире. Их представителями в начале XXI века проведены широкие исследования использования автоморфизмов помехоустойчивых кодов. Это привело к формированию понятия норм синдромов ошибок в кодах Боуза-Чоудхури-Хоквингема (БЧХ-кодах), установлению независимости норм синдромов от циклических сдвигов координат векторов-ошибок, исследованию иных свойств норм синдромов, созданию развитой теории норм синдромов (ТНС) [2, 3]. Теория норм синдромов позволила предложить эффективные перестановочные норменные методы коррекции ошибок, альтернативные методам решения алгебраических уравнений, на порядок снижающие влияние проблемы «селектора». Знакомству с дальнейшими результатами по применению ТНС в помехоустойчивом кодировании и посвящена данная статья.

### Краткие сведения о строении БЧХ-кодов

БЧХ-код – это линейный  $(n, k)$ -код, то есть  $k$ -мерное подпространство в  $n$ -мерном двоичном пространстве (над полем  $GF(2) = Z / 2Z$ ). Точное определение БЧХ-кодов напрямую связано с полями Галуа  $GF(2^m)$ . Наиболее популярны в приложениях циклические коды  $C_{2t+1}$ , которые задаются проверочными матрицами вида

$$H = (\beta^i, \beta^{3i}, \dots, \beta^{(2t-1)i})^T. \quad (1)$$

Здесь  $\beta$  – элемент мультипликативной группы  $GF(2^m)^*$  поля  $GF(2^m)$  порядка  $n = (2^m - 1) / \tau$  для некоторого делителя  $\tau$  числа  $|GF(2^m)^*| = 2^m - 1$ , в частности  $\tau = 1$ ,  $0 \leq i \leq (n - 1)$ . Длина кода  $C_{2t+1}$  равна  $n$  и всегда является нечетной величиной [1]. Такие коды называют БЧХ-кодами с конструктивным расстоянием  $2t + 1$ , поскольку они рассчитаны на исправление  $t$ -кратных случайных ошибок, имеют наибольшую размерность среди подобных кодов и скорость передачи информации.

Группа  $GF(2^m)^*$ , как известно, является циклической. Если  $\alpha$  – образующая этой группы – примитивный элемент поля  $GF(2^m)$ , то в качестве  $\beta$  можно взять  $\beta = \alpha^\tau$ . Тогда при  $\tau = 1$  элемент  $\beta = \alpha$ ,  $n = 2^m - 1$ , код  $C_{2t+1}$ , естественно, называется примитивным; если же  $\tau > 1$ , то  $\beta \neq \alpha$  и код  $C_{2t+1}$  называют непримитивным, что также вполне естественно.

Матрица (1) – двоичная, каждый элемент  $\beta^i$  в ней представлен вектором-столбцом из координат этого элемента как вектора пространства  $GF(2^m)$  над полем  $GF(2)$  в базе

$\alpha^{m-1}, \alpha^{m-2}, \dots, \alpha^0 = 1$ . Для существования кода  $C_{2t+1}$  длиной  $n = (2^m - 1)/\tau$  необходимо выполнение условия:  $k = \dim C_{2t+1} = n - \text{rank}H > 0$ . Конечно, выполнение условия  $k = 1$  делает соответствующий код абсолютно не интересным для применений – все «богатство» передаваемых с помощью такого кода сообщений сводится к двум словам:  $\bar{0} = (0, 0, \dots, 0)$  и  $\bar{1} = (1, 1, \dots, 1)$ . Поэтому реальный код должен иметь размерность  $k \gg 1$ .

Чаще всего  $\text{rank}H = tm$ . Главной причиной наличия неравенства  $\text{rank}H < tm$  является сопряженность некоторых из элементов  $\beta, \beta^3, \dots, \beta^{2^i-1}$ . Если элементы  $\beta^{2^i-1}$  и  $\beta^{2^j-1}$  сопряжены друг с другом для некоторых целых  $i, j, 1 \leq i < j \leq t$ , то есть являются корнями одного и того же неприводимого над полем  $GF(2) = Z/2Z$  полинома, то, как доказано в [3],  $\text{rank}(\beta^{2^i-1}, \beta^{2^j-1})^T = \text{rank}(\beta^{2^i-1}) = m$ . В таком случае  $\text{rank}H \leq (t-1)m$ .

Сопряженность элементов  $\beta^{2^i-1}$  и  $\beta^{2^j-1}$  эквивалентна совпадению друг с другом циклотомических классов  $C(2i-1)$  и  $C(2j-1)$  по модулю  $n$  [2]. Такие совпадения нередки даже для примитивных БЧХ-кодов. Так, по модулю 31 совпадают циклотомические классы  $C(9)$  и  $C(5)$ ; по модулю 63 –  $C(17) = C(5)$ ,  $C(19) = C(13)$ ; по модулю 127 –  $C(17) = C(9)$ ,  $C(25) = C(19)$ ,  $C(33) = C(5)$ .

Конструктивное расстояние  $\delta$  БЧХ-кода  $C_{2t+1}$  считается равным  $2t+1$ . Точное значение его минимального расстояния  $d \geq \delta$ . Отмеченная выше сопряженность двух элементов матрицы (1) не только уменьшает на  $m$  количество ее линейно независимых строк, но и автоматически увеличивает на 2 его минимальное расстояние по сравнению с конструктивным. Так, в силу сказанного, у примитивного кода  $C_9$  длиной 31  $\delta = 9$ , а  $d = 11$  [2], у БЧХ-кодов  $C_{17}$  с длинами 63 и 127  $\delta = 17$ , а  $d = 19$ .

Непримитивные коды предоставляют массу подобных примеров [3, 4]. Глубинная причина существования таких примеров кроется в следующей базовой теореме помехоустойчивого кодирования: «Минимальное расстояние кода  $L$  равно  $d$  тогда и только тогда, когда любые  $d-1$  столбцов проверочной матрицы  $H_L$  линейно независимы, но найдутся  $d$  линейно зависимых столбцов» [2, 5]. Очевидно, все столбцы проверочной  $(tm \times n)$ -матрицы  $H_{\text{непр}}$  каждого непримитивного БЧХ-кода над полем  $GF(2^m)$  принадлежат  $H_{\text{прим}}$ -проверочной  $(tm \times (2^m - 1))$ -матрице примитивного БЧХ-кода над тем же полем, а матрица  $H_{\text{непр}}$  получается из  $H_{\text{прим}}$ , по сути дела, выбрасыванием большого числа столбцов –  $(\tau - 1)d$ . Такая процедура может привести только к увеличению минимального расстояния кода. Истинное же значение величины  $d$  приходится вычислять в каждом конкретном случае, что является сложной задачей, применяя один из четырех подходов, разработанных именно для БЧХ-кодов [2, 3].

В монографиях [2, 3] содержатся различные аспекты ТНС, разработанные в основном для примитивных реверсивных и БЧХ-кодов. Наиболее подробно рассмотрены, вплоть до практических приложений, коды с минимальным расстоянием 5. В [4, 5] для БЧХ-кодов, исправляющих тройные ошибки, разработан оригинальный метод сжатия норм синдромов.

### Свойства непримитивных БЧХ-кодов

Систематическое исследование непримитивных БЧХ-кодов и перенос на них ТНС приведено в [3], продолжено в работе [6] и далее в [7–9]. Из [1] известно, что примитивные коды  $C_5$ , которые задаются проверочными матрицами

$$H = (\beta^i, \beta^{3i})^T \quad (2)$$

с  $\beta = \alpha$ , при  $m \geq 4$  имеют ранг матрицы (2), равный  $2m$ , их циклотомические классы  $C(1) \neq C(3)$ , а размерность  $k = n - 2m$ , при этом минимальное расстояние  $d = \delta = 5$ . К сожалению, у непримитивных кодов  $C_5$  любое из перечисленных соотношений может нарушиться. В каждом конкретном случае необходима внимательная проверка каждого параметра кода, что сопровождается дополнительными вычислениями и зачастую требует серьезных компьютерных ресурсов.

Ранг подматрицы  $(\beta^{3i}) = (1, \beta^3, \beta^6, \dots, \beta^{3(n-1)})$  матрицы (2) и матрицы (1) чаще всего также равен  $m$ . Очевидно, из трех последовательных нечетных натуральных значений числа  $n$  одно делится на три, а два – не делятся на три. Пусть  $\text{НОД}(3, n) = 1$ . Пусть отображение  $\varphi_3$  циклической группы  $\{1, \beta, \beta^2, \dots, \beta^{n-1}\}$  порядка  $n$  в себя действует по правилу  $\varphi_3(x) = x^3$ . Оно является автоморфизмом этой группы (см. [10], теорема 2.12.3). Отсюда, в частности, следует, что  $\beta^3$  имеет тот же порядок в мультипликативной группе  $GF(2^m)^*$ , что и его прообраз  $\beta = \varphi_3^{-1}(\beta^3)$  при отображении  $\varphi_3$ . По построению, поле  $GF(2^m)$  является минимальным, содержащим  $\beta$ . Это означает, что неприводимый полином над  $GF(2)$  с корнем  $\beta$  должен иметь степень  $m$ . В силу сказанного то же самое должно иметь место и для  $\beta^3$ . Отсюда вытекает, что элементы  $1, \beta^3, \beta^6, \dots, \beta^{3(m-1)}$  образуют линейно независимую над  $GF(2)$  систему и, следовательно,  $\text{rank}(\beta^{3i}) = m$ .

Пусть  $n$  делится на три. Здесь возможны два варианта:

1)  $\beta^3$  остается элементом поля  $GF(2^m)$  и не принадлежит никакому подполю этого поля;

2) существует подполе  $GF(2^\mu)$  поля  $GF(2^m)$ , содержащее  $\beta^3$ .

Первый случай, очевидно, означает, что над полем  $GF(2)$  неприводимый полином элемента  $\beta^3$  обязан иметь степень  $m$ , а в таком случае  $\text{rank}(\beta^{3i}) = m$ . Второй случай, по тем же причинам, означает, что  $\text{rank}(\beta^{3i}) = \mu$  для некоторого  $\mu < n$ , а точнее, для некоторого делителя  $\mu$  числа  $m$ .

Вот пример, иллюстрирующий второй случай. БЧХ-код  $C_5$  длиной 219 определен над полем  $GF(2^{18})$ .  $2^{18} - 1 = 7 \cdot 9 \cdot 57 \cdot 73$ . Здесь матрица (2) задается элементом  $\beta = \alpha^{57 \cdot 21} = \alpha^{1197}$ , а элемент  $\beta^3 = \alpha^{57 \cdot 21 \cdot 3} = \alpha^{57 \cdot 7 \cdot 9}$  имеет порядок 73. Но тогда элемент  $\beta^3$  должен принадлежать мультипликативной группе  $GF(2^9)^*$ , имеющей порядок  $2^9 - 1 = 7 \cdot 73$ . Но тогда  $\text{rank}(\beta^{3i}) \leq 9$ .

Элементы  $\beta$  и  $\beta^3$  не должны быть сопряженными в поле  $GF(2^m)$ , то есть не должны быть корнями одного и того же неприводимого над полем  $GF(2)$  полинома, что, как отмечалось выше, эквивалентно неравенству  $C(1) \neq C(3)$  циклотомических классов. Однако это свойство не всегда выполняется. Например, у БЧХ-кода  $C_5$  длиной 95 имеет место совпадение:  $C(1) = C(3)$ . Поэтому рассматриваемый код  $C_5$  реально относится к классу кодов Хемминга.

Приведем еще некоторые примеры. Имеется 46 нечетных значений возможной длины  $n$  БЧХ-кодов в диапазоне от 9 до 99. Для 14 значений длины выполняется неравенство  $n < 2m$ . Это значения  $n = 9, 11, 13, 19, 25, 27, 29, 37, 53, 59, 61, 67, 81, 83$ . Для каждого из перечисленных значений длины БЧХ-коды  $C_5$  не существуют. В диапазон от 9 до 99 попадают три значения длины – 15, 31 и 63 – длины примитивных БЧХ-кодов  $C_5$ . Семь БЧХ-кодов  $C_5$  длиной 17, 23, 41, 47, 71, 79, 97 имеют размерность 1. 21 оставшихся в диапазоне длин от 9 до 99 БЧХ-кодов  $C_5$  имеют размерность больше 1 (с длинами 21, 33, 35, 39, 43, 45, 49, 51, 55, 57, 65, 69, 73, 75, 77, 85, 87, 89, 91, 93, 99). Среди них двенадцать (более половины кодов!) имеют  $d > 5$ . Пять из них имеют  $d = 7$  ( $n = 49$  (здесь  $C(3) = C(5)$ ), 69, 73, 77 (здесь  $C(3) = C(5)$ ), 91 (здесь  $C(3) = C(5)$ )), пять имеют  $d = 9$  (при  $n = 33, 57, 87, 89$  и 99),

один – длиной 39 – имеет  $d = 10$  (здесь  $C(1) = C(5)$ ), один – длиной 43 – имеет  $d = 13$  (здесь  $C(3) = C(5)$ ). Более подробная информация о названных 21 кодах  $C_5$  сосредоточена в табл. 1.

Таблица 1. Непрimitive БЧХ-коды  $C_5$  над полями  $GF(2^m)$  в диапазоне длин от 9 до 99, размерность которых  $k$

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$n$	21	33	35	39	43	45	49	51	55	57	65
$m$	6	10	12	12	14	12	21	8	20	18	12
$k$	9	13	11	15	15	21	7	35	15	21	41
$d$	5	9	5	10	13	5	7	5	5	9	5

№ п/п	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
$n$	69	73	75	77	85	87	89	91	93	99
$m$	22	9	20	30	8	28	11	12	10	30
$k$	25	55	35	17	69	31	67	67	73	39
$d$	7	7	5	7	5	9	9	7	5	9

Вычисления с непрimitive БЧХ-кодами длиной  $n > 99$  подтверждают сохранение отмеченной тенденции – примерно 1/3 всех непрimitive БЧХ-кодов с  $\delta = 5$  имеют  $d > 5$ . Вот некоторые примеры.

Над полем  $GF(2^{36})$  определены коды  $C_5$  длиной 109 и 111. У первого равны между собой следующие циклотомические классы:  $C(3) = C(5) = C(7)$ . Значит, у данного кода минимальное расстояние  $d \geq 9$ . У второго кода  $C(1) = C(5) = C(7)$ ,  $C(3) = C(9)$ . Значит, у данного кода минимальное расстояние  $d \geq 11$ .

Над полем  $GF(2^{52})$  определены коды  $C_5$  длиной 157 и 159. У первого равны между собой следующие циклотомические классы:  $C(3) = C(5)$ ,  $C(1) = C(7)$ . Значит, у данного кода минимальное расстояние  $d \geq 9$ . У второго кода  $C(1) = C(5) = C(7)$ ;  $C(3) = C(9)$ . Значит, у данного кода минимальное расстояние  $d \geq 11$ .

Как уже отмечалось, определение точного значения минимального расстояния для конкретных кодов – достаточно трудоемкая задача, требующая серьезных компьютерных вычислений, индивидуальных подходов и методов в каждом отдельном случае.

### Неprimitive коды Хемминга

Всякий primitive двоичный код Хемминга имеет длину  $n = 2^m - 1$ , размерность  $k = n - m$ , задается проверочной матрицей  $H = (\alpha^i)$  над полем Галуа  $GF(2^m)$ , имеет минимальное расстояние  $d = 3$ , а потому способен исправлять только одиночные ошибки.

Если продолжать терминологию из [1], непрimitive коды Хемминга могут иметь любую нечетную длину  $n \neq 2^m - 1$ . Задаются они проверочной матрицей (1) при минимальном значении  $t = 1$ . При таком задании коды Хемминга могут иметь минимальное расстояние  $d > 3$ , как например, код длиной 17 ( $d = 5, k = 8$ ) или код длиной 23 – двоичный код Голя.

В [8] установлено, что если длина  $n = p \cdot s$  делится на простое число  $p$ , то код Хемминга длиной  $n$  содержит кодовые слова весом  $p$ . Отсюда следует, что его минимальное расстояние  $d \leq p$ . В частности, при  $n$ , делящемся на 3, минимальное расстояние кода Хемминга  $d = 3$ . Таким образом, коды Хемминга простой длины или длины, не имеющей малых делителей, имеют все шансы на большое минимальное расстояние. Проведенные исследования всех кодов Хемминга в диапазоне длин от 9 до 109 показывают, что, как и для БЧХ-кодов, примерно на трети длин коды Хемминга имеют минимальное расстояние, большее трех. Более того, доказана следующая теорема.

**Теорема 1.** Для любого наперед заданного целого числа  $d_0 > 3$  найдется двоичный код Хемминга, минимальное расстояние которого  $d \geq d_0$ .

Доказательство базируется на том, что бесконечное число квадратично-вычетных кодов (КВ-кодов) принадлежит классу непрimitive кодов Хемминга.

Двоичные КВ-коды имеют простую длину  $n = p = 8k \pm 1$ , они являются циклическими кодами, порождаются как идеалы в кольце полиномов  $R_p = GF(2)[x]/\langle x^p - 1 \rangle$  одним из полиномов следующих четырех видов:  $q(x), (x-1)q(x), n(x), (x-1)n(x)$  [1].  $q(x)$  и  $n(x)$  – специальные полиномы степени  $(p-1)/2$  из кольца  $GF(2)[x] : q(x) = \prod_{i \in Q} (x - \beta^i)$ ;  $n(x) = \prod_{r \in N} (x - \beta^r)$ , где  $\beta$  – примитивный корень  $p$ -й степени из 1 в расширении  $GF(2^m)$  поля  $GF(2)$  наименьшей степени  $m$ ;  $Q$  – подгруппа квадратов (квадратичных вычетов по модулю  $p$ ) циклической мультипликативной группы  $GF(p)^*$  поля  $GF(p)$ , являющейся, очевидно, циклической подгруппой;  $N$  – множество квадратичных невычетов по модулю  $p$ .

Заметим, что имеется бесконечно много простых чисел вида  $p = 8k \pm 1$  [11]. Как известно [11], для простых  $p = 8k \pm 1$  в поле  $GF(p) = Z/pZ$  класс 2 является квадратичным вычетом, то есть  $2^{(p-1)/2} \equiv 1 \pmod{p}$ . Поэтому класс 2 принадлежит группе  $Q$ , вместе со всей циклической подгруппой  $\langle 2 \rangle$ , порожденной классом вычетов 2. Сама же группа  $Q$  имеет порядок  $(p-1)/2$ . Ту же мощность  $(p-1)/2$  имеет и множество  $N$  квадратичных невычетов.

Как отмечено выше,  $2^{(p-1)/2} - 1$  делится на  $p$  для рассматриваемых значений  $p$ . Поэтому поле  $GF(2^m)$  с минимальным  $m$ , содержащее корень  $\beta$ , имеет показатель  $m = (p-1)/2$  или делящий число  $(p-1)/2$ . Обозначим через  $C_{q(x)}$  квадратично-вычетный код циклический код длиной  $p$ , порожденный полиномом  $q(x)$  в кольце  $R_p$ . При этом предполагаем, что  $m = (p-1)/2$ . Тогда  $q(x)$  совпадает с неприводимым полином  $M_\beta(x)$  элемента  $\beta$  над  $Z/pZ$ , поскольку они имеют одинаковую степень и общий корень  $\beta^2$ . Отсюда следует теорема.

*Теорема 2.* Класс КВ-кодов  $C_{q(x)}$ , определенных над полем  $GF(2^m)$  с  $m = (p-1)/2$ , принадлежит семейству кодов Хемминга.

Из свойств квадратично-вычетных кодов [1] непосредственно вытекает следующее.

*Следствие.* Коды Хемминга, имеющие простую длину  $n = p = 8k \pm 1$  и поле определения  $GF(2^{(p-1)/2})$ , имеют минимальное расстояние  $d \geq \sqrt{p}$ .

Следовательно, минимальное расстояние непримитивных кодов Хемминга может принимать сколь угодно большие значения.

Проблемы, вопросы и решения, связанные с коррекцией ошибок, выходящих за рамки конструктивных возможностей кодов, предлагаются кратко обозначить как «плюс-декодирование».

Теория норм синдромов [2, 3], давшая существенное решение проблемы «селектора», предоставляет и конструктивные подходы к разрешению проблем «плюс-декодирования». Рассмотрим их в приложении к непримитивным БЧХ-кодам с малым конструктивным расстоянием.

### Возможности плюс-декодирования для БЧХ-кодов $C_5$

В XX веке проблема коррекции декодирования ошибок, выходящих за рамки конструктивных возможностей, имела частный характер, количество таких ошибок было не очень значительным [2]. В случае непримитивных БЧХ-кодов ситуация значительно меняется. Увеличение кодового расстояния  $d$  на два по сравнению с конструктивным влечет увеличение кратности исправляемых ошибок на единицу. Их же количество определяется с помощью биномиальных коэффициентов.

По своему построению БЧХ-код  $C_5$  рассчитан на исправление одиночных и двойных ошибок, количество которых  $K_{\text{констр}} = C_n^1 + C_n^2 = \frac{n(n+1)}{2}$ . Если у данного кода  $C_5$  реальное минимальное расстояние  $d = 7$  (в табл. 1 отмечены пять таких кодов), то этот код должен

исправлять и тройные ошибки в количестве  $C_n^3 = \frac{n(n-1)(n-2)}{2 \cdot 3}$ . Данное количество ошибок и составляет потенциал  $K^+$  плюс-декодирования. Очевидно, здесь  $K^+$  превосходит  $K_{\text{констр}}$  почти в  $\frac{n}{3}$  раз. Если же код  $C_5$  имеет реальное значение  $d=9$  (в табл. 1 отмечено пять таких кодов), то  $K^+ = C_n^3 + C_n^4 = \frac{(n+1)n(n-1)(n-2)}{2 \cdot 3 \cdot 4}$ . Это превосходит  $K_{\text{констр}}$  почти в  $\frac{n^2}{12}$  раз (см. табл. 2).

Таблица 2. Потенциал конструктивного и плюс-декодирования у БЧХ-кодов  $C_5$  в диапазоне длин от 9 до 99, размерность которых  $k > 1$  и  $d \geq 7$

№ п/п	1	2	3	4	5	6
$N$	33	39	43	49	57	69
$M$	10	12	14	21	18	22
$D$	9	10	13	7	9	7
$K_{\text{констр}}$	561	780	946	1225	1653	2415
$K^+$	46376	91390	7194803	18424	424770	52394
$N$	73	77	87	89	91	99
$M$	9	30	28	11	12	30
$D$	7	7	9	7	7	9
$K_{\text{констр}}$	2701	3003	3828	4005	4186	4950
$K^+$	62196	73150	2331890	2555190	121485	3921225

Данные табл. 2 демонстрируют, что в БЧХ-кодах  $C_5$  на плюс-декодирование приходится в десятки тысяч раз больше векторов-ошибок, чем на конструктивное декодирование.

### Реализация возможностей плюс-декодирования с помощью ТНС

Пусть минимальное расстояние кода  $d = 2t + 1$  или  $d = 2t + 2$ . Тогда в данном коде синдромы всех векторов-ошибок весом  $\omega$ ,  $1 \leq \omega \leq t$ , попарно различны. Это свойство служит теоретической гарантией возможности коррекции кодом всех ошибок весом  $\omega$ ,  $1 \leq \omega \leq t$ . Практически же реализация данной возможности зависит от кодов, кратности ошибок и многих иных факторов. При  $t = 1$  возможна прямая связь «синдром – ошибка». При  $t = 2$  коррекция двойных ошибок в БЧХ-кодах  $C_5$  осуществляется сведением к решению квадратных уравнений в поле определения кода  $GF(2^m)$ .

Однако стандартных методов коррекции ошибок, выходящих за конструктивные рамки, не существует. Не найти квадратным уравнением координаты тройной ошибки. С другой стороны, слишком слабы структурные возможности синдромов в БЧХ-коде  $C_5$ , чтобы составить кубическое уравнение для нахождения координат тройной ошибки. Для плюс-декодирования БЧХ-кодов  $C_5$  явно требуются иные подходы.

Теория норм синдромов опирается на свойство цикличности БЧХ-кодов  $C$  с проверочными матрицами (1) и (2). Пусть  $n$  – длина кода  $C$  и  $AutC$  – его группа автоморфизмов.  $AutC$  содержит циклическую подгруппу  $\Gamma = \langle \sigma \rangle$  порядка  $n$ , состоящую из степеней  $\sigma$ -линейного преобразования двоичного векторного пространства  $V_n$ , действующего на каждый вектор  $\bar{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n) \in V_n$  по правилу

$$\sigma(x_1, x_2, \dots, x_n) = (x_n, x_1, x_2, \dots, x_{n-1}). \quad (3)$$

Пространство  $V_n$ , а с ним и совокупность  $K_C$  декодируемых БЧХ-кодом  $C$  векторов-ошибок, разбиваются под действием группы  $\Gamma$  на попарно непересекающиеся классы –

$\Gamma$ -орбиты. Каждая  $\Gamma$ -орбита состоит из своеобразного кольца переходящих друг в друга под действием степеней  $\sigma$  векторов и, следовательно, однозначно определяется любым из своих представителей. В силу соотношения (3) всякая  $\Gamma$ -орбита  $J$  имеет следующее строение:

$$J = \{\bar{e}, \sigma(\bar{e}), \dots, \sigma^{\mu-1}(\bar{e})\} \quad (4)$$

для произвольного фиксированного вектора  $\bar{e} \in J$ . Здесь  $\mu > 1$  – наименьшее натуральное число с условием  $\sigma^\mu(\bar{e}) = \bar{e}$ . Число  $\mu$  – делитель длины  $n$  кода  $C$ . Чаще всего  $\mu = n$ . В последнем случае  $\Gamma$ -орбита называется полной. Равенство (4) служит основанием для более точного обозначения  $\Gamma$ -орбит:  $J = \langle \bar{e} \rangle$ .

Отображение двоичных пространств  $\varphi_H: V_n \rightarrow V_{2m}$ , действующее по правилу  $\bar{y} = \bar{x} \cdot H^T$ , есть линейный оператор. Согласно основам линейной алгебры, полный образ  $\varphi_H(V_n)$  есть подпространство пространства  $V_{2m}$  размерностью  $n - \dim \text{Ker} H = n - k = 2m$ . Это означает, что  $\varphi_H(V_n) = V_{2m}$ .

В силу формулы (2) каждая вектор-ошибка  $\bar{e}$  в БЧХ-коде  $C_5$ , определенном над полем  $GF(2^m)$ , имеет синдром  $S(\bar{e}) = H \cdot \bar{e}^T = (s_1, s_2)^T$  для  $s_1, s_2 \in GF(2^m)$ . Равенство  $\varphi_H(V_n) = V_{2m}$  влечет, что для произвольных  $s_1^*, s_2^* \in GF(2^m)$  существует вектор  $\bar{e} \in V_n$  такой, что  $S(\bar{e}) = H \cdot \bar{e}^T = (s_1^*, s_2^*)^T$ .

Согласно [2, 3], действие оператора циклического сдвига  $\sigma$  на каждый вектор ошибок  $\bar{e}$  однозначно отражается в коде  $C_5$  на компонентах синдрома этого вектора по формуле

$$S(\sigma(\bar{e})) = (\beta \cdot s_1, \beta^3 \cdot s_2)^T. \quad (5)$$

Из формулы (5) вытекает структура спектра синдромов  $S(\langle \bar{e} \rangle)$   $\Gamma$ -орбиты  $\langle \bar{e} \rangle$ :

$$S(\langle \bar{e} \rangle) = \{\beta^i \cdot s_1, \beta^{3i} \cdot s_2\}, \quad 0 \leq i \leq n-1. \quad (6)$$

Формулы (5), (6) означают, что если у двух  $\Gamma$ -орбит найдутся векторы с одинаковыми синдромами, то спектры синдромов этих орбит совпадают полностью. Формула (5) послужила основой для следующего определения. Нормой синдрома  $S(\bar{e}) = (s_1, s_2)^T$  в БЧХ-коде  $C_5$  называется величина

$$N = N(S(\bar{e})) = \begin{cases} \frac{s_2}{s_1^3}; & s_1 \neq 0; \\ +\infty; & s_1 = 0, s_2 \neq 0. \end{cases} \quad (7)$$

Нормы синдромов обладают рядом важных свойств. Во-первых, норма может быть любым элементом поля  $GF(2^m)$ , а также имеет одно особое значение:  $+\infty$ . Всего, таким образом, норма принимает  $n+2 = 2^m + 1$  значений. Во-вторых, у всех векторов, принадлежащих отдельно взятой  $\Gamma$ -орбите  $J$ , норма синдрома одинакова. Это единственное значение естественно назвать нормой  $N(J)$  данной  $\Gamma$ -орбиты  $J$ . Таким образом,  $N(J) = N(S(\bar{e}))$  для произвольного вектора  $\bar{e} \in J$ .

В третьих, если две  $\Gamma$ -орбиты  $J_1$  и  $J_2$  имеют различные нормы, то спектры синдромов этих орбит не пересекаются, то есть эти  $\Gamma$ -орбиты не могут иметь векторов с одинаковыми синдромами.

В четвертых, синдромы равномерно распределены по значениям норм синдромов: для каждого из  $n+2 = 2^m + 1$  значений  $N$  норм синдромов найдется в точности  $n = 2^m - 1$  различных синдромов, норма которых равна  $N$ . В самом деле, пусть у синдрома  $S(\bar{e}) = (s_1, s_2)^T$  компонента  $s_1 \neq 0$  и пусть  $N(S(\bar{e})) = N$ . Тогда для примитивного элемента  $\alpha$  поля  $GF(2^m)$  различные  $n$  синдромов  $(\alpha^i \cdot s_1, \alpha^{3i} \cdot s_2)^T$ ,  $0 \leq i \leq n-1$ , принимают то же значение нормы  $N$ . Для всех  $n = 2^m - 1$  синдромов вида  $(0, s_2)^T$ , где  $s_2 \neq 0$ ,  $s_2 \in GF(2^m)$ , норма

$N(S) = +\infty$ . Таким образом, рассмотрено уже  $n(n+2) = (2^m - 1) \cdot (2^m + 1) = 2^{2m} - 1$  синдромов. Добавим к ним нулевой синдром. Получим весь спектр синдромов в БЧХ-коде  $C_s$ , что и завершает доказательство.

В-пятых, у примитивных БЧХ-кодов из равенства  $N(J_1) = N(J_2)$  для двух полных  $\Gamma$ -орбит  $J_1$  и  $J_2$  с полными спектрами синдромов следует также равенство и самих синдромов: для всякого вектора  $\bar{f} \in J_1$  найдется вектор  $\bar{g} \in J_2$  такой, что их синдромы равны:  $S(\bar{f}) = S(\bar{g})$ .

Для непримитивных БЧХ-кодов ситуация сложнее. Здесь всякая полная  $\Gamma$ -орбита  $J$  с полным спектром синдромов  $S(J)$  содержит  $n = (2^m - 1)/\tau$  различных векторов с  $n$  попарно-различными синдромами из  $S(J)$ . Отсюда следует, что может существовать  $\tau$  различных полных  $\Gamma$ -орбит с попарно непересекающимися полными спектрами синдромов и с одной и той же нормой.

Приведенное рассуждение демонстрирует, как действие автоморфизмов кодов на векторы ошибок взаимно однозначно отображается на числах – на синдромах. Отлаженная веками алгебра чисел позволит, несомненно, найти эффективный алгоритм определения самих векторов-ошибок вычислениями с их синдромами и нормами.

Действительно, теория норм синдромов обеспечивает свой оригинальный взгляд на декодирование ошибок. Она предлагает рассматривать не отдельные векторы ошибок, а их  $\Gamma$ -орбиты. Любую декодируемую совокупность  $K$  векторов-ошибок с попарно различными синдромами можно распределить на множество  $K/\Gamma$  непересекающихся  $\Gamma$ -орбит этих ошибок. Для идентификации каждой конкретной  $\Gamma$ -орбиты  $J$  достаточно зафиксировать один из ее представителей  $\bar{e}_j$ . Все остальные векторы орбиты легко строятся циклическими сдвигами координат вектора  $\bar{e}_j$ .

Все  $\Gamma$ -орбиты  $J$  декодируемой данным кодом  $C$  совокупности  $K_C$  векторов-ошибок обязательно имеют попарно непересекающиеся спектры синдромов  $S(J)$ . Спектр  $S(J)$  однозначно восстанавливается по формуле (5) из синдрома  $S(\bar{e}_j)$ , как уже отмечалось выше.

Зафиксируем список 1 образующих  $\bar{e}_j$  совокупности  $K_C/\Gamma$ , список 2 синдромов  $S(\bar{e}_j)$ , а также список 3 норм  $N(S(\bar{e}_j))$ . Благодаря им можно легко определить «ряд и место» подлежащей определению вектор-ошибки  $\bar{e}$  в каждом конкретном сообщении  $\bar{x}$ , которое принято ТКС на основе кода  $C$ .

### Алгоритм 1 – норменное декодирование на основе $\Gamma$ -орбит

Инфокоммуникационная система (ИКС), получив очередное сообщение  $\bar{x}$ , вычисляет его синдром ошибок  $S(\bar{x}) = S(\bar{e})$ . Пусть  $S(\bar{x}) = S(\bar{e}) \neq \bar{0}$ . Это свидетельствует о наличии в сообщении неизвестной и подлежащей определению вектор-ошибки  $\bar{e}$ . Тогда вычисляем норму  $N^* = N(S(\bar{x}))$ . Совпадение  $N^*$  с  $N(S(\bar{e}_j))$  из списка 3 сужает круг  $\Gamma$ -орбит декодируемой совокупности, которые могут содержать искомую вектор-ошибку  $\bar{e}$  в сообщении  $\bar{x}$ , до небольшой группы орбит  $J_1, J_2, \dots, J_\theta$ ,  $1 \leq \theta \leq \tau$ , имеющих одинаковую норму  $N^*$ .

Синдром  $S(\bar{x}) = S(\bar{e}) = (s_1, s_2)$  должен принадлежать спектру синдромов только одной  $\Gamma$ -орбиты  $J_l$ ,  $1 \leq l \leq \theta$ . Предположим, что  $N^*$  является элементом поля Галуа  $GF(2^m)$ . Тогда у всех рассматриваемых синдромов первая компонента  $s_1 \neq 0$ . Пусть синдром образующей  $\bar{e}_{j_l}$   $\Gamma$ -орбиты  $J_l$  имеет первую компоненту  $s_1^{j_l} = \alpha^v$  для некоторого целого  $v$ ,  $0 \leq v < n$ . Пусть у синдрома  $S(\bar{x})$  первая компонента  $s_1 = \alpha^\lambda$ ,  $0 \leq \lambda < n$ . Тогда для подходящего целого  $i$ ,  $0 \leq i < n$ , согласно формуле (6),  $\alpha^\lambda = \beta^i \cdot \alpha^v = \alpha^{i\tau + v}$ . Полученное равенство означает, что либо  $\lambda - v$  (если  $\lambda > v$ ), либо  $2^m - 1 + \lambda - v$  (если  $\lambda < v$ ) делится на  $\tau$ . Тогда частное  $i$  однозначно определяет



искомую вектор-ошибку:  $\bar{e} = \sigma^i(\bar{e}_{J_i})$ . Величина же  $l$  и есть то единственное значение из множества целых  $\{1, 2, \dots, \theta\}$ , для которого только одна из величин  $\lambda - v$  или  $2^m - 1 + \lambda - v$  делится нацело на  $\tau$ .

Возможно,  $N^* = +\infty$ . Тогда у всех рассматриваемых синдромов первая компонента  $s_1 = 0$ . Пусть у синдрома образующей  $\bar{e}_{J_i}$   $\Gamma$ -орбиты  $J_i$  вторая компонента  $s_2^{J_i} = \alpha^v$  для целого  $v$ ,  $0 \leq v < n$ . Пусть вторая компонента синдрома  $S(\bar{x})$   $s_2 = \alpha^\lambda$ ,  $0 \leq \lambda < n$ . Тогда для подходящего целого  $i$ ,  $0 \leq i < n$ , согласно формуле (6),  $\alpha^\lambda = \beta^{3i} \cdot \alpha^v = \alpha^{\tau 3i + v}$ . Полученное равенство влечет, что либо  $\lambda - v$  (если  $\lambda > v$ ), либо  $2^m - 1 + \lambda - v$  (если  $\lambda < v$ ) должно делиться на  $\tau$ . Величина  $l$  и есть то единственное число из множества целых чисел  $\{1, 2, \dots, \theta\}$ , для которого одна из величин  $\lambda - v$  или  $2^m - 1 + \lambda - v$  делится нацело на  $\tau$ . Ясно, этим целым частным должно быть число  $3i$ .

Предположим, что длина кода  $n$  не делится на 3. Тогда для взаимно простых чисел  $n$  и 3 выполняется соотношение Безу: существуют такие целые числа  $u$  и  $v$ , что  $3u + nv = 1$ . Искомую вектор-ошибку  $\bar{e}$  находим из формулы  $\bar{e} = \sigma^{3ui}(\bar{e}_{J_i})$ . В самом деле,  $\sigma^{3ui}(\bar{e}_{J_i}) = \sigma^{3iu + nvi}(\bar{e}_{J_i}) = \sigma^{(3u + nv)i}(\bar{e}_{J_i}) = \sigma^i(\bar{e}_{J_i}) = \bar{e}$ .

Случай, когда  $N^* = +\infty$  и  $n$  не делится на 3, встречается весьма редко, он присущ неполным  $\Gamma$ -орбитам, а потому рассматривается отдельно.

Таким образом, работа норменного декодера достаточно наглядно реализуется при создании списков 1–3, характеризующих  $\Gamma$ -орбиты корректируемой совокупности векторов-ошибок. Эффективность работы норменных декодеров особенно наглядна в работе ИКС на примитивных БЧХ-кодах [3, 6]. Для непримитивных БЧХ-кодов немного усложняющим фактором является возможное наличие отдельных значений  $\theta > 1$ .

### Циклотомические подстановки для норменного декодирования

Следует признать, что при  $d > 7$  списки 1–3 становятся достаточно обширными. Работа с ними усложняется. Проблема «селектора» начинает проявлять себя на новом уровне.

Эффективным в преодолении названных затруднений является метод «сжатия» – преобразования исправляемых векторов-ошибок в ошибки с узким спектром значений норм синдромов [5, 6]. Однако разработанные подходы рассчитаны на примитивные коды и на ошибки конкретного веса, автоматически они не переносятся на ошибки большего веса. Для непримитивных же кодов они по-просту не применимы.

Группы автоморфизмов кодов остаются наиболее реальным и наиболее конструктивным средством сжатия обрабатываемой декодерами информации. Группа автоморфизмов любого из кодов  $C_5$  содержит, к примеру, циклотомические подстановки. Их действие, свойства и применение уже рассматривалось в определенной мере в монографии [3].

Циклотомические подстановки составляют циклическую группу  $\Phi$  порядка  $m$  с образующей  $\phi$ , которая действует на каждый вектор-ошибку  $\bar{e}$  с синдромом  $S(\bar{e}) = (s_1, s_2)$  так, что синдром  $S(\phi(\bar{e})) = (s_1^2, s_2^2)$ . В таком случае, при условии  $N(S(\bar{e})) = N \in GF(2^m)$ , норма  $N(S(\phi(\bar{e}))) = N^2$ . Несложно видеть, что вектор  $\phi(\bar{e})$  можно получить из вектора  $\bar{e}$  по правилу: для каждого целого  $i$ ,  $1 \leq i \leq n$ ,  $i$ -я координата вектора  $\bar{e}$  становится  $(2i-1)$ -й координатой вектора  $\phi(\bar{e})$ , если  $2i-1 \leq n$ , и  $(2i-1-n)$ -й координатой вектора  $\phi(\bar{e})$ , если  $2i-1 > n$ .

Циклическая подстановка  $\sigma$  и циклотомическая подстановка  $\phi$  связаны равенством  $\phi\sigma = \sigma^3\phi$  [1, 3]. Они образуют некоммутативную группу  $G$  порядка  $mm$  – подгруппу группы  $Aut(C_5)$ . Пусть  $J$  – некоторая  $\Gamma$ -орбита векторов-ошибок. Тогда  $\phi(J)$  – новая  $\Gamma$ -орбита векторов-ошибок ([3], предложение 2.17). Таким образом, группа  $\Phi$  действует на множестве  $\Gamma$ -орбит  $K/\Gamma$  декодируемой кодом совокупности  $K$  векторов-ошибок, разбивает его

на  $\Phi$ -орбиты. Соответственно, множество  $K$  разбивается на укрупненные  $G$ -орбиты, содержащие, как правило, по  $m$  векторов-ошибок.

Зафиксировав одну вектор-ошибку  $\bar{e}$ , мы можем восстановить все вектор-ошибки  $G$ -орбиты  $\langle \bar{e} \rangle_G$ . Значит, списки 1–3 можно сократить примерно в  $m$  раз, оставив в них по одной образующей каждой  $G$ -орбиты декодируемой совокупности (см. табл. 3).

Таблица 3. Количество  $\Gamma$ -орбит и  $G$ -орбит корректируемой совокупности для БЧХ-кодов  $C_5$  из табл. 2

№ п/п	1	2	3	4	5	6
$N$	33	39	43	49	57	69
$M$	10	12	14	21	18	22
$D$	9	10	13	7	9	7
$K_{\text{констр}}$	561	780	946	1225	1653	2415
$K^+$	46376	91390	7194803	18424	424770	52394
$\Gamma_{\text{констр}}$	17	20	22	25	29	35
$\Gamma^+$	1405	2344	167321	376	7453	760
$G^+$	141	196	11952	18	415	35
$N$	73	77	87	89	91	99
$M$	9	30	28	11	12	30
$D$	7	7	9	9	7	9
$K_{\text{констр}}$	2701	3003	3828	4005	4186	4950
$K^+$	62196	73150	2331890	2555190	121485	3921225
$\Gamma_{\text{констр}}$	37	39	44	45	46	50
$\Gamma^+$	852	950	2680	28710	1335	39609
$G^+$	95	32	958	2610	112	1321

## Алгоритм 2 – алгоритм декодирования ошибок на основе $G$ -орбит

Пусть принято сообщение  $\bar{x}$  с синдромом  $S(\bar{x}) = S(\bar{e}) = (s_1, s_2)$ , норма которого  $N^* = N(S(\bar{x})) \in GF(2^m)$ . Предположим, что  $N^*$  не принадлежит списку 3. Тогда находим такое наименьшее целое  $i$ ,  $1 \leq i \leq m$ , что для  $\lambda = 2^i$  величина  $(N^*)^\lambda = N(S(\bar{e}_j))$  для одного или нескольких векторов  $\bar{e}_j$  из списка 1 образующих  $G$ -орбит корректируемого множества векторов-ошибок. Полученное равенство норм означает, что у искомого вектора-ошибки  $\bar{e}$  в сообщении  $\bar{x}$  вектор  $\phi^i(\bar{e})$  имеет синдром  $S(\phi^i(\bar{e})) = (s_1^\lambda, s_2^\lambda)$ , который принадлежит спектру синдромов  $S(\langle \bar{e}_j \rangle)$  одной  $\Gamma$ -орбиты  $\langle \bar{e}_j \rangle$ , порожденной вектором  $\bar{e}_j$  из списка 1. Алгоритм 1 однозначно определяет вектор  $\bar{e}_j$  и находит выражение вектора  $\phi^i(\bar{e})$  через него:  $\phi^i(\bar{e}) = \sigma^s(\bar{e}_j)$  для подходящего целого  $s$ ,  $0 \leq s \leq n-1$ . После этого вектор  $\bar{e}$  однозначно находится по формуле  $\bar{e} = \phi^{m-i}(\sigma^s(\bar{e}_j))$ .

*Пример.* Рассмотрим непримитивный (33, 13) – БЧХ-код  $C_5$ . Согласно данным табл. 1–3 данный код имеет минимальное расстояние 9 и способен исправлять все случайные ошибки весом 1–4, всего 46937 векторов-ошибок, делящихся на 1423  $\Gamma$ -орбиты. Из них 1  $\Gamma$ -орбита ошибок весом 1, 16  $\Gamma$ -орбит ошибок весом 2, 165 полных  $\Gamma$ -орбит ошибок весом 3 плюс одна неполная  $\Gamma$ -орбита из 11 векторов-ошибок, порожденная вектором  $\bar{e} = (1, 12, 23)$  с ненулевыми координатами на 1, 11 и 22-й позициях, львиную долю составляют 1240  $\Gamma$ -орбит векторов-ошибок весом 4.

Данный код обладает  $2^{20} = 1\,048\,576$  попарно различными синдромами, что примерно в 20 раз превосходит количество корректируемых векторов-ошибок. Однако различных норм

синдромов в данном коде всего может быть  $2^{10} + 1 = 1025$ , что меньше количества  $\Gamma$ -орбит декодируемой совокупности. В списке 3 обязательно найдутся одинаковые нормы.

Для выяснения реальной картины следует задать поле определения данного кода – поле  $GF(2^{10})$ . Зафиксируем неприводимый над  $GF(2)$  и примитивный полином 10-й степени, к примеру, полином  $p(x) = x^{10} + x^3 + 1$ . Пусть  $\alpha$  – его корень. Тогда  $\beta = \alpha^{31}$ . Отсюда, в частности, следует, что декодируемая совокупность  $K$  может содержать до  $\tau = 31$   $\Gamma$ -орбит с одинаковым значением нормы. Среди 17  $\Gamma$ -орбит множества  $\Gamma_{\text{констр}}$  таких быть не может (доказано в [3] для всех кодов  $C_5$ ).

Проведенные вычисления приводят к интересным наблюдениям.

1. В списке 3 присутствуют все возможные значения норм синдромов.  
2. В рассматриваемом коде отсутствуют, за одним исключением, совпадения норм  $\Gamma$ -орбит различного веса.

3. Среди 166  $\Gamma$ -орбит ошибок весом 3 имеется 10 пар  $\Gamma$ -орбит с одинаковыми нормами, объединяющиеся в две  $G$ -орбиты. В качестве образующих этих  $G$ -орбит можно взять векторы:  $\bar{e}_1 = (1, 3, 16)$  и  $\bar{e}_2 = (1, 15, 19)$ ; синдромы образующих:  $S(\bar{e}_1) = (\alpha^{453}, \alpha^{549})$  и  $S(\bar{e}_2) = (\alpha^{47}, \alpha^{354})$ ; можно непосредственно проверить, что  $N(S(\bar{e}_1)) = N(S(\bar{e}_2)) = \alpha^{213}$ .

4. Среди ошибок весом 4 картина сложнее. Имеется 265 пар  $\Gamma$ -орбит с одинаковыми нормами в каждой паре, имеется 70 троек  $\Gamma$ -орбит с одинаковыми нормами в каждой тройке, имеется 45 четверок  $\Gamma$ -орбит с одинаковыми нормами внутри каждой четверки. Имеется 15  $\Gamma$ -орбит с нормой 0, совпадающей с нормой  $N(S(1, 12, 23))$ . Наконец, имеется 5  $\Gamma$ -орбит с нормой 1, совпадающей с нормой  $\Gamma$ -орбиты ошибок весом 1.

5. Норму  $N = +\infty$  имеет в точности одна  $\Gamma$ -орбита – единственная неполная  $\Gamma$ -орбита, порожденная вектором-ошибкой  $\bar{e} = (1, 12, 23)$ .

6. Таким образом, 392 значения норм принимают по две и более  $\Gamma$ -орбит, оставшиеся 633 из 1025 норм принимают в точности по одной  $\Gamma$ -орбите декодируемого множества  $K / \Gamma$ .

### Заключение

Новые непримитивные коды, получаемые из примитивных БЧХ-кодов и кодов Хемминга специальными процедурами, имеют различные нечетные длины и, во многих случаях, имеют корректирующий потенциал, многократно превышающий их конструктивные возможности. Последовательное применение свойств автоморфизмов кодов и построенной на их основе теории норм синдромов обеспечивает построение эффективных перестановочных норменных методов декодирования всех допустимых минимальным расстоянием ошибок в рассматриваемых линейных кодах. Тем самым обеспечивается реальная перспектива для применения на практике многих представителей построенного класса непримитивных БЧХ-кодов.

### Список литературы

1. Мак-Вильямс Ф.Дж., Слоэн Н. Дж.А. Теория кодов, исправляющих ошибки. М.: Связь, 1979. 744 с.
2. Конопелько В.К., Липницкий В.А. Теория норм синдромов и перестановочное декодирование помехоустойчивых кодов. М: Едиториал, УРСС 2004. 176 с.
3. Липницкий В.А., Конопелько В.К. Норменное декодирование помехоустойчивых кодов и алгебраические уравнения. Минск: Издательский центр БГУ, 2007. 216 с.
4. Липницкий В.А., Аль-Хайдар Е.К. Норменное декодирование ошибок посредством их модификации // Докл. БГУИР. 2009. № 5 (43). С. 12–16.
5. Липницкий В.А. Теория норм синдромов. Минск: БГУИР, 2011. 96 с.
6. Курилович А.В., Липницкий В.А., Михайловская Л.В. Непримитивные коды Боуза-Чоудхури-Хоквингема и их основные параметры // Сб. науч. ст. «Технологии информатизации и управления». 2011. Вып. 2. С. 43–49.
7. Липницкий В.А., Олексюк А.О. Теория норм синдромов и плюс-декодирование // Докл. БГУИР. 2014. № 8 (86). С. 72–78.

8. Липницкий В.А., Олексюк А.О. Оценка минимальных расстояний непримитивных кодов Хемминга // Весці НАН Беларусі. 2015. № 2. С. 103–110.
9. Липницкий В.А., Олексюк А.О. Перестановочный декодер для коррекции многократных ошибок непримитивными БЧХ-кодами // Докл. БГУИР. 2015. № 3 (89). С. 117–123.
10. Липницкий В.А. Современная прикладная алгебра. Математические основы защиты информации от помех и несанкционированного доступа. Минск: БГУИР, 2006. 88 с.
11. Виноградов И.М. Основы теории чисел. М.: Наука, 1976. 168 с.

### References

1. Mak-Vil'jams F.Dzh., Slojen N. Dzh.A. Teorija kodov, ispravljajushhih oshibki. M.: Svjaz', 1979. 744 s. (in Russ.)
2. Konopel'ko V.K., Lipnickij V.A. Teorija norm sindromov i perestanovocnoe dekodirovanie pomehoustojchivyh kodov. M: Editorial, URSS 2004. 176 s. (in Russ.)
3. Lipnickij V.A., Konopel'ko V.K. Normennoe dekodirovanie pomehoustojchivyh kodov i algebraicheskie uravnenija. Minsk: Izdatel'skij centr BGU, 2007. 216 s. (in Russ.)
4. Lipnickij V.A., Al'-Hajdar E.K. Normennoe dekodirovanie oshibok posredstvom ih modifikacii // Dokl. BGUIR. 2009. № 5 (43). S. 12–16. (in Russ.)
5. Lipnickij V.A. Teorija norm sindromov. Minsk: BGUIR, 2011. 96 s. (in Russ.)
6. Kurilovich A.V., Lipnickij V.A., Mihajlovskaja L.V. Neprimitivnye kody Bouza-Choudhuri-Hokvingema i ih osnovnye parametry // Sb. nauch. st. «Tehnologii informatizacii i upravlenija». 2011. Vyp. 2. S. 43–49. (in Russ.)
7. Lipnickij V.A., Oleksjuk A.O. Teorija norm sindromov i pljus-dekodirovanie // Dokl. BGUIR. 2014. № 8 (86). S. 72–78. (in Russ.)
8. Lipnickij V.A., Oleksjuk A.O. Ocenka minimal'nyh rasstojanij neprimitivnyh kodov Hemminga // Vesci NAN Belarusi. 2015. № 2. S. 103–110. (in Russ.)
9. Lipnickij V.A., Oleksjuk A.O. Perestanovocnyj dekoder dlja korrekcii mnogokratnyh oshibok neprimitivnymi BChH-kodami // Dokl. BGUIR. 2015. № 3 (89). S. 117–123. (in Russ.)
10. Lipnickij V.A. Sovremennaja prikladnaja algebra. Matematicheskie osnovy zashhity informacii ot pomeh i nesankcionirovannogo dostupa. Minsk: BGUIR, 2006. 88 s. (in Russ.)
11. Vinogradov I.M. Osnovy teorii chisel. M.: Nauka, 1976. 168 s. (in Russ.)

### Сведения об авторах

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

Липницкий В.А., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой высшей математики Военной академии Республики Беларусь.

### Information about the authors

Konopelko V.K., D.Sci, professor, professor of infocommunication technologies department of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Lipnicki V.A., D.Sci, professor, head of the department of higher mathematics of Military academy of Republic of Belarus.

### Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,  
г. Минск, ул. Бровки, 6  
Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники  
тел. 375-17-293-23-86;  
e-mail: volos@bsuir.by  
Конопелько Валерий Константинович

### Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,  
Minsk, Brovki, 6,  
Belarusian state university  
of informatics and radioelectronics  
tel. 375-17-293-23-86;  
e-mail: volos@bsuir.by  
Konopelko Valerii Konstantinovich

УДК 621.391

## СЕГМЕНТАЦИЯ В ОБЪЕКТНО-ОРИЕНТИРОВАННОМ КОДИРОВАНИИ И ПЕРЕДАЧЕ МНОГОРАКУРСНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

В.Ю. ЦВЕТКОВ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь*

*Поступила в редакцию 1 марта 2019*

**Аннотация.** Показаны актуальность проблемы повышения эффективности кодирования многокурсовых изображений для передачи по радиоканалам в мобильных системах видеонаблюдения и необходимость разработки методов, алгоритмов и специализированных кодеков сжатия с приемлемой вычислительной сложностью. Определено место сегментации в объектно-ориентированном кодировании многокурсовых изображений. Предложены выражения для относительной оценки вычислительной сложности алгоритмов сегментации и объектно-ориентированного кодирования многокурсовых изображений. Показано, что применение древовидно-волновой сегментации и узловых квадратов пикселей позволяет снизить вычислительную сложность объектно-ориентированного кодирования многокурсовых изображений и соответственно уменьшить задержку их передачи в мобильных системах видеонаблюдения.

**Ключевые слова:** сегментация изображений, многокурсовые изображения, объектно-ориентированное кодирование изображений, передача многокурсовых изображений.

**Abstract.** The urgency of the problem efficiency increasing of coding of the multi-view images for transmission over radio channels in mobile video surveillance systems and the need to develop methods, algorithms and specialized compression codecs with acceptable computational complexity are shown. The segmentation place in the object-oriented coding of multi-view images is determined. Expressions for the relative evaluation of the computational complexity of segmentation algorithms and object-oriented coding of multi-view images are proposed. It is shown that tree-wave segmentation and nodal quad-grids use reduces the computational complexity of object-oriented coding of multi-view images and, accordingly, reduces the delay in their transmission in mobile video surveillance systems.

**Keywords:** image segmentation, multi-view images, object-oriented image coding, transfer of multi-view images.

**Doklady BGUIR. 2019, Vol. 121, No. 3, pp. 25-36**

**Segmentation in object-oriented encoding and multi-view images transmission**

**V.Yu. Tsviatkou**

### Введение

Развитие мобильных систем наблюдения наземного, воздушного и космического базирования ставит новые задачи в кодировании и передаче многокурсовых изображений (МРИ), формируемых одной или несколькими видеокамерами. Это связано с увеличением размеров и скорости формирования изображений (от единиц Мбит/с до сотен Тбит/с), ограничениями на пропускную способность радиоканалов (единицы Кбит/с – десятки Гбит/с) и низкой эффективностью стандартных видеокодексов (максимальный коэффициент сжатия МРИ – десятки – сотни раз, вместо необходимого для передачи коэффициента сжатия – единицы – десятки тысяч раз). Причина неэффективности кодирования МРИ на основе стандартов MPEG-4, H.264, H.265 (HEVC) [1, 2] заключается в отсутствии учета межкурсовой избыточности перекрывающихся фрагментов МРИ, обработке кадров от одной видеокамеры, прогнозировании на основе блочной и пиксельной

компенсации движения. Стандарт MVC [3] и другие подходы [4–8], описывающие принципы кодирования стерео- и 3D-изображений в условиях малой стереобазы, одинаковых масштаба и угловой ориентации перекрывающихся фрагментов МРИ, также используют прогнозирование на основе блочной и пиксельной компенсации движения. Такое прогнозирование основано на геометрическом преобразовании переноса, с помощью которого из опорного изображения формируется прогнозное изображение. Однако это осуществляется без учета поворота, масштаба, а также проективных искажений, вызываемых перемещением видеокамеры. В стандарте MPEG-4 и работах [9–12] предлагается использовать сегментную и кадровую компенсацию движения на основе аффинного преобразования. Однако преобразования переноса и аффинное не в полной мере компенсируют межракурсную избыточность перекрывающихся фрагментов МРИ для произвольных геометрий пространств их формирования и траекторий перемещения видеокамеры. Это приводит к низким коэффициентам сжатия разноркурсных фрагментов МРИ, геометрическое соответствие между которыми связано проективным преобразованием. В стандарте MPEG-4 и работах [13–15] проективное преобразование используется в объектно-ориентированном кодировании изображений на основе объектной компенсации движения, но только для синтетических видеоданных. Для проективного преобразования реальных МРИ необходима объектная декомпозиция и идентификация их разноркурсных фрагментов. Объектная компенсация движения на основе проективных преобразований отдельных элементов изображений позволяет существенно повысить коэффициент сжатия МРИ в сравнении с блочной, пиксельной и кадровой компенсацией движения, но имеет высокую вычислительную сложность. Причина данного недостатка связана с сегментацией (разделением изображений на области со схожими характеристиками распределения яркости), необходимой для объектной декомпозиции и идентификации опорных и прогнозируемых фрагментов МРИ. Результатом сегментации является матрица, значение каждого элемента которой указывает на номер сегмента, которому принадлежит соответствующий пиксель изображения, или вектор, элементы которого указывают на положение пикселей, принадлежащих одному сегменту. Можно выделить методы сегментации на основе пороговой обработки [16], обработке областей (выращивание [17], разделение и слияние областей с использованием квадродерева [18, 19]) и водораздела [20]. Сегментация имеет высокую вычислительную сложность и вносит существенный вклад в общую вычислительную сложность объектно-ориентированного кодирования и задержку передачи МРИ в мобильных системах видеонаблюдения. В этой связи на кафедре инфокоммуникационных технологий БГУИР в период с 2014 по 2018 год разрабатывались и исследовались алгоритмы сегментации изображений с низкой вычислительной сложностью, основанные на древовидном разделении и слиянии областей, древовидно-волновом выращивании областей, узловых и сплошных квадросетках пикселей.

Целью работы является оценка эффекта от снижения вычислительной сложности сегментации для объектно-ориентированного кодирования и передачи МРИ в мобильных системах видеонаблюдения.

### **Многоркурсные изображения**

МРИ представляет собой совокупность перекрывающихся фрагментов, которые формируются с помощью: а) одной движущейся видеокамеры; б) одной или нескольких циклически движущихся видеокамер; в) одновременно от нескольких видеокамер (рис. 1) [21, 22].

Увеличение числа видеокамер способствует повышению качества решения задач обнаружения, идентификации, сопровождения, определения координат объектов, построения панорам и трехмерной реконструкции, однако ведет к росту скорости формирования МРИ. Она составляет около 1 Мбит/с от 10 видеокамер при минимальном разрешении и быстро растет с увеличением их числа, пространственного, временного и спектрального разрешения, стремясь к 100 Тбит/с (рис. 2, а) [21, 22]. При этом диапазон пропускных способностей типовых радиоканалов составляет единицы Кбит/с – десятки Гбит/с, а необходимый коэффициент сжатия МРИ – единицы – десятки тысяч раз. Однако предельно допустимые коэффициенты сжатия современных видеокодеков значительно ниже. Для MPEG-4 в случае перемещения видеокамеры это 140 раз при отношении сигнал–шум 25 дБ (под шумом понимается разность исходного и восстановленного изображений).

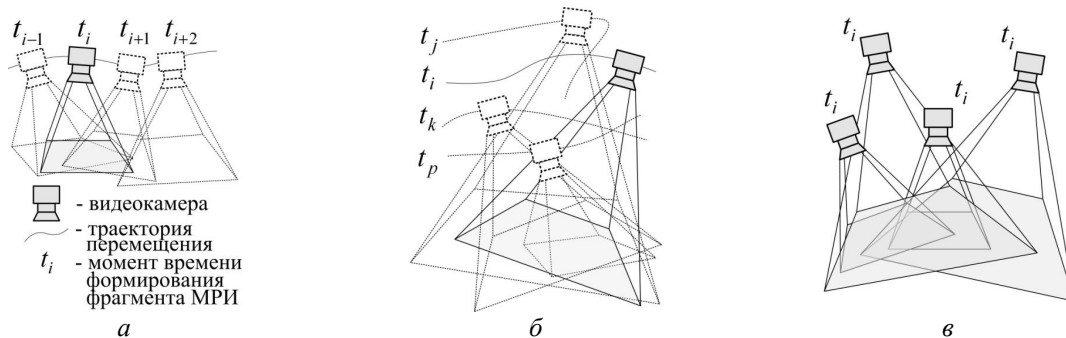


Рис. 1. Схемы формирования МРИ: *а* – формирование МРИ в различные моменты времени от одной перемещающейся видеокамеры; *б* – формирование МРИ от одной или нескольких циклически перемещающихся видеокамер; *в* – формирование МРИ в один момент времени от нескольких видеокамер

На рис. 2, *б*, *в* представлены кадр видеопоследовательности и соответствующий ему восстановленный кадр после сжатия кодеком H.264 в 200 раз с использованием блочной компенсации движения (значение PSNR составляет 25 дБ). При PSNR на уровне 20 дБ (коэффициент сжатия около 400 раз) восстановленный кадр полностью размывается. Аналогичные результаты получаются для кодека MPEG-2 при сжатии в 85 и 170 раз. Это свидетельствует об актуальности проблемы повышения эффективности кодирования МРИ, необходимости разработки методов, алгоритмов и специализированных кодеков сжатия МРИ с приемлемой вычислительной сложностью.

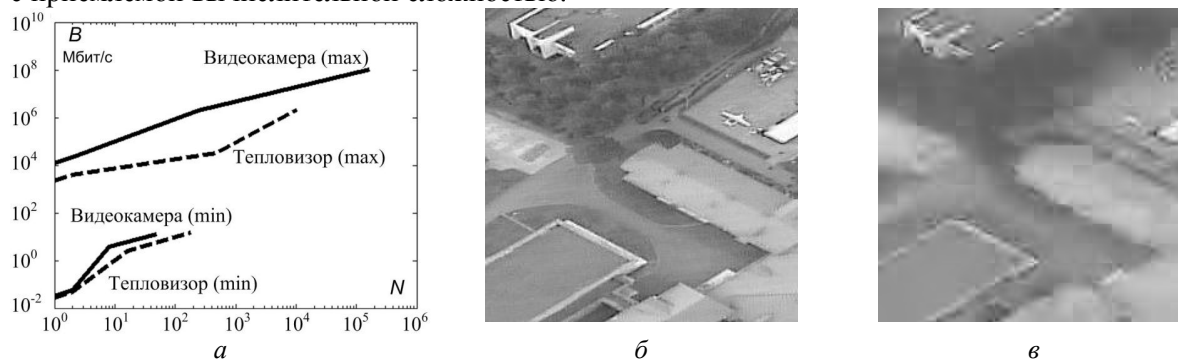


Рис. 2. Скорости формирования МРИ и сжатие изображений: *а* – зависимости минимальной (min) и максимальной (max) скоростей  $V$  (Мбит/с) формирования МРИ от числа  $N$  видеокамер (тепловизоров); *б* – исходный кадр; *в* – кадр, восстановленный после сжатия в 200 раз кодеком H.264

### Объектно-ориентированное кодирование многоракурсных изображений

Для перекрывающихся фрагментов МРИ характерна межракурсная корреляция и, соответственно, межракурсная избыточность, которая проявляется в наличии на разноракурсных фрагментах МРИ однотипных сегментов, представляющих собой проекции одних и тех же объектов. Для эффективного кодирования МРИ необходимо учитывать эту избыточность. Однако из-за параллакса, возникающего в результате смещения видеокамеры при формировании МРИ, проекции объектов на разноракурсных фрагментах имеют различия в размере, форме, цвете, ориентации и взаимном расположении. Это делает неэффективным непосредственное применение для сжатия разностного кодирования. Устранение данного недостатка возможно за счет прогнозирования по опорному фрагменту МРИ других его разноракурсных фрагментов и их совмещения.

В видеокодеках MPEG-4, H.264, HEVC/H.265, MVC опорный кадр  $I_B$  кодируется как неподвижное изображение независимо от других кадров. Остальные кадры  $I$  (прогнозируемые) заменяются прогнозными кадрами  $I_P$ , которые формируются в результате переноса опорного кадра или его блоков в режиме пиксельной (ПКД) или блочной (БКД) компенсации движения. Перенос, как и аффинное преобразование, используемое в сегментной (СКД) и кадровой (ККД) компенсации движения, не связывают разноракурсные проекции трехмерного

пространства. Расширение стандарта MPEG-4 предусматривает использование объектной компенсации движения (ОКД) на основе проективного преобразования (объектно-ориентированное кодирование) для синтетических объектов. Применение проективного преобразования к реальным МРИ требует сопоставления их опорных и прогнозируемых фрагментов на основе сегментации, объектной декомпозиции и идентификации.

В [21–24] предложен подход к решению проблемы повышения коэффициента сжатия МРИ, основанный на:

1) более точной компенсации межкадровой избыточности при использовании проективных преобразований;

2) учете геометрии пространства формирования МРИ и траектории движения видеокамеры.

Для реализации данного подхода предложено:

1) использовать идентификацию реперов для сопоставления фрагментов МРИ (вместо идентификации блоков в MPEG-4, Н.264);

2) выбирать тип преобразования и тип компенсации движения видеокамеры в зависимости от геометрии пространства формирования МРИ и траектории перемещения видеокамеры (вместо преобразования переноса, и постоянно используемой в MPEG-4, Н.264 ПКД и БКД);

3) использовать опорные фрагменты от нескольких видеокамер (вместо однокамерного режима MPEG-4, Н.264).

В результате разработаны правила выбора способов компенсации движения в зависимости от геометрии пространства формирования МРИ, траектории движения видеокамеры и ограничений на вычислительную сложность. Данные правила легли в основу адаптивных кодеков МРИ. Их отличиями от кодеков MPEG-4, Н.264 является использование комбинации методов компенсации движения с различной вычислительной сложностью, схем прогнозирования с различными способами оценки движения видеокамеры и формирования опорных изображений от одной или нескольких видеокамер. За счет согласования выбора методов компенсации движения с условиями формирования МРИ адаптивное прогнозирование на основе комбинированной компенсации движения видеокамеры обеспечивает наибольшее увеличение коэффициента сжатия МРИ по сравнению с прогнозированием на основе ПКД в 21 раз при использовании комбинированной ПКД и ОКД (при увеличении вычислительной сложности в 29 раз) (рис. 3, а) [24].

Прогнозирование МРИ с использованием ОКД является наиболее сложной операцией объектно-ориентированного кодирования. В [21, 22, 25, 26] предложен метод и разработаны алгоритмы прогнозирования МРИ с ОКД видеокамеры на основе определения расстояний до объектов. Сущность метода состоит в объектной декомпозиции опорного фрагмента МРИ, соответствующего начальному положению видеокамеры, и формировании прогнозного фрагмента МРИ, соответствующего смещенному положению видеокамеры (рис. 3, б). Для получения прогнозного фрагмента МРИ, близкого к прогнозируемому, воспроизводится параллакс, возникающий при перемещении видеокамеры, проявляющийся в различном смещении и деформации объектов опорного фрагмента МРИ с учетом их удаленности от видеокамеры и вектора ее перемещения в трехмерном пространстве. ОКД эффективна для прогнозирования фрагментов МРИ в условиях параллакса и малой динамики объектов (мобильные системы наблюдения на основе транспортных средств наземного и воздушного базирования). Из рис. 3, б следует, что базовыми операциями прогнозирования МРИ с ОКД являются объектно-ориентированная сегментация и объектная декомпозиция опорного фрагмента МРИ. В результате их выполнения формируется матрица объектной декомпозиции, содержащая информацию о количестве и расположении объектов на опорном фрагменте МРИ, которые представляются совокупностями одинаковых по яркости пикселей, выделяемых при сегментации опорного фрагмента МРИ. Пиксели, имеющие значение 1, относятся к поверхности, на которой размещаются объекты, и заднему плану.



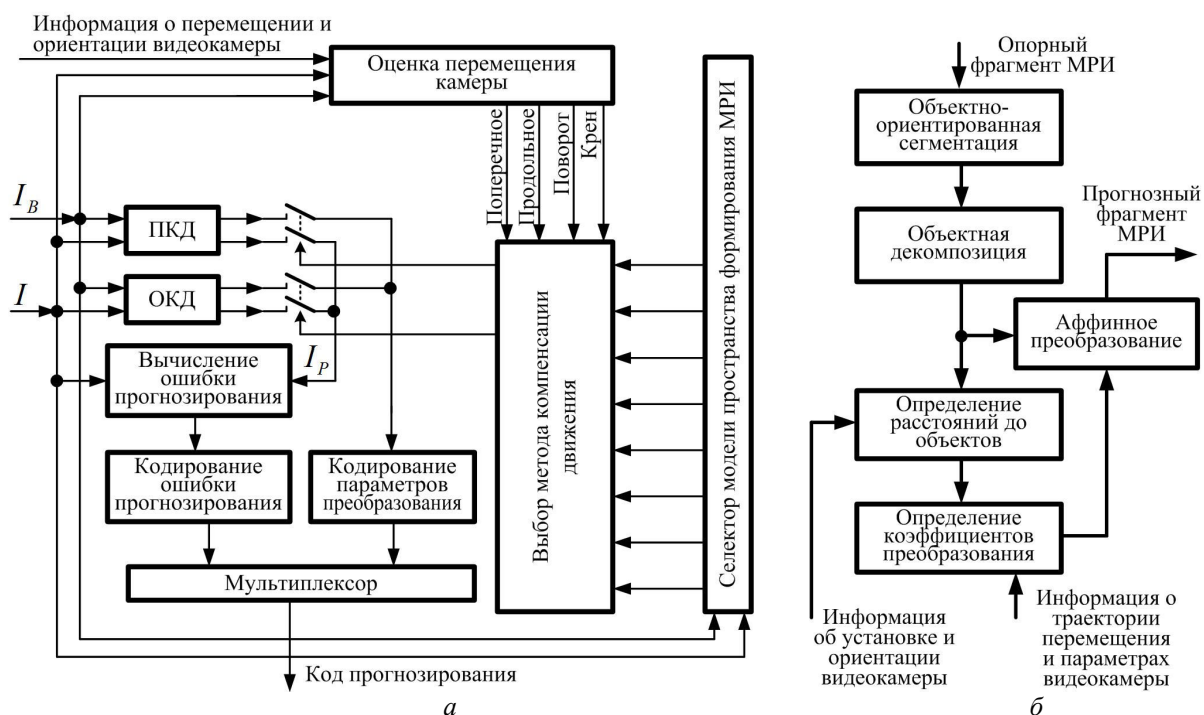


Рис. 3. Адаптивное кодирование МРИ: *а* – схема адаптивного кодера прогнозируемых фрагментов МРИ на основе комбинированной (ПКД и ОКД) компенсации движения видеокамеры; *б* – схема прогнозирования МРИ с объектной компенсацией движения видеокамеры на основе определения расстояний до объектов

### Методы сегментации изображений

Для сегментации изображений широко используются два метода, основанные на выращивании областей и разделении и слиянии областей с помощью квадродерева.

Выращивание областей предполагает построчное сканирование изображения в поиске несегментированных пикселей (1 операция на пиксель). Если такой пиксель обнаруживается, но осуществляется обработка его окрестности, включающей 8 смежных с ним пикселей, в ходе которой устанавливается соответствие между значениями центрального и смежных пикселей (8 операций на пиксель). Если такие пиксели обнаруживаются, то центральный пиксель становится точкой роста области. Смежные пиксели, удовлетворяющие условию соответствия, присоединяются к центральному пикселю и сами становятся потенциальными точками роста. Таким образом, число  $O_{RG}$  операций, необходимое для сегментации изображения размером  $YX$  на основе выращивания областей, определяется выражением

$$O_{RG} = 9YX. \quad (1)$$

Разделение и слияние областей реализуется в три этапа.

На первом этапе исходное изображение делится на кластеры размером  $2 \times 2$  пикселя, и для каждого кластера оценивается схожесть значений элементов. По результатам этой оценки определяется значение элемента кластера следующего по иерархии уровня (0 – если значения всех элементов одинаковы, 1 – если имеется хотя бы один элемент с отличающимся значением). В результате формируются логические связи между элементами кластеров, образующими древовидную структуру – квадродерево, значение каждого элемента которого указывает на однородность или неоднородность элементов соответствующего кластера нижнего уровня иерархии. Число  $O_{QT1}$  операций на данном этапе зависит только от размера изображения (значения

$Y, X$  должны быть кратны  $2^N$ ) и определяется выражением  $O_{QT1} = \sum_{l=0}^{L-1} \frac{YX}{(2 \times 2)^l} \approx 1,3YX$ ,

где  $L = \lfloor \log_2(\min(Y, X)) \rfloor$ ;  $\lfloor \cdot \rfloor$  – операция округления с недостатком.

На втором этапе в результате обработки квадродерева происходит разделение областей – назначение (нулевому элементу неоднородного кластера присваивается новый номер сегмента) и распределение (элемент однородного кластера наследует номер сегмента соответствующего нулевого элемента кластера верхнего уровня) номеров сегментов, что требует  $O_{QT2} = \sum_{l=0}^{L-1} \frac{YX}{(2 \times 2)^l} \approx 1,3YX$  операций.

На третьем этапе осуществляется слияние схожих смежных областей. Для этого определяются и корректируются избыточные номера сегментов, которые принадлежат нулевым элементам неоднородных кластеров, совпадающим по значениям с какими-либо смежными элементами однородных кластеров (5 операций на пиксель). В случае совпадения первый элемент наследует номер сегмента второго элемента. Экспериментально установлено, что число таких сегментов составляет от 1 до 10 % от общего числа элементов кластеров в зависимости от типа изображения. В таком случае число  $O_{QT3}$  операций на третьем этапе составляет  $O_{QT3} = (0,05..0,5) \sum_{l=0}^{L-1} \frac{YX}{(2 \times 2)^l} \approx (0,07..0,7)YX$ .

Общее число  $O_{QT}$  операций, необходимое для сегментации изображения размером  $YX$  на основе разделения и слияния областей, определяется с помощью выражения  $O_{QT} = O_{QT1} + O_{QT2} + O_{QT3} = (2,7..3,3)YX$ . (2)

Из выражений (1) и (2) следует, что сегментация на основе разделения и слияния областей использует в 2,7 – 3,3 раза меньшее число операций в сравнении с сегментацией на основе выращивания областей.

Несмотря на выигрыш в числе операций метод сегментации на основе разделения и слияния областей, как и метод на основе выращивания областей, не предусматривает возможность повышения скорости обработки (или сокращения объема используемой оперативной памяти) за счет увеличения ошибки сегментации. К незначительному сокращению числа операций сегментации на основе разделения и слияния областей (за счет упрощения третьего этапа сегментации) приводят квантование, низкочастотная фильтрация, сжатие с потерями, однако при этом увеличивается общее число операций. Для обоих рассматриваемых методов отсутствует возможность адаптации к ограничениям вычислительных ресурсов.

### **Адаптивная сегментация изображений на основе древовидных структур**

Для адаптации алгоритмов сегментации к ограничениям вычислительных ресурсов на кафедре инфокоммуникационных технологий БГУИР в период с 2014 по 2018 годы развивался подход, использующий: а) прерывание процесса сегментации по исчерпанию вычислительных ресурсов при условии выделения основных областей в различных частях изображения с приемлемой ошибкой определения их границ; б) уменьшение числа обрабатываемых пикселей в результате прореживания строк и столбцов изображения и выбора шага прореживания с учетом доступных вычислительных ресурсов и приемлемой ошибки сегментации. При этом разработаны алгоритмы: а) пиксельной сегментации, обеспечивающие выделение наиболее значимых сегментов в различных частях изображения и компактное представление результатов сегментации с приемлемой ошибкой в условиях ограниченных вычислительных ресурсов за счет вложенного кодирования областей и возможности прерывания процесса сегментации; б) блочной сегментации, обеспечивающие уменьшение числа обрабатываемых пикселей с учетом ограниченных вычислительных ресурсов и приемлемой ошибки сегментации за счет прореживания строк и столбцов изображения с помощью древовидных квадросеток с изменяемым размером ячеек.

Для адаптации к ограничениям на емкость памяти разработан алгоритм пиксельной сегментации изображений на основе древовидного разделения и слияния областей [27–29]. Алгоритм отличается вложенным кодированием структуры квадродерева, описывающего положения и формы сегментов, возможностью прерывания процесса кодирования и ограничением объема вложенного кода с учетом приемлемой ошибки сегментации. Алгоритм включает три этапа обработки:

- 1) древовидная кластеризация однородных по яркости областей и формирование множества кратномасштабных кластерных образов исходного изображения;
- 2) присвоение номеров кластеризованным областям на всех уровнях кратномасштабного представления исходного изображения и поиск избыточных границ однородных областей;
- 3) объединение смежных одинаковых по яркости кластеризованных областей (рис. 4).

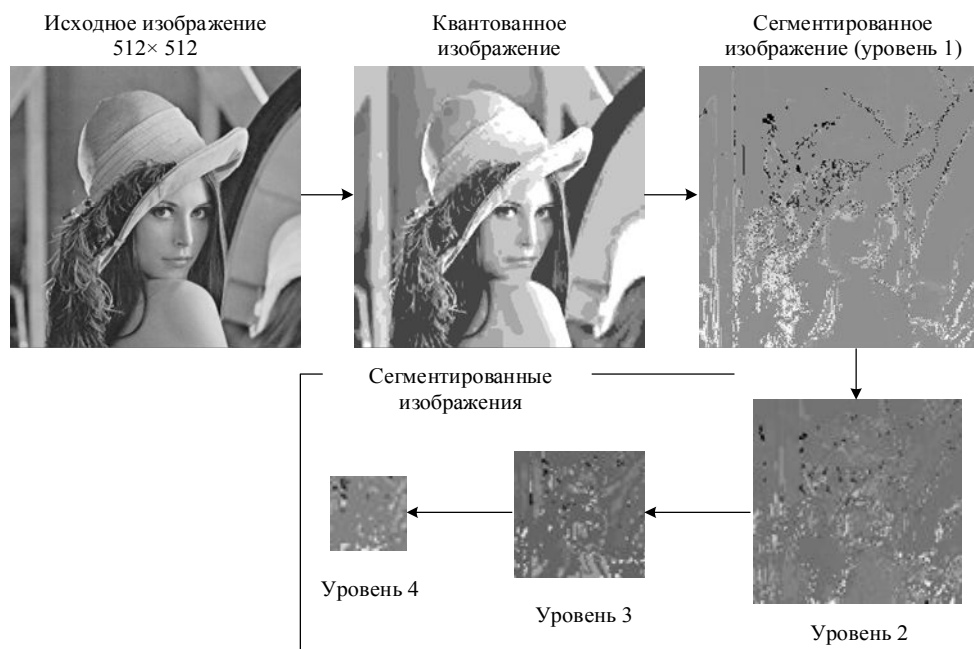


Рис. 4. Многомасштабное представление сегментированного изображения

По сравнению с алгоритмом на основе разделения и слияния областей разработанный алгоритм позволяет уменьшить объем представления результатов сегментации до 4,5 раза при величине ошибки квантования до 3 бит/пиксель. Алгоритм обеспечивает адаптацию к ограничениям емкости  $S_L$  памяти с учетом приемлемой ошибки  $E_L$  сегментации в результате проверки условия  $(S_A(l) < S_L) \vee (E_A(l) > E_L)$ , где  $S_A(l)$  – объем памяти, занимаемый переменными алгоритма на  $l$ -й итерации;  $E_A(l)$  – ошибка сегментации на  $l$ -й итерации. Невыполнение данного условия вызывает прерывание процесса сегментации и приводит к ошибке сегментации  $E_A(l)$ . Для адаптации к ограничениям на время обработки разработан алгоритм пиксельной сегментации изображений на основе древовидно-волнового выращивания областей [30]. Сущность алгоритма заключается в использовании октодеревя для поиска одинаковых равноудаленных пикселей и прерывании процесса обработки при обеспечении приемлемой ошибки сегментации (рис. 5).

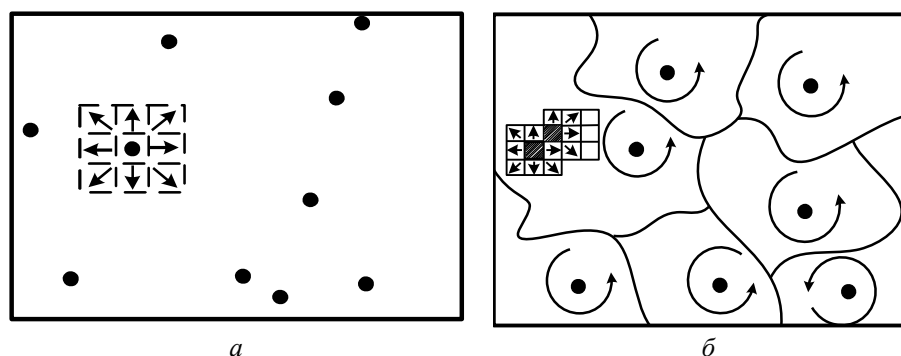


Рис. 5. Схема обработки точек роста: *a* – начальные точки; *б* – схема проверки окрестных пикселей

Древовидно-волновое выращивание областей начинается с выбора начальных точек роста. Для этого могут использоваться локальные максимумы гистограммы значений пикселей изображения. Далее в цикле размеры сегментов вокруг начальных точек постепенно увеличиваются по структуре октодеревя в результате анализа восьми окрестных пикселей для каждого граничного пикселя сегмента. Окрестный пиксель присоединяется к выращиваемой области, если абсолютное значение разности значений текущего выращиваемого пикселя и текущего окрестного пикселя не превышает заданный порог. Алгоритм обеспечивает адаптацию к ограниченному времени  $T_L$  сегментации с учетом приемлемой ошибки  $E_L$  сегментации в результате проверки условия  $(T_A < T_L) \vee (E_A > E_L)$ , где  $T_A$  – время выполнения алгоритма;  $E_A = YX - C_{SM}$  – ошибка сегментации;  $C_{SM}$  – число сегментированных пикселей. Невыполнение данного условия вызывает прерывание сегментации и приводит к ошибке  $E_A$ .

Для адаптации к ограничениям на вычислительные ресурсы за счет сокращения числа обрабатываемых пикселей разработаны алгоритмы блочной сегментации изображений на основе древовидного разделения, слияния, древовидно-волнового выращивания областей, узловых (рис. 6) и сплошных квадратов пикселей с изменяемым размером ячеек [31–33]. Они позволяют выделять области на основе анализа яркости пикселей в узлах и по периметру ячеек сетки, покрывающей изображение, и обеспечивают ускорение сегментации и адаптацию к вычислительным ресурсам за счет выбора шага сетки и возможности прерывания процесса сегментации.

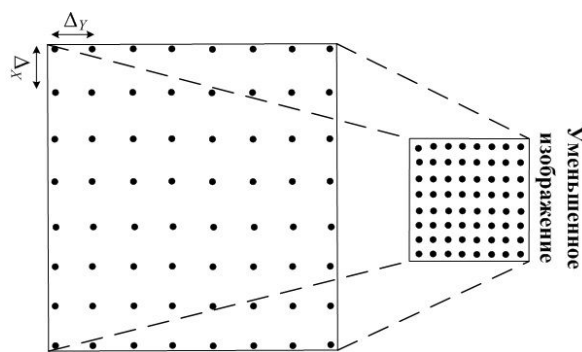


Рис. 6. Схема прореживания пикселей изображения с помощью узловой квадродетки

Для адаптации к ограничениям на емкость  $S_L$  памяти с учетом приемлемой ошибки  $E_L$  сегментации шаги  $\Delta_Y$  и  $\Delta_X$  квадродетки выбираются так, чтобы размеры  $Y = Y_F / \Delta_Y$  и  $X = X_F / \Delta_X$  прореженного изображения обеспечивали выполнение условия  $(S_N(Y, X) \leq S_L) \wedge (E_N(Y, X) \leq E_L)$ , где  $S_N(Y, X)$  – объем памяти, занимаемый переменными алгоритма;  $E_N(Y, X) = Y_F X_F - YX$  – ошибка сегментации;  $Y_F X_F$  – размер исходного изображения. Проверка условия  $(T_A < T_L) \vee (E_A > E_L)$  обеспечивает адаптацию алгоритмов к ограничениям на время  $T_L$  сегментации с учетом приемлемой ошибки  $E_L$  сегментации, где  $T_A$  – время выполнения алгоритма;  $E_A$  – ошибка сегментации. При увеличении шага квадродетки до 9 пикселей алгоритмы древовидного разделения и слияния областей и древовидно-волнового выращивания областей на основе узловых квадродеток позволяют снизить вычислительную сложность сегментации в 77 и 8 раз соответственно при увеличении ошибки сегментации в 5 и 3 раз по сравнению с алгоритмами разделения и слияния областей и выращивания областей.

### Оценка эффекта от снижения вычислительной сложности сегментации изображений для объектно-ориентированного кодирования и передачи МРИ

В [24] показано, что число операций, приходящихся на ОКД (с учетом прогнозирования), определяется с помощью выражения

$$20YX + 2N_R(Y_R \times X_R) + N_R^2 + 24N_S, \quad (3)$$

где  $Y_R \times X_R$  – размер окрестности реперной точки ( $20 \times 20$  пикселей);  $N_R$  – среднее число реперных точек (примерно  $0,0005YX$ ), выделяемых на изображении;  $N_S$  – среднее число сегментов (примерно  $(0,01..0,1)YX$ ), выделяемых на изображении. Причем на сегментацию (с помощью алгоритма выращивания областей) опорного и прогнозного фрагментов МРИ приходится примерно  $20YX$  операций (первое слагаемое выражения (3)) из общего числа  $(20 + 8 + 0,5 + (0,2..2,4))YX$  операций. Из выражения (3) следует, что при сегментации фрагментов МРИ на основе древовидно-волнового выращивания областей и узловых квадросеток пикселей с шагом 9 пикселей, позволяющих снизить вычислительную сложность в 8 раз по сравнению с сегментацией на основе выращивания областей при увеличении ошибки сегментации в 3 раза, вычислительная сложность ОКД снижается примерно в 2,5 раза. При этом вычислительная сложность ОКД становится соизмерима с вычислительной сложностью БКД.

При оценке эффекта от снижения вычислительной сложности сегментации для объектно-ориентированного кодирования в целом необходимо учесть вычислительную сложность:

а) вейвлет-преобразования ( $16YX$  операций), квантования ( $6YX$  операций), кодирования опорного фрагмента МРИ ( $23,5YX$  операций – для 8-разрядных изображений, алгоритмов кодирования SPIHT, SPECK, MEST [34, 35]);

б) ОКД ( $31YX$  операций – для сегментации на основе выращивания областей,  $13YX$  операций – для сегментации с использованием узловых квадросеток) и кодирования  $N_p$  прогнозных фрагментов МРИ ( $23,5N_pYX$  операций), что в сумме дает  $(45,5 + 54,5N_p)YX$  операций при использовании сегментации на основе выращивания областей против  $(45,5 + 36,5N_p)YX$  операций при использовании сегментации на основе древовидно-волнового выращивания областей и узловых квадросеток. Таким образом, вычислительная сложность объектно-ориентированного кодирования опорного и  $N_p = \{1,2,5\}$  прогнозных фрагментов МРИ снижается в 1,2, 1,3, 1,4 раза соответственно за счет реализации ОКД с использованием сегментации на основе древовидно-волнового выращивания областей и узловых квадросеток с шагом 9 пикселей вместо сегментации на основе выращивания областей. В соответствующее число раз может быть увеличена скорость кодирования МРИ и снижена задержка при их передаче.

### Заключение

За счет использования для объектной компенсации движения видеокамеры алгоритма сегментации на основе древовидно-волнового выращивания областей и узловых квадросеток с шагом 9 пикселей, имеющего в 8 раз меньшую вычислительную сложность по сравнению с алгоритмом выращивания областей, вычислительная сложность объектно-ориентированного кодирования многокадровых изображений, состоящих из опорного и 1–5 прогнозных фрагментов, может быть снижена в 1,2–1,4 раза при увеличении ошибки сегментации в 3 раза. Соответственно, в 1,2–1,4 раза может быть повышена скорость кодирования многокадровых изображений и снижена задержка при их передаче по радиоканалам в мобильных системах видеонаблюдения.

### Список литературы

1. Richardson I. H.264 and MPEG-4 Video Compression and Video Coding for Next-generation Multimedia. The Robert Gordon University, Aberdeen, UK, John Wiley & Sons Ltd, 2003. 281 p.
2. Sze V., Budagavi M., Sullivan G.J. High Efficiency Video Coding (HEVC): Algorithms and Architectures. Springer, 2014. 372 p.
3. Vetro A., Wiegand T., Sullivan G.J. Overview of the stereo and multiview video coding extensions of the H.264/MPEG-4 AVC standard // Proc. of IEEE. 2011. Vol. 99, № 4. P. 626–642.

4. Sethuraman S.A., Siegel M.W., Jordan A.G. multiresolution framework for stereoscopic image sequence compression // Proc. of the First IEEE International Conference on Image Processing. 1994. Vol. 2. P. 361–365.
5. Ellinas J.N., Sangriotis M.S. Stereo image compression using wavelet coefficients morphology // Image and Vision Computing. 2004. Vol. 22. P. 281–290.
6. End-to-end stereoscopic video streaming with content-adaptive rate and format control / A. Aksay [et al.] // Signal Processing: Image Communication. 2007. Vol. 22. P. 157–168.
7. Zamarin M., Forchhammer S. Lossless Compression of Stereo Disparity Maps for 3D // IEEE International conf. on Multimedia and Expo Workshops, IEEE Computer Society. Washington, DC, USA, 2012. P. 617–622.
8. Wiegand T., Steinbach E., Girod B. Affine Multipicture Motion-Compensated Prediction // IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology. February 2005. Vol. 15, № 2. P. 197–209.
9. Yokoyama Y., Miyamoto Y., Ohta M. Very low bit rate video coding using arbitrarily shaped region-based motion compensation // IEEE Trans. Circuits System Video Technology. December 1995. Vol. 5, № 12. P. 500–507.
10. Structural motion segmentation for compact image sequence representation / C.K. Cheong [et al.] // Proc. SPIE conf. Visual Communication Image Processing, Orlando, FL, Mar, 1996. Orlando, 1996. Vol. 2727. P. 1152–1163.
11. Francois E., Vial J.-F., Chupeau B. Coding algorithm with region-based motion compensation // IEEE Trans. on Circuits and Systems for Video Technology. 1997. Vol. 7, № 1. P. 97–108.
12. Fast and accurate global motion compensation / O. Deniza [et al.] // Pattern Recognition. December 2011. Vol. 44, № 12. P. 2887–2901.
13. Diehl N. Object-oriented motion estimation and segmentation in image sequences // Signal Processing: Image Communications. 1991. Vol. 3, № 1. P. 23–56.
14. Wang J.Y.A., Adelson E.H. Representing moving images with layers // IEEE Trans. Image Processing. 1994. Vol. 3, № 9. P. 625–638.
15. Coding of Audio-Visual Objects: Visual / ISO/IEC JTC1/SC29/WG11 N2202. Tokyo, March 1998. 331 p.
16. A multi-level thresholding approach based on group search optimization algorithm and Otsu/ Z.Ye [et al.] // 8<sup>th</sup> International Symposium on Computational Intelligence and Design (ISCID). Hangzhou, 2015. P. 275–278.
17. Kamdi S., Krishna R.K. Image Segmentation and Region Growing Algorithm // International Journal of Computer Technology and Electronics Engineering (IJCTEE). 2012. Vol. 2. P. 103–107.
18. Raviraj P., Lydia A., Sanavullah M.Y. An accurate image segmentation using region splitting technique // Computer Science and Telecommunications. 2011. Vol. 31. P. 12–21.
19. M'arquez, G.R., Escalante H.J., Sucar L.E. Simplified Quadtree Image Segmentation for Image Annotation // Proceedings of the 1st Automatic Image Annotation and Retrieval Workshop 2010. 2011. Vol. 1. P. 24–34.
20. Level set methods for watershed image segmentation / X. Tai [et al.] // SSVM – Springer, 2007. 178 p.
21. Цветков В.Ю., Конопелько В.К., Липницкий В.А. Предсказание, распознавание и формирование образов многокурсовых изображений с подвижных объектов. Минск: Изд. центр БГУ, 2014. 223 с.
22. Цветков В.Ю. Оценка эффективности методов сжатия для кодирования многокурсовых изображений с подвижных объектов // Докл. БГУИР. 2014. № 5 (83). С. 11–16.
23. Цветков В.Ю. Геометрические модели многокурсовых изображений и проективная компенсация движения камеры // Докл. БГУИР. 2014. № 8 (86). С. 41–47.
24. Цветков В.Ю. Геометрические модели и предсказание многокурсовых изображений на основе компенсации движения камеры // Изв. НАН Беларуси. 2015. № 4. С. 85–93.
25. Цветков В.Ю. Кодирование видеоданных в мобильных системах на основе объектной компенсации движения видеокамеры / В.Ю. Цветков // Технологии безопасности. 2012. № 1. С. 41–42.
26. Видеокодек с объектной компенсацией движения видеокамеры для сжатия видеоданных: пат. 8206 Респ. Беларусь / В.К. Конопелько, В.Ю. Цветков, Т.М. Аль-Джубури, О.Дж. Аль-Фурайджи; опубл. 30.04.2012.
27. Цветков В.Ю., Альмияхи О.М., Аль-Джубури Т.М. Прогрессивная сегментация изображений на основе реверсивной кластеризации // Материалы науч.-техн. конф. «РИНТИ-2014». Минск, 2014. С. 246–251.
28. Альмияхи О.М., Цветков В.Ю., Макейчик Е.Г. Сегментация и компактное многомасштабное представление изображений на основе прогрессивной обратной кластеризации // Докл. БГУИР. 2015. № 6 (92). С. 48–54.
29. Альмияхи О.М., Цветков В.Ю., Конопелько В.К. Прогрессивная кластерная сегментация изображений // Материалы III Междунар. науч.-практ. конф. «Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния». Минск, 28–29 апреля 2015 г. С. 137–139.
30. Альмияхи О.М., Цветков В.Ю., Конопелько В.К. Сегментация изображений на основе волнового выращивания областей // Докл. БГУИР. 2016. № 3 (97). С. 24–30.
31. Альмияхи О.М., Конопелько В.К., Цветков В.Ю. Разделение областей изображений на основе квадратов // Материалы науч.-техн. конф. «РИНТИ-2016». Минск, 2016. С. 240–244.
32. Альмияхи О.М., Цветков В.Ю., Конопелько В.К. Блочное волновое выращивание областей

- изображения на основе квадратов пикселей // Докл. БГУИР. 2016. № 8 (102). С. 82–88.
33. Альмияхи О.М., Цветков В.Ю., Касанин С.Н. Блочное разделение и слияние областей изображения на основе прогрессивной кластеризации квадратов пикселей // Веснік сувязі. 2017. № 2 (142). С. 45–49.
  34. Борискевич А.А., Цветков В.Ю. Метод масштабируемого вложенного кодирования изображений на основе иерархической кластеризации вейвлет-структур // Докл. НАН Беларуси. 2009. Т. 53, № 3. С. 38–48.
  35. Борискевич А.А., Цветков В.Ю. Метод вейвлет-преобразования с иерархической адаптацией к размеру сигнала // Изв. НАН Беларуси. 2009. № 4. С. 83–90.

## References

1. Richardson I. H.264 and MPEG-4 Video Compression and Video Coding for Next-generation Multimedia. The Robert Gordon University, Aberdeen, UK, John Wiley & Sons Ltd, 2003. 281 p.
2. Sze V., Budagavi M., Sullivan G.J. High Efficiency Video Coding (HEVC): Algorithms and Architectures. Springer, 2014. 372 p.
3. Vetro A., Wiegand T., Sullivan G.J. Overview of the stereo and multiview video coding extensions of the H.264/MPEG-4 AVC standard // Proc. of IEEE. 2011. Vol. 99, № 4. P. 626–642.
4. Sethuraman S.A., Siegel M.W., Jordan A.G. multiresolution framework for stereoscopic image sequence compression // Proc. of the First IEEE International Conference on Image Processing. 1994. Vol. 2. P. 361–365.
5. Ellinas J.N. Sangriotis M.S. Stereo image compression using wavelet coefficients morphology // Image and Vision Computing. 2004. Vol. 22. P. 281–290.
6. End-to-end stereoscopic video streaming with content-adaptive rate and format control / A. Aksay [et al.] // Signal Processing: Image Communication. 2007. Vol. 22. P. 157–168.
7. Zamarin M., Forchhammer S. Lossless Compression of Stereo Disparity Maps for 3D // IEEE International conf. on Multimedia and Expo Workshops, IEEE Computer Society. Washington, DC, USA, 2012. P. 617–622.
8. Wiegand T., Steinbach E., Girod B. Affine Multipicture Motion-Compensated Prediction // IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology. February 2005. Vol. 15, № 2. P. 197–209.
9. Yokoyama Y., Miyamoto Y., Ohta M. Very low bit rate video coding using arbitrarily shaped region-based motion compensation // IEEE Trans. Circuits System Video Technology. December 1995. Vol. 5, № 12. P. 500–507.
10. Structural motion segmentation for compact image sequence representation / C.K. Cheong [et al.] // Proc. SPIE conf. Visual Communication Image Processing, Orlando, FL, Mar, 1996. Orlando, 1996. Vol. 2727. P. 1152–1163.
11. Francois E., Vial J.-F., Chupeau B. Coding algorithm with region-based motion compensation // IEEE Trans. on Circuits and Systems for Video Technology. 1997. Vol. 7, № 1. P. 97–108.
12. Fast and accurate global motion compensation / O. Deniza [et al.] // Pattern Recognition. December 2011. Vol. 44, № 12. P. 2887–2901.
13. Diehl N. Object-oriented motion estimation and segmentation in image sequences // Signal Processing: Image Communications. 1991. Vol. 3, № 1. P. 23–56.
14. Wang J.Y.A., Adelson E.H. Representing moving images with layers // IEEE Trans. Image Processing. 1994. Vol. 3, № 9. P. 625–638.
15. Coding of Audio-Visual Objects: Visual / ISO/IEC JTC1/SC29/WG11 N2202. Tokyo, March 1998. 331 p.
16. A multi-level thresholding approach based on group search optimization algorithm and Otsu / Z.Ye [et al.] // 8<sup>th</sup> International Symposium on Computational Intelligence and Design (ISCID). Hangzhou, 2015. P. 275–278.
17. Kamdi S., Krishna R.K. Image Segmentation and Region Growing Algorithm // International Journal of Computer Technology and Electronics Engineering (IJCTEE). 2012. Vol. 2. P. 103–107.
18. Raviraj P., Lydia A., Sanavullah M.Y. An accurate image segmentation using region splitting technique // Computer Science and Telecommunications. 2011. Vol. 31. P. 12–21.
19. M'arquez, G.R., Escalante H.J., Sucar L.E. Simplified Quadtree Image Segmentation for Image Annotation // Proceedings of the 1st Automatic Image Annotation and Retrieval Workshop 2010. 2011. Vol. 1. P. 24–34.
20. Level set methods for watershed image segmentation / X. Tai [et al.] // SSVM – Springer, 2007. 178 p.
21. Cvetkov V.Ju. Konopel'ko V.K., Lipnickij V.A. Predskazanie, raspoznavanie i formirovanie obrazov mnogorakursnyh izobrazhenij s podvizhnyh ob'ektov. Minsk: Izd. centr BGU, 2014. 223 s. (in Russ.)
22. Cvetkov V.Ju. Ocenka jeffektivnosti metodov szhatija dlja kodirovanija mnogorakursnyh izobrazhenij s podvizhnyh ob'ektov // Dokl. BGUIR. 2014. № 5 (83). S. 11–16. (in Russ.)
23. Cvetkov V.Ju. Geometricheskie modeli mnogorakursnyh izobrazhenij i proektivnaja kompensacija dvizhenija kamery // Dokl. BGUIR. 2014. № 8 (86). S. 41–47. (in Russ.)

24. Cvetkov V.Ju. Geometricheskie modeli i predskazanie mnogorakursnyh izobrazhenij na osnove kompensacii dvizhenija kamery // *Izv. NAN Belarusi*. 2015. № 4. S. 85–93. (in Russ.)
25. Cvetkov V.Ju. Kodirovanie videodannyh v mobil'nyh sistemah na osnove ob'ektnoj kompensacii dvizhenija videokamery / V.Ju. Cvetkov // *Tehnologii bezopasnosti*. 2012. № 1. S. 41–42. (in Russ.)
26. Videokodek s ob'ektnoj kompensaciej dvizhenija videokamery dlja szhatija videodannyh: pat. 8206 Resp. Belarus' / V.K. Konopel'ko, V.Ju. Cvetkov, T.M. Al'-Dzhuburi, O.Dzh. Al'-Furajdzhi; opubl. 30.04.2012. (in Russ.)
27. Cvetkov V.Ju., Al'mijahi O.M., Al'-Dzhuburi T.M. Progressivnaja segmentacija izobrazhenij na osnove reversivnoj klasterizacii // *Materialy nauch.-tehn. konf. «RINTI-2014»*. Minsk OIPI NANB, 2014. S. 246–251. (in Russ.)
28. Al'mijahi O.M. Cvetkov V.Ju., Makejchik E.G. Segmentacija i kompaktnoe mnogomasshtabnoe predstavlenie izobrazhenij na osnove progressivnoj obratnoj klasterizacii // *Dokl. BGUIR*. 2015. № 6 (92). S. 48–54. (in Russ.)
29. Al'mijahi O.M., Cvetkov V.Ju., Konopel'ko V.K. Progressivnaja klasternaja segmentacija izobrazhenij // *Materialy III Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. «Prikladnye problemy optiki, informatiki, radiofiziki i fiziki kondensirovannogo sostojanija»*. Minsk, 28–29 aprelja 2015 g. S. 137–139. (in Russ.)
30. Al'mijahi O.M., Cvetkov V.Ju., Konopel'ko V.K. Segmentacija izobrazhenij na osnove volnovoغو vyrashhivanija oblastej // *Dokl. BGUIR*. 2016. № 3 (97). S. 24–30. (in Russ.)
31. Al'mijahi O.M., Konopel'ko V.K., Cvetkov V.Ju. Razdelenie oblastej izobrazhenij na osnove kvadrosetok // *Materialy nauch.-tehn. konf. «RINTI-2016»*. Minsk, 2016. S. 240–244. (in Russ.)
32. Al'mijahi O.M., Cvetkov V.Ju., Konopel'ko V.K. Blochnoe volnovoغو vyrashhivanie oblastej izobrazhenija na osnove kvadrosetok pikselej // *Dokl. BGUIR*. 2016. № 8 (102). S. 82–88. (in Russ.)
33. Al'mijahi O.M., Cvetkov V.Ju., Kasanin S.N. Blochnoe razdelenie i slijanie oblastej izobrazhenija na osnove progressivnoj klasterizacii kvadrosetok pikselej // *Vesnik suvjazi*. 2017. № 2 (142). S. 45–49. (in Russ.)
34. Boriskevich A.A., Cvetkov V.Ju. Metod masshtabiruemogo vlozhennoغو kodirovanija izobrazhenij na osnove ierarhicheskogo klasterizacii vejjvlet-struktur // *Dokl. NAN Belarusi*. 2009. T. 53, № 3. S. 38–48. (in Russ.)
35. Boriskevich A.A., Cvetkov V.Ju. Metod vejjvlet-preobrazovanija s ierarhicheskogo adaptaciej k razmeru signala // *Izv. NAN Belarusi*. 2009. № 4. S. 83–90. (in Russ.)

#### **Сведения об авторе**

Цветков В.Ю. д.т.н., доцент, заведующий кафедрой инфокоммуникационных технологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

#### **Information about the author**

Tsviatkou V.Yu., D.Sci, associate professor, head of infocommunication technologies department of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

#### **Адрес для корреспонденции**

220013, Республика Беларусь,  
г. Минск, ул. П. Бровки, 6,  
Белорусский государственный  
университет информатики и радиоэлектроники  
тел. +375-17-293-84-08;  
e-mail: vtsvet@bsuir.by  
Цветков Виктор Юрьевич

#### **Address for correspondence**

220013, Republic of Belarus,  
Minsk, P. Brovka st., 6,  
Belarusian State University of  
Informatics and Radioelectronics  
tel. +375-17-293-84-08;  
e-mail: vtsvet@bsuir.by  
Tsviatkou Viktor Yur'evich



УДК 621.389

## ПЕРСПЕКТИВЫ ЗОЛЬ-ГЕЛЬ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ НАНОФОТОНИКИ И МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

Н.В. ГАПОНЕНКО

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь*

*Поступила в редакцию 23 марта 2019*

**Аннотация.** Обобщены результаты синтеза и исследования пленочных структур, полученных золь-гель методом в БГУИР. Обсуждаются закономерности синтеза и оптические свойства легированных лантаноидами ксерогелей в матрицах с макро- и мезопористым кремнием, пористым анодным оксидом алюминия и синтетическими опалами. Обсуждаются возможности применения пленок ксерогелей для структур нанопластики и микроэлектроники на основе результатов кандидатских диссертаций, защищенных при выполнении проектов НИЛ 4.5 «Нанопластика» БГУИР.

*Ключевые слова:* золь-гель, нанопластика, микроэлектроника, люминесценция.

**Abstract.** The results of synthesis and investigation of the film structures, prepared with the sol-gel method in BSUIR, are summarized. The peculiarities of synthesis and optical properties xerogels doped with lanthanides in matrices with macro- and mesoporous silicon, porous anodic alumina and synthetic opals are discussed. The possibilities of application the xerogel films for the structures of nanophotonics and microelectronics on the basis of results of PhD theses, defended within the projects of laboratory 4.5 «Nanophotonics» at BSUIR are discussed.

*Keywords:* sol-gel, nanophotonics, microelectronics, luminescence.

**Doklady BGUIR. 2019, Vol. 121, No. 3, pp. 37-41**

**Sol-gel technology prospects for nanophotonics and microelectronics**

**N.V. Gaponenko**

Многие материалы и пленочные структуры могут быть получены золь-гель методом. Золь – дисперсия коллоидных частиц размером от 1 до 100 нм в жидкости [1]. Золь состоит из прекурсора, растворителя и других компонентов, например, кислоты и воды. Гель – продукт поликонденсации золя. Пленка геля может быть получена нанесением золя методом центрифугирования или погружения. При термообработке гель превращается в твердотельный материал – ксерогель. Если в золь ввести компоненты нужных химических элементов, эти элементы будут входить в состав ксерогеля. Золь-гель методом формируются источники диффузии акцепторных и донорных примесей в кремний и полупроводниковые соединения  $A^3B^5$  [2]. Диффузионное легирование происходит при высоких температурах, после чего пленка может быть удалена. Метод погружения привлекателен для формирования покрытий на изделиях большой площади, например, окнах, так как для этого не требуется вакуумная камера и контроль атмосферы, а нанесение золя, как и при центрифугировании, может осуществляться на воздухе. Для получения одинаковых пленок в течение длительного времени важно, чтобы золь сохранял стабильность, не изменяя вязкости.

Золь-гель метод привлекателен для экспериментатора своей гибкостью. Этим методом формируют многослойные покрытия, отличающиеся показателем преломления за счет выбора прекурсора. Например, пленка оксида кремния с показателем преломления 1,45 формируется из золя на основе тетраэтоксисилана, пленка оксида титана с показателем преломления более двух – из золя на основе тетраэтоксититана. С увеличением температуры термообработки пленки ксерогелей переходят из аморфной фазы в кристаллическую, и их показатель

преломления увеличивается (оксид титана, титанат стронция, титанат бария и др.), или сохраняются рентгеноаморфными (оксид кремния). Введение в состав золя растворимых компонентов лантаноидов обеспечивает их присутствие в ксерогеле с контролируемым соотношением катионов [3–6]. Трехвалентные лантаноиды, как и при ионной имплантации в полупроводники и диэлектрики, демонстрируют люминесценцию лантаноидов, обеспеченную переходами между термами 4f-электронов. Концентрации лантаноидов одного или нескольких типов в ксерогеле задаются на стадии приготовления золя. Таким образом, золь-гель метод дает возможность изучать ион-ионное взаимодействие примесей (кросс-релаксацию, апконверсию) в пленках и порошках, избегая изготовления мишеней сложного состава, как для магнетронного распыления, не требуя ускорителей и вакуума, как при ионной имплантации [7]. Температура синтеза твердотельных композитов золь-гель методом, как правило, не превышает 1000 °С.

Используя различные методы диагностики, нами было показано, что золи проникают вглубь матриц с порами порядка 50 нм – пористый кремний, пористый анодный оксид алюминия и синтетические опалы, что дает возможность формировать структуры ксерогель/пористая матрица толщиной несколько десятков микрон [3–6]. Проникновение в каналы мезопор пористого анодного оксида алюминия ксерогеля, легированного эрбием или тербием, контролировалось методом масс-спектрометрии вторичных ионов и просвечивающей электронной микроскопией. На глубине до 30 мкм от поверхности образца наблюдался ксерогель [8–11]. Интенсивность люминесценции тербия в структуре ксерогель/пористый анодный оксид алюминия и ксерогель/пористый кремний выше, чем после ионной имплантации [12, 13]. Наиболее интенсивная люминесценция лантаноидов в ксерогелях в пористом анодном оксиде алюминия наблюдается вдоль каналов пор, что связано с перераспределением плотности фотонных состояний матрицей ПАОА, о чем свидетельствует вытягивание вдоль каналов пор индикатрис люминесценции и рассеяния [14]. Энергия излучения фокусируется в узком телесном угле, что перспективно для дисплейных технологий и преобразователей излучения.

Золь-гель синтез материалов, легированных лантаноидами, в порах синтетических опалов обеспечивает формирование твердотельных структур – трехмерных фотонных кристаллов, для которых характеристики люминесценции интенсивно исследуются в условиях подавления спонтанного испускания [15, 16]. Одномерные фотонные кристаллы – пленочные структуры, для которых показатель преломления изменяется в одном направлении, также формируются золь-гель методом с возможностью легирования лантаноидами определенных слоев структуры, например, полуволновой слой микрорезонатора. Примеры таких структур представлены на рис. 1. [17].

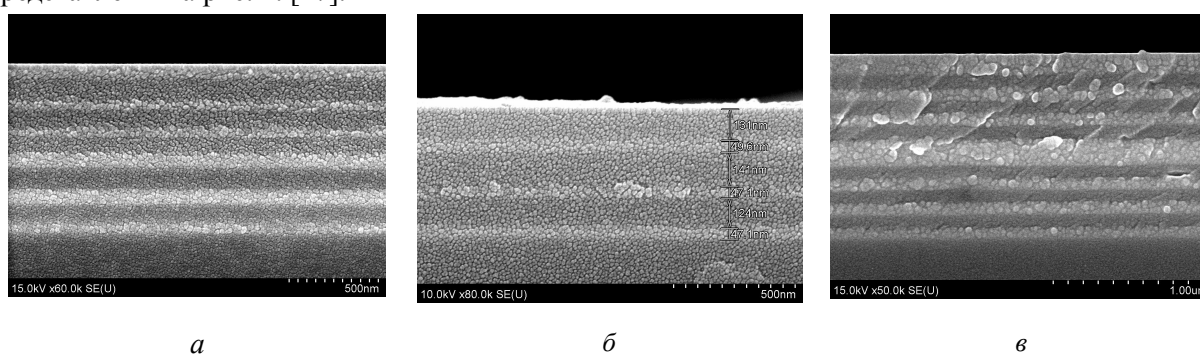


Рис. 1. РЭМ-изображения структур: *a* – полученных погружением; *б, в* – полученных центрифугированием из пленок ксерогелей BaTiO<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub> с изменяющимся показателем преломления в направлении вдоль нормали к поверхности

Структуры рентгеноаморфны и имеют полосу непрозрачности (фотонную запрещенную зону) в области 600–700 нм, которая смещается в коротковолновую область с увеличением температуры обработки и в длинноволновую область с увеличением толщины слоев BaTiO<sub>3</sub> и SiO<sub>2</sub> – рис. 2.

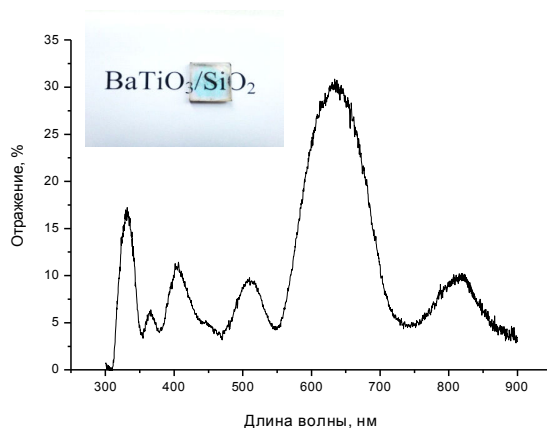


Рис. 2. Спектр отражения одномерного фотонного кристалла  $\text{BaTiO}_3/\text{SiO}_2$  и внешний вид образца

Введение в золи трехвалентных лантаноидов обеспечивает фильтрам дополнительную функцию – люминесценцию в широком оптическом диапазоне, что показано в работах аспирантов и магистрантов БГУИР П.А. Холова и Ю.Д. Корниловой.

С использованием золь-гель синтеза титаната стронция сформированы структуры  $\text{Si}/\text{TiO}_x/\text{Pt}/\text{SrTiO}_3/\text{Ni}$ , для которых наблюдаются два состояния с сопротивлением, отличающимся на три порядка величины для диапазона частот от 10 кГц до 2 МГц. При этом с увеличением толщины пленки от 250 до 430 нм величина сопротивления изменяется от 2 до 9 Ом для низкоомного состояния и от 40 до 750 кОм для высокоомного состояния для частоты 10 кГц. Обнаруженные резистивные свойства пленок титаната стронция перспективны для мемристорных элементов [18, 19]. Конденсаторные структуры, изготовленные на основе многослойных пленок титаната стронция толщиной 250–430 нм, сформированных золь-гель методом на кремнии с нижним электродом из платины и верхним электродом из никеля, характеризуются диэлектрической проницаемостью 150–190 и тангенсом угла диэлектрических потерь 0,06–0,1 соответственно для частоты 1 МГц. Характеристики конденсаторов, полученных золь-гель методом, сравнимы со структурами на титанате стронция, синтезированными магнетронным распылением [20]. Работы в области микроэлектроники ведутся в тесном сотрудничестве с ОАО «Интеграл» – управляющей компанией холдинга «Интеграл». Планируется исследование электрофизических свойств структур сегнетоэлектриков, разделенных тонкими пленками диэлектриков.

Развитие золь-гель технологии в НИЛ 4.5 БГУИР отражают также показатели подготовки кадров высшей квалификации. За последние 4 года под руководством Н.В. Гапоненко защищены 3 кандидатские диссертации: А.М. Ашариф [21], Х. Сохраби Анараки [22], Л.С. Хорошко [23]; ранее защищены кандидатские диссертации О.В. Сергеевым (2001 г.), И.С. Молчаном (2003 г.), Т.В. Ким (2010 г.).

Продолжается международное сотрудничество. Выполнены международные проекты – ИНТАС, МНТЦ. Продвижение технологии интерференционных фильтров золь-гель методом достигнуто благодаря выполнению белорусско-индийского проекта ГКНТ «Золь-гель покрытия для преобразования энергии и применения в фотонике и микроэлектронике» с Международным центром передовых исследований в области порошковой металлургии и новых материалов (ARCI) г. Хайдарабад (Индия), завершившегося в 2018 г. Развивается сотрудничество с Национальным исследовательским ядерным университетом «МИФИ», г. Москва и университетом г. Сиань, КНР по синтезу перовскитов для структур микро- и оптоэлектроники. В рамках белорусско-российского проекта молодых ученых с Санкт-Петербургским государственным электротехническим университетом «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) (проект № Т17РМ-122 «Фотоэлектрические эффекты в тонкопленочных перовскитоподобных оксидных системах» при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований и Российского фонда фундаментальных исследований) разработана методика формирования пористых пленок титаната стронция, научный руководитель н.с. НИЛ 4.5 М.В. Руденко. Работы, выполненные в НИЛ 4.5, хорошо цитируются: по данным базы Scopus, индекс Хирша лаборатории 21.

## Список литературы

1. Hench L.L., West J.K. The sol-gel process // *Chem. Rev.* 1990. Vol. 90. P. 33–72.
2. Борисенко В.Е. Твердофазные процессы в полупроводниках при импульсном нагреве. Минск: Наука і тэхніка, 1992. 248 с.
3. Гапоненко Н.В. Пленки, сформированные золь-гель методом на полупроводниках и в мезопористых матрицах. Минск: Бел. наука, 2003. 136 с.
4. Gaponenko N.V. Sol-gel derived films in mesoporous matrices: porous silicon, anodic alumina and artificial opals // *Synthetic Metals*. 2001. Vol. 124, No. 1. P. 15–2130.
5. Gaponenko N.V. Synthesis and optical properties of sol-gel films in mesoporous matrices // *J. Appl. Spectroscopy*. 2002. Vol. 69, No. 1. P. 1–17.
6. Gaponenko N.V. Luminescence of lanthanides from xerogels embedded in mesoporous matrices // *Acta Physica Polonica*. 2007. Vol.112. P. 737 – 749.
7. Lyuminescentsiya erbiya v poroshkah (Y, Er, Yb)<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub> / L.S. Horoshko [et al.] // *Opticheskiy zhurnal*. 2019. Vol. 86, No. 2. P. 74–78.
8. Erbium luminescence in porous silicon doped from spin-on films / A.M. Dorofeev [et al.] // *J. Appl. Phys.* 1995. Vol. 77, No. 6. P. 2679–2683.
9. Enhancement of green terbium-related photoluminescence from highly doped microporous alumina xerogels in mesoporous anodic alumina / N.V. Gaponenko [et al.] // *J. Electrochem. Soc.* 2002. Vol. 149, No. 2. P. H49–H52.
10. Erbium and terbium photoluminescence in silica sol-gel films on porous alumina / N.V. Gaponenko [et al.] // *Thin Solid Films*. 1997. Vol. 297, No. 1–2. P. 202–206.
11. Inhomogeneous nanostructured honeycomb optical media for enhanced cathodo- and under-x-ray luminescence / N.V. Gaponenko [et al.] // *J. of Applied Physics*. 2012. Vol. 111. P. 103101–103107.
12. Infrared photoluminescence from erbium-doped porous silicon / W. Henley [et al.] // *J. Appl. Phys.* 2000. Vol. 87, No. 11. P. 7848–7852.
13. Comparison of terbium photoluminescence from ion implanted and so-gel-derived films / J.C. Pivin [et al.] // *J. Alloys Comp.* 2002. Vol. 341. P. 272–274.
14. Anisotropic light scattering in nanoporous materials: a photon density of states effect / N.V. Gaponenko [et al.] // *Nano Lett.* 2004. Vol. 4, No. 9. P. 1755–1758.
15. Photonic stop band in a three-dimensional SiO<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub> lattice / N.V. Gaponenko [et al.] // *Phys. Stat. Sol. A*. 1998. Vol. 165. P. 119–122.
16. Modification of erbium photoluminescence excitation spectra for the emission wavelength 1.54 μm in mesoscopic structures / N.V. Gaponenko [et al.] // *J. of Luminescence*. 2006. Vol. 121. P. 217–221.
17. Optical properties of multilayer BaTiO<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub> film structures formed by the sol–gel method / N.V. Gaponenko [et al.] // *Physics of the Solid State*. 2019. Vol. 61, No. 3. P. 397–401.
18. Low-resistance and high-resistance states in strontium titanate films formed by the sol-gel method / H. Sohrabi Anaraki [et al.] // *Physics of the Solid State*. 2015. Vol. 57, No. 10. P. 2030–2033.
19. Room-temperature tunable Properties of strontium titanate nanostructured films / H. Sohrabi Anaraki [et al.] // *Physics, Chemistry and Application of Nanostructures : proceedings of the Intern. conf. «Nanomeeting-2015»*. Minsk, 26–29 May 2015. P. 362–364.
20. Конденсаторные структуры на основе пленок титаната стронция, сформированных золь-гель методом и магнетронным распылением / П.А. Холов [и др.] // *Материалы 9-й Междунар. науч.-практ. конф. по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ-электроники «Мокеровские чтения–2018»*. Москва, 23 мая 2018 г. С. 136–137.
21. Ашариф А.М. Пленочные структуры из нанопористого анодного оксида алюминия, содержащие диоксид титана и алюмоиттриевые перовскиты, синтезированные из растворных композиций: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Минск, 2015.
22. Сохраби А.Х. Золь-гель синтез пленок титана стронция для использования в конденсаторах и мемристорах в кремниевой электронике: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Минск, 2016.
23. Хорошко Л.С. Синтез и люминесцентные свойства наноструктурированных алюмоиттриевых композитов, легированных тербием: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Минск, 2018.

## References

1. Hench L.L., West J.K. The sol-gel process // *Chem. Rev.* 1990. Vol. 90. P. 33–72.
2. Borisenko V.E. Tverdogfaznye processy v poluprovodnikah pri impul'snom nagreve. Minsk: Navuka i tjehnika, 1992. 248 s. (in Russ.)
3. Gaponenko N.V. Plenki, sformirovannye zol'-gel' metodom na poluprovodnikah i v mezoporistykh matricah. Minsk: Bel. nauka, 2003. 136 s. (in Russ.)
4. Gaponenko N.V. Sol-gel derived films in mesoporous matrices: porous silicon, anodic alumina and artificial opals // *Synthetic Metals*. 2001. Vol. 124, No. 1. P. 15–2130.

5. Gaponenko N.V. Synthesis and optical properties of sol-gel films in mesoporous matrices // *J. Appl. Spectroscopy*. 2002. Vol. 69, No. 1. P. 1–17.
6. Gaponenko N.V. Luminescence of lanthanides from xerogels embedded in mesoporous matrices // *Acta Physica Polonica*. 2007. Vol.112. P. 737 – 749.
7. Lyuminescentsiya erbiya v poroshkah (Y, Er, Yb)<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub> / L.S. Horoshko [et al.] // *Opticheskiy zhurnal*. 2019. Vol. 86, No. 2. P. 74–78.
8. Erbium luminescence in porous silicon doped from spin-on films / A.M. Dorofeev [et al.] // *J. Appl. Phys.* 1995. Vol. 77, No. 6. P. 2679–2683.
9. Enhancement of green terbium-related photoluminescence from highly doped microporous alumina xerogels in mesoporous anodic alumina / N.V. Gaponenko [et al.] // *J. Electrochem. Soc.* 2002. Vol. 149, No. 2. P. H49–H52.
10. Erbium and terbium photoluminescence in silica sol-gel films on porous alumina / N.V. Gaponenko [et al.] // *Thin Solid Films*. 1997. Vol. 297, No. 1–2. P. 202–206.
11. Inhomogeneous nanostructured honeycomb optical media for enhanced cathodo- and under-x-ray luminescence / N.V. Gaponenko [et al.] // *J. of Applied Physics*. 2012. Vol. 111. P. 103101–103107.
12. Infrared photoluminescence from erbium-doped porous silicon / W. Henley [et al.] // *J. Appl. Phys.* 2000. Vol. 87, No. 11. P. 7848–7852.
13. Comparison of terbium photoluminescence from ion implanted and so-gel-derived films / J.C. Pivin [et al.] // *J. Alloys Comp.* 2002. Vol. 341. P. 272–274.
14. Anisotropic light scattering in nanoporous materials: a photon density of states effect / N.V. Gaponenko [et al.] // *Nano Lett.* 2004. Vol. 4, No. 9. P. 1755–1758.
15. Photonic stop band in a three-dimensional SiO<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub> lattice / N.V. Gaponenko [et al.] // *Phys. Stat. Sol. A*. 1998. Vol. 165. P. 119–122.
16. Modification of erbium photoluminescence excitation spectra for the emission wavelength 1.54 μm in mesoscopic structures / N.V. Gaponenko [et al.] // *J. of Luminescence*. 2006. Vol. 121. P. 217–221.
17. Optical properties of multilayer BaTiO<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub> film structures formed by the sol-gel method / N.V. Gaponenko [et al.] // *Physics of the Solid State*. 2019. Vol. 61, No. 3. P. 397–401.
18. Low-resistance and high-resistance states in strontium titanate films formed by the sol-gel method / H. Sohrabi Anaraki [et al.] // *Physics of the Solid State*. 2015. Vol. 57, No. 10. P. 2030–2033.
19. Room-temperature tunable Properties of strontium titanate nanostructured films / H. Sohrabi Anaraki [et al.] // *Physics, Chemistry and Application of Nanostructures : proceedings of the Intern. conf. «Nanomeeting-2015»*. Minsk, 26–29 May 2015. P. 362–364.
20. Kondensatornye struktury na osnove plenok titanata stroncija, sformirovannyh zol'-gel' metodom I magnetronnym raspyleniem / P.A. Holov [i dr.] // *Materialy 9-j Mezhdunar. nauchn.-prakt. konf. po fizike i tehnologii nanoeterostrukturoj SVCh-jelektroniki «Mokrovskie chteniya-2018»*. Moskva, 23 maja 2018 g. S. 136–137. (in Russ.)
21. Asharif A.M. Plenochnye struktury iz nanoporistogo anodnogo oksida aljuminija, sodержashhie dioksid titana i aljumoitrievye perovskity, sintezirovannye iz rastvornyh kompozicij: avtoref. dis. ... kand. tehn. nauk. Minsk, 2015. (in Russ.)
22. Sohrabi A.H. Zol'-gel' sintez plenok titana stroncija dlja ispol'zovaniya v kondensatorah i memristorah v kremnievoj jelektronike: avtoref. dis. ... kand. fiz.-mat. nauk. Minsk, 2016. (in Russ.)
23. Horoshko L.S. Sintez i ljuminescentnye svojstva nanostrukturirovannyh aljumoitrievyh kompozitov, legirovannyh terbiem: avtoref. dis. ... kand. fiz.-mat. nauk. Minsk, 2018. (in Russ.)

#### Сведения об авторах

Гапоненко Н.В. д.ф.-м.н., профессор, заведующий НИЛ 4.5 НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

#### Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,  
г. Минск, ул. П. Бровки 6  
Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники  
тел. +375-17-293-88-75;  
nik@nano.bsuir.edu.by  
Гапоненко Николай Васильевич

#### Information about the author

Gaponenko N.V. D.Sci, professor, head of SRL 4.5 R&D department a Belorussian state university of informatics and radioelectronics.

#### Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,  
Minsk, P. Brovka st., 6  
Belarusian state university  
of informatics and radioelectronics  
tel. +375-17-293-88-75;  
nik@nano.bsuir.edu.by  
Gaponenko Nikolay Vasilyevich

УДК 004.89

## СЕМАНТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ И СЕМАНТИЧЕСКИЕ АССОЦИАТИВНЫЕ КОМПЬЮТЕРЫ

В.В. ГОЛЕНКОВ, Н.А. ГУЛЯКИНА, И.Т. ДАВЫДЕНКО, Д.В. ШУНКЕВИЧ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь*

*Поступила в редакцию 11 февраля 2019*

**Аннотация.** В статье проведен анализ проблемы обеспечения совместимости компьютерных систем, рассмотрены основные принципы, лежащие в основе технологии OSTIS, одной из задач которой является решение данной проблемы. Отдельное внимание уделено принципам построения семантических ассоциативных компьютеров, являющихся аппаратной реализацией интерпретатора логико-семантических моделей компьютерных систем, разрабатываемых по технологии OSTIS.

*Ключевые слова:* технология OSTIS, семантический ассоциативный компьютер, SC-код.

**Abstract.** The analysis of the problem of ensuring compatibility of computer systems was carried out. The basic principles underlying the OSTIS technology, one of the tasks of which is the solution of this problem was discussed. Special attention is paid to the principles of semantic associative computers construction, which are the hardware basis for the interpretation of systems developed on the basis of this technology.

*Keywords:* OSTIS technology, semantic associative computer, SC-code.

**Doklady BGUIR. 2019, Vol. 121, No. 3, pp. 42-50**

**Semantic technologies of intelligent systems design and semantic associative computers**

**V.V. Golenkov, N.A. Gulyakina, I.T. Davydenko, D.V. Shunkevich**

### Введение

Основная научная деятельность кафедры интеллектуальных информационных технологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники связана с развитием проекта, направленного на создание и развитие технологии OSTIS – открытой семантической технологии компонентного проектирования гибридных и совместимых интеллектуальных систем. За последние 5 лет на кафедре получены результаты в направлениях, посвященных:

- решению проблемы интеграции знаний на основе однородных семантических сетей [1];
- разработке технологии проектирования семантических моделей гибридных баз знаний [2];
- разработке технологии проектирования совместимых решателей задач интеллектуальных систем [3].

Ключевой особенностью реализуемого проекта является его открытый характер, позволяющий любому желающему стать участником проекта и внести вклад в развитие технологии. Кафедра активно работает над расширением контингента участников проекта, которые бы способствовали как развитию технологии, так и ее внедрению в реальные прикладные проекты. Кафедра ведет ряд совместных научных работ как с другими кафедрами БГУИР, так и кафедрами других вузов, а также предприятиями Республики Беларусь. В частности, прогресс достигнут в направлениях:

- автоматизации предприятий рецептурного производства совместно с представителями ОАО «Савушкин продукт» [4];
- интеграции искусственных нейронных сетей с базами знаний [5];
- семантического анализа естественно-языковых текстов [6];
- семантического анализа речевых сообщений [7].

Основное внимание в рамках текущего этапа развития проекта OSTIS направлено на решение проблемы совместимости результатов научных исследований в области искусственного интеллекта. Эта проблема в настоящее время является ключевой, препятствующей активному развитию искусственного интеллекта.

В данной работе будет обоснована актуальность проблемы совместимости компьютерных систем, рассмотрены основные принципы, лежащие в основе предлагаемой технологии OSTIS и позволяющие решить указанную проблему. Отдельное внимание в работе уделено описанию принципов построения семантического ассоциативного компьютера, который является аппаратной платформой интерпретации семантических моделей компьютерных систем, проектируемых средствами технологии OSTIS.

### **Состояние и проблемы традиционных информационных технологий**

К недостаткам современных информационных технологий можно отнести:

- многообразие синтаксических форм представления одной и той же информации, т. е. многообразие семантически эквивалентных форм представления обрабатываемой информации в памяти компьютерных систем. Отсутствие унификации представления различного вида знаний в памяти современных компьютерных систем приводит:

- к многообразию семантически эквивалентных моделей решения задач (как процедурных, так и не процедурных), т. е. к дублированию моделей обработки информации, отличающихся не сутью способов решения задач, а формой представления обрабатываемой информации и формой представления способов решения различных классов задач;

- к дублированию семантически эквивалентных информационных компонентов компьютерных систем;

- к многообразию форм технической реализации каждой используемой модели решения задач;

- к семантической несовместимости компьютерных систем и, следовательно, к высокой трудоемкости их интеграции в системы более высокого уровня иерархии, требующей дополнительных усилий на трансляцию (конвертирование) информации, которой обмениваются разные интегрируемые системы, и, следовательно, существенно ограничивающей эффективность совместного решения задач коллективом взаимодействующих компьютерных систем;

- к существенному снижению эффективности применения методики компонентного проектирования компьютерных систем на основе библиотек многократно используемых компонентов (особенно, если речь идет о «крупных» компонентах, в частности, о типовых подсистемах) [8];

- недостаточно высокую степень обучаемости современных компьютерных систем в ходе их эксплуатации, следствием чего является высокая трудоемкость их сопровождения и совершенствования, а также недостаточно длительный их жизненный цикл;

- отсутствие возможности у экспертов реально влиять на качество разрабатываемых компьютерных систем. Опыт разработки сложных компьютерных систем показывает, что посредничество программистов между экспертами и проектируемыми компьютерными системами существенно искажает вклад экспертов. При разработке компьютерных систем следующего поколения доминировать должны не программисты, а эксперты, способные точно излагать свои знания;

- отсутствие семантической (смысловой) унификации интерфейсной деятельности пользователей компьютерных систем, что вместе с многообразием форм реализации пользовательских интерфейсов приводит к серьезным накладным расходам на усвоение пользовательских интерфейсов новых компьютерных систем;

– документация компьютерной системы не является важным компонентом самой компьютерной системы, определяющим качество функционирования этой системы, следствием чего является недостаточно высокая эффективность эксплуатации компьютерной системы из-за неполного и неэффективного использования возможностей эксплуатируемой компьютерной системы.

Преодолеть указанные недостатки можно только путем фундаментального переосмысления архитектуры и принципов организации сложных компьютерных систем. Основой такого переосмысления является устранение многообразия форм представления информации в памяти компьютерных систем, а результатом должен стать новый этап развития информационных технологий. Таким образом, преодоление недостатков современных компьютерных систем предполагает:

- унификацию представления обрабатываемой информации;
- функциональную унификацию (унификацию принципов обработки информации).

### **Проблемы развития технологий искусственного интеллекта**

Текущее состояние технологий искусственного интеллекта можно охарактеризовать следующим образом.

Есть большой набор частных технологий искусственного интеллекта с соответствующими инструментальными средствами, но отсутствует общая теория интеллектуальных систем и, как следствие, отсутствует общая комплексная технология проектирования интеллектуальных систем (см. конференции «Artificial General Intelligence» [9]).

Совместимость частных технологий искусственного интеллекта практически не осуществляется и, более того, отсутствует осознание такой необходимости.

Для решения указанных выше проблем развития технологии искусственного интеллекта:

– продолжая разрабатывать новые формальные модели решения интеллектуальных задач и совершенствовать существующие модели (логические, нейросетевые, продукционные и т. д.), необходимо обеспечить совместимость этих моделей как между собой, так и с традиционными моделями решения задач, не попавших в число интеллектуальных задач; другими словами, речь идет о разработке принципов организации гибридных интеллектуальных систем, обеспечивающих решение комплексных задач; предполагается, что решение каждой такой задачи требует совместного использования самых различных видов знаний и самых различных моделей решения задач, при этом используемые модели решения задач могут комбинироваться произвольным образом;

– необходим переход от эклектичного построения сложных интеллектуальных систем, использующих различные виды знаний и различные виды моделей решения задач, к глубокой их интеграции, когда одинаковые модели представления и модели обработки знаний реализуются в разных системах и подсистемах одинаково;

– необходимо сократить дистанцию между современным уровнем теории интеллектуальных систем и практики их разработки;

– необходимо существенно повысить уровень согласованности действий лиц, участвующих в процессе постоянного совершенствования баз знаний;

– необходимо, чтобы в решении проблемы совместимости интеллектуальных систем активно участвовали сами системы, а не только их разработчики; Системы должны сами заботиться о поддержке своей совместимости с другими системами в условиях активного изменения этих систем с помощью механизма автоматизированного согласования используемых понятий между интеллектуальными системами.

### **Принципы открытой семантической технологии проектирования интеллектуальных систем**

Предлагаемое авторами решение проблем современных информационных технологий (в частности, технологий искусственного интеллекта) путем перехода к смысловому



представлению информации в памяти компьютерных систем [10] фактически преобразует современные компьютерные системы (в том числе и современные интеллектуальные системы) в семантические компьютерные системы, которые являются не альтернативной ветвью развития компьютерных систем, а естественным этапом их эволюции, направленным на обеспечение высокого уровня их обучаемости и, в первую очередь, совместимости.

Архитектура семантических компьютерных систем практически совпадает с архитектурой интеллектуальных систем, основанных на знаниях. Отличия здесь заключаются в том, что в семантических компьютерных системах:

- база знаний имеет смысловое представление;
- интерпретатор знаний и навыков представляет собой коллектив агентов, осуществляющих обработку базы знаний и управляемых ситуациями и событиями в этой базе знаний.

Как следствие этого, семантические компьютерные системы обладают высоким уровнем обучаемости, т. е. способностью быстро приобретать новые и совершенствовать уже приобретенные знания и навыки и при этом не иметь никаких ограничений на вид приобретаемых и совершенствуемых ими знаний и навыков, а также на их совместное использование. Кроме того, предлагаемый подход к разработке семантических компьютерных систем практически исключает дублирование инженерных решений и дает возможность существенно ускорить разработку семантических компьютерных систем с помощью постоянно расширяемой библиотеки многократно используемых и совместимых между собой компонентов.

Очевидно, что семантические компьютерные системы являются компьютерными системами нового поколения, устраняющими многие недостатки современных компьютерных систем. Но для массовой разработки таких систем необходима соответствующая технология, которая должна включать в себя:

- теорию семантических компьютерных систем и комплекс всех стандартов, обеспечивающих совместимость разрабатываемых систем;
- методы и средства проектирования семантических компьютерных систем;
- методы и средства постоянного совершенствования самой технологии.

Предлагаемая авторами технология разработки семантических компьютерных систем названа технологией OSTIS (Open Semantic Technology for Intelligent Systems) [10].

В основе этой технологии лежит SC-код – разработанный авторами стандарт смыслового представления информации в памяти компьютерных систем.

В целом технология OSTIS – это:

- стандарт семантических компьютерных систем, обеспечивающий семантическую совместимость систем, соответствующих этому стандарту;
- методы построения таких компьютерных систем и их совершенствования в процессе эксплуатации;
- средства построения и совершенствования этих систем, включая языковые средства, библиотеки типовых технических решений, а также инструментальные средства (средства синтеза и модификации; средства анализа, верификации, диагностики, тестирования; средства устранения обнаруженных ошибок и недостатков).

Следует подчеркнуть, что технология OSTIS – это не просто стандарт семантических компьютерных систем, а стандарт, который постоянно и интенсивно совершенствуется в ходе постоянного расширения и совершенствования формализации используемых видов знаний и моделей решения задач путем достижения консенсуса (согласования точек зрения) с участием всех заинтересованных лиц.

Принципиальным является то, что технология OSTIS позволяет создавать системы, которые вовсе не обязательно должны решать интеллектуальные задачи, но такая реализация компьютерных систем обеспечивает:

- их совместимость;
- высокую степень их гибкости, что позволяет неограниченным образом расширять функциональные возможности компьютерных систем вплоть до возможности решать интеллектуальные задачи.

В основе технологии OSTIS лежат следующие принципы:

– ориентация на смысловое однозначное представление знаний в виде семантических сетей, имеющих базовую теоретико-множественную интерпретацию, что обеспечивает решение проблемы многообразия форм представления одного и того же смысла, и проблемы неоднозначности семантической интерпретации информационных конструкций;

– использование ассоциативной графодинамической модели памяти;

– применение агентно-ориентированной модели обработки знаний;

– реализация технологии OSTIS в виде интеллектуальной Метасистемы IMS.ostis [11], которая сама построена по технологии OSTIS и осуществляет поддержку проектирования компьютерных систем, разрабатываемых по технологии OSTIS;

– обеспечение в проектируемых системах высокого уровня гибкости, стратифицированности, рефлексивности, гибридности, совместимости и, как следствие, обучаемости.

Перспективными направлениями применения технологии OSTIS являются:

– разработка на базе технологии OSTIS частной технологии проектирования интеллектуальных справочных систем, интеллектуальных семантических учебников, обучающих систем и интеллектуальных help-систем в различных областях;

– интеллектуальные персональные ассистенты (секретари, референты), осуществляющие персонифицированное информационное обслуживание, интеграцию доступных сервисов, мониторинг и контроль деятельности пользователей, включая системы комплексного индивидуального медицинского мониторинга и обслуживания;

– интеллектуальные системы управления различными предприятиями, организациями;

– интеллектуальные системы автоматизации проектирования различных классов искусственных систем на основе онтологических моделей;

– порталы научных знаний и семантические средства поддержки развития различных научно-технических направлений;

– интеллектуальные системы экскурсионного обслуживания;

– интеллектуальные робототехнические системы;

– умная среда жизнедеятельности (умный дом, умная дорога, умный город).

### **Принципы построения семантического ассоциативного компьютера**

Одной из важнейших особенностей систем, построенных на основе технологии OSTIS (ostis-систем), является их платформенная независимость, которая достигается путем четкого разделения унифицированной логико-семантической модели такой системы (sc-модели компьютерной системы) и универсального интерпретатора sc-моделей компьютерных систем.

Реализация универсального интерпретатора sc-моделей компьютерных систем может иметь большое число вариантов – как программно, так и аппаратно реализованных. Логическая архитектура универсального интерпретатора sc-моделей компьютерных систем обеспечивает независимость проектируемых компьютерных систем от многообразия вариантов реализации интерпретатора их моделей и включает в себя:

– смысловую графовую ассоциативную память (sc-память, хранилище знаковых конструкций, представленных в SC-коде);

– интерпретатор языка SCP (Semantic Code Programming) – базового процедурного языка программирования, ориентированного на обработку текстов SC-кода, хранимых в смысловой графовой ассоциативной памяти.

Принципы, лежащие в основе одного из вариантов программной реализации универсального интерпретатора sc-моделей компьютерных систем рассмотрены в работе [12]. Программная реализация интерпретатора может рассматриваться как специализированная графовая СУБД, обеспечивающая хранение текстов SC-кода и их обработку посредством интерпретации программ языка SCP. К достоинствам программной реализации интерпретатора можно отнести следующие:

– возможность заимствования опыта разработки современных систем такого рода, в частности, принципов представления и обработки графовых конструкций в памяти традиционных компьютерных систем, соответствующих структур данных, механизмов организации параллельной обработки;

– возможность заимствования в готовом виде некоторых компонентов, не имеющих непосредственного отношения к решаемым системой задачам, например, модуля авторизации пользователей, некоторых компонентов пользовательского интерфейса и т. д. Однако использование таких компонентов автоматически делает соответствующие *ostis*-системы зависимыми от конкретной реализации интерпретатора *sc*-моделей компьютерных систем;

– возможность участия в разработке интерпретатора специалистов по разработке традиционных программных систем.

Таким образом, программная реализация универсального интерпретатора *sc*-моделей компьютерных систем имеет ряд преимуществ, особенно актуальных на начальном этапе развития и внедрения технологии *OSTIS*. Однако такой вариант реализации имеет серьезный недостаток, связанный со сравнительно низкой производительностью систем, построенных на его основе. Одним из вариантов повышения производительности интерпретатора *sc*-моделей компьютерных систем является аппаратная реализация такого интерпретатора в виде специализированного компьютера, построенного на основе фон-неймановской архитектуры, т. е. фактически аппаратная реализация описанной ранее программной модели с сохранением традиционных принципов хранения и обработки информации. Такой вариант реализации будет обладать существенно более высокой производительностью по сравнению с программной моделью, однако реализация семантических моделей представления и обработки информации на основе традиционной фон-неймановской архитектуры все еще будет обладать значительно более низкой производительностью по сравнению с реализацией интерпретатора в виде семантического ассоциативного компьютера. Данный факт обусловлен следующими особенностями фон-неймановской логической организации вычислительных систем:

– последовательная обработка, ограничивающая эффективность компьютеров физическими возможностями элементной базы;

– низкий уровень доступа к памяти, т. е. сложность и громоздкость выполнения процедуры ассоциативного поиска нужного фрагмента знаний. Ускорить процесс доступа можно путем создания специализированной ассоциативной памяти, обеспечивающей ассоциативный доступ к произвольным фрагментам хранимых знаний (имеющим произвольные размеры и структуру). Кроме того, актуальной становится задача реализации обеспечения параллелизма при выполнении поисковых операций;

– линейная организация памяти и очень простой вид элементарных объектов, непосредственно хранимых в памяти. Это приводит к затруднениям при построении интеллектуальных систем, обусловленных тем, что, во-первых, приходится оперировать не самими структурами, а их громоздкими линейными представлениями (списками, матрицами смежности, матрицами инцидентности и т. д.), во-вторых, линейаризация сложных структур разрушает локальность их преобразований, так как локальному преобразованию сложной структуры далеко не всегда соответствует локальное преобразование ее линейного представления. Следует при этом отметить, что процесс переработки сложных информационных структур (знаний) носит в основном именно локальный характер;

– представление информации в памяти современных компьютеров практически не апеллирует к семантике представляемой информации, что сильно затрудняет переработку знаний за счет необходимости учета большого количества деталей, касающихся способа представления информации в памяти, а не ее смысла;

– в современных компьютерах имеет место весьма низкий уровень аппаратно реализуемых операций над нечисловыми данными и полностью отсутствует аппаратная поддержка логических операций над фрагментами знаний. Как следствие, в современных компьютерах громоздко реализуются даже простейшие процедуры логического вывода.

Таким образом, полноценное развитие технологии проектирования семантических компьютерных систем требует перехода к компьютерам, имеющим архитектуру, отличную от фон-неймановской. Такого рода реализация универсального интерпретатора семантических моделей компьютерных систем представляет собой семантический ассоциативный компьютер, то есть компьютер с нелинейной структурно перестраиваемой (графодинамической) ассоциативной памятью, переработка информации в которой сводится не к изменению состояния элементов памяти, а к изменению конфигурации связей между ними.

В основе семантического ассоциативного компьютера лежат следующие основные принципы:

- нелинейная память – каждый элементарный фрагмент хранимого в памяти текста может быть инцидентен неограниченному числу других элементарных фрагментов этого текста;

- структурно перестраиваемая (реконфигурируемая) память – процесс отработки хранимой в памяти информации сводится не только к изменению состояния элементов, но и к реконфигурации связей между ними;

- в качестве внутреннего способа кодирования знаний, хранимых в памяти семантического ассоциативного компьютера, используется универсальный способ нелинейного (графоподобного) смыслового представления знаний (SC-код);

- обработка информации осуществляется коллективом агентов, работающих над общей памятью. Каждый из них реагирует на соответствующую ему ситуацию или событие в памяти (компьютер, управляемый хранимыми знаниями);

- есть программно реализуемые агенты, поведение которых описывается хранимыми в памяти агентно-ориентированными программами, которые интерпретируются соответствующими коллективами агентов;

- есть базовые агенты, которые не могут быть реализованы программно (в частности, это агенты интерпретации агентных программ, базовые рецепторные агенты-датчики, базовые эффекторные агенты);

- все агенты работают над общей памятью одновременно. Более того, если для какого-либо агента в некоторый момент времени в различных частях памяти возникает сразу несколько условий его применения, разные акты указанного агента в разных частях памяти могут выполняться одновременно (акт агента – это неделимый, целостный процесс деятельности агента);

- для того чтобы акты агентов, параллельно выполняемые в общей памяти, не «мешали» друг другу, для каждого акта в памяти фиксируется и постоянно актуализируется его текущее состояние. То есть каждый акт сообщает всем остальным о своих намерениях и пожеланиях, которым остальные агенты не должны препятствовать (например, это различного рода блокировки используемых элементов семантической памяти);

- процессор и память семантического ассоциативного компьютера глубоко интегрированы и составляют единую процессоро-память. Процессор семантического ассоциативного компьютера равномерно «распределен» по его памяти так, что процессорные элементы одновременно являются и элементами памяти компьютера. Обработка информации в семантическом ассоциативном компьютере сводится к реконфигурации каналов связи между процессорными элементами, следовательно, память такого компьютера есть не что иное, как коммутатор (!) указанных каналов связи. Таким образом, текущее состояние конфигурации этих каналов связи и есть текущее состояние обрабатываемой информации.

Язык SCP представляет собой графовый процедурный язык программирования низкого уровня, предназначенный для описания поведения агентов, работающих над семантической памятью и обладающий следующими основными особенностями:

- язык SCP ориентирован на обработку текстов SC-кода;

- программы языка SCP (scp-программы) также представляются в виде текстов SC-кода;

- язык SCP ориентирован на параллельную асинхронную обработку информации, хранимой в семантической памяти. При этом рассматривается параллельность как на уровне процессов, соответствующих разным scp-программам, так и на уровне подпрограмм, вызываемых в рамках некоторой программы, а также на уровне операторов в рамках одной программы;

- язык SCP использует ассоциативный доступ к фрагментам обрабатываемых текстов SC-кода.

Важно отметить, что, с одной стороны, каждая sc-модель компьютерной системы может совершенствоваться независимо от реализации универсального интерпретатора sc-моделей, с другой – каждая sc-модель компьютерной системы может легко переноситься с одного варианта реализации интерпретатора на другой, в том числе с программной на аппаратную.

Это означает, что различные варианты аппаратной реализации интерпретатора могут быть использованы для интерпретации разработанных ранее sc-моделей компьютерных систем, при этом различные варианты аппаратной реализации могут лучше или хуже подходить для решения задач конкретных классов.

### Заключение

В работе рассмотрены основные недостатки современных компьютерных систем, предложены подходы к их устранению, реализуемые в виде открытой семантической технологии проектирования интеллектуальных систем, а также рассмотрены принципы построения семантического ассоциативного компьютера как перспективного варианта аппаратной реализации универсального интерпретатора унифицированных логико-семантических моделей интеллектуальных систем.

### Список литературы

1. Ивашенко В.П. Модели и алгоритмы интеграции знаний на основе однородных семантических сетей : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Минск, 2014. 25 с.
2. Давыденко И.Т. Модели, методика и средства разработки гибридных баз знаний на основе семантической совместности многократно используемых компонентов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Минск, 2018. 25 с.
3. Шункевич Д.В. Агентно-ориентированные решатели задач интеллектуальных систем: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Минск, 2018. 25 с.
4. Design of batch manufacturing enterprises in the context of Industry 4.0 / V. Taberko [et al.] // Open semantic technologies for intelligent systems. 2018. № 2. P. 307–320.
5. Integration of artificial neural networks and knowledge bases / V. Golovko [et al.] // Open semantic technologies for intelligent systems. 2018. № 2. P. 119–132.
6. Knowledge acquisition based on natural language texts / N. Hubarevich [et al.] // Open semantic technologies for intelligent systems. 2018. № 2. P. 199–206.
7. Zahariev V., Azarov E., Rusetski K. An approach to speech ambiguities eliminating using semantically-acoustical analysis // Open semantic technologies for intelligent systems. 2018. № 2. P. 211–222.
8. Борисов А.Н. Построение интеллектуальных систем, основанных на знаниях, с повторным использованием компонентов // Материалы IV Междунар. техн. конф. «Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем (OSTIS-2014)». Минск, 20–22 февраля 2014 г. С. 97–102.
9. Artificial General Intelligence [Electronic resource]. URL: <http://agi-conf.org/> (date of access: 22.05.2018).
10. Голенков В.В., Гулякина Н.А. Проект открытой семантической технологии компонентного проектирования интеллектуальных систем. Ч. 1: Принципы создания // Онтология проектирования. 2014. № 1. С. 42–64.
11. Метасистема IMS.ostis [Электронный ресурс]. URL: <http://ims.ostis.net> (дата обращения: 10.09.2018).
12. Корончик Д.Н. Реализация хранилища унифицированных семантических сетей // Материалы III Междунар. науч.-техн. конф. «Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем (OSTIS-2013)». Минск, 21–23 февраля 2013 г. С. 125–129.

### References

1. Ivashenko V.P. Modeli i algoritmy integracii znanij na osnove odnorodnyh semanticheskikh setej : avtoref. dis. ... kand. tehn. nauk. Minsk, 2014. 25 s. (in Russ.)
2. Davydenko I.T. Modeli, metodika i sredstva razrabotki gibridnyh baz znanij na osnove semanticheskoy sovmestimosti mnogokratno ispol'zuemyh komponentov: avtoref. dis. ... kand. tehn. nauk. Minsk, 2018. 25 s. (in Russ.)
3. Shunkevich D.V. Agentno-orientirovannye reshateli zadach intellektual'nyh sistem: avtoref. dis. ... kand. tehn. nauk. Minsk, 2018. 25 s. (in Russ.)
4. Design of batch manufacturing enterprises in the context of Industry 4.0 / V. Taberko [et al.] // Open semantic technologies for intelligent systems. 2018. № 2. P. 307–320.
5. Integration of artificial neural networks and knowledge bases / V. Golovko [et al.] // Open semantic technologies for intelligent systems. 2018. № 2. P. 119–132.
6. Knowledge acquisition based on natural language texts / N. Hubarevich [et al.] // Open semantic technologies for intelligent systems. 2018. № 2. P. 199–206.

7. Zahariev V., Azarov E., Rusetski K. An approach to speech ambiguities eliminating using semantically-acoustical analysis // Open semantic technologies for intelligent systems. 2018. № 2. P. 211–222.
8. Borisov A.N. Postroenie intellektual'nyh sistem, osnovannyh na znaniyah, s povtornym ispol'zovaniem komponentov // Materialy IV Mezhdunar. tehn. konf. «Otkrytye semanticheskie tehnologii proektirovanija intellektual'nyh sistem (OSTIS-2014)». Minsk, 20–22 fevralja 2014 g. S. 97–102. (in Russ.)
9. Artificial General Intelligence [Electronic resource]. URL: <http://agi-conf.org/> (date of access: 22.05.2018).
10. Golenkov V.V., Guljakina N.A. Proekt otkrytoj semanticheskoy tehnologii komponentnogo proektirovanija intellektual'nyh sistem. Ch. 1: Principy sozdaniya // Ontologija proektirovanija. 2014. № 1. S. 42–64. (in Russ.)
11. Metasistema IMS.ostis [Electronic resource]. URL: <http://ims.ostis.net> (date of access: 10.09.2018).
12. Koronchik D.N. Realizacija hranilishha unificirovannyh semanticheskikh setej // Materialy III Mezhdunar. nauch.-tehn. konf. «Otkrytye semanticheskie tehnologii proektirovanija intellektual'nyh sistem (OSTIS-2013)». Minsk, 21–23 fevralja 2013 g. S. 125–129.

#### **Сведения об авторах**

Голенков В.В., д.т.н, профессор, заведующий кафедрой интеллектуальных информационных технологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Гулякина Н.А., к.ф.-м.н, доцент, доцент кафедры интеллектуальных информационных технологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Давыденко И.Т., к.т.н, доцент кафедры интеллектуальных информационных технологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Шункевич Д.В., к.т.н, доцент кафедры интеллектуальных информационных технологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

#### **Information about the authors**

Golenkov V.V., D.Sci, professor, head of the department of intelligent information technologies of Belarusian State university of informatics and radioelectronics.

Gulyakina N.A., PhD, associate professor, associate professor of the department of intelligent information technologies of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Davydenko I.T., PhD, associate professor of the department of intelligent information technologies of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Shunkevich D.V., PhD, associate professor of the department of intelligent information technologies, Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

#### **Адрес для корреспонденции**

220013, Республика Беларусь,  
г. Минск, ул. П. Бровки, 6  
Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники  
тел. +375-17-293-23-24;  
e-mail: [golen@bsuir.by](mailto:golen@bsuir.by)  
Голенков Владимир Васильевич

#### **Address for correspondence**

220013, Republic of Belarus,  
Minsk, P. Brovka st., 6  
Belarusian state university  
of informatics and radioelectronics  
tel. +375-17-293-23-24;  
e-mail: [golen@bsuir.by](mailto:golen@bsuir.by)  
Golenkov Uladzimir Vasil'evich

УДК 004.056

## МАРШРУТИЗАЦИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ ПОТОКОВ ПРИ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫХ ТРЕБОВАНИЯХ

Н.И. ЛИСТОПАД

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь*

*Поступила в редакцию 4 марта 2019*

**Аннотация.** Проведен анализ основных методов маршрутизации информационных потоков в сетях телекоммуникаций на основе многокритериальных требований по задержке, вариации задержки, вероятности потерь и полосы пропускания с учетом минимизации стоимости передаваемой информации. Рассмотрена возможность оптимальной маршрутизации путем введения единого комплексного весового коэффициента. Описаны основные направления дальнейшего развития QoS-маршрутизации.

*Ключевые слова:* маршрутизация информационных потоков, обеспечение заданного качества обслуживания, единый комплексный весовой коэффициент, сеть телекоммуникаций.

**Abstract.** The analysis of the main methods of routing information flows in telecommunication networks was carried out. It based on multicriteria requirements for delay, delay variation, loss probability and bandwidth taking into account the cost minimization of information transmitted. The possibility of optimal routing is considered by introducing a single complex weighting factor. The main directions for further development of QoS routing are described.

*Keywords:* information flow routing, ensuring of a given quality of service, single complex weighting factor, telecommunication network.

**Doklady BGUIR. 2019, Vol. 121, No 3, p. 51-56**  
**Routing of information flows with multicriterial requirements**  
**N.I. Listopad**

### Введение

Для качественного обслуживания у провайдеров телекоммуникационных услуг должно быть соответствующее ресурсное обеспечение (маршрутизаторы, каналы связи и другое оборудование), технические характеристики которого удовлетворяли бы всем требованиям данных услуг. В то же время разные виды приложений, реализующие ту или иную услугу, предъявляют разные требования к техническим характеристикам сетей телекоммуникаций. Например, при отправке электронной почты или передаче файлов критичным являются пропускная способность каналов и вероятность потерь информации, в то время как для IP-телефонии наивысшим приоритетом является минимальное время задержки для обработки IP-пакетов. На разных участках сети телекоммуникаций может быть разное оборудование со своим набором характеристик. Для некоторых служб не все сетевые устройства могут соответствовать требованиям, предъявляемым к ним.

### Текущее состояние и требования к протоколам маршрутизации информационных потоков в сетях телекоммуникаций

Маршрутизация информационных потоков традиционно рассматривалась как оптимизационная задача для определения кратчайшего пути. При этом поиск оптимального пути, как правило, обеспечивается на основании учета большого количества различных параметров, таких как количество интеллектуальных узлов, в которых производится обработка

информационных потоков, значения задержки, вариации задержки, величина потерь пакетов. Важной проблемой при выборе того или иного оптимального маршрута является величина задержки, поскольку требования минимизации данного фактора являются актуальными и достаточно жесткими для многих мультимедийных приложений.

Программно-технические средства поддержки заданного качества обслуживания в современных сетях телекоммуникаций в настоящее время достаточно сильно изменились главным образом за счет пересмотра метрик и параметров, которые используются при выборе оптимального маршрута. Здесь просматриваются две основные тенденции.

1. Все больше и больше среди специалистов начинает доминировать мнение, что необходимо практически полностью отказаться от топологических метрик – числа интеллектуальных узлов – и перейти к так называемым QoS-метрикам, основанным на учете основных показателей (параметров) заданного качества обслуживания: скорости передачи, полосы занимаемых частот, средних величин задержек, вариации задержек, уровня потерь информации, доступности предлагаемых сервисов.

2. Развитие протоколов маршрутизации все больше и больше происходит в направлении так называемых композитных метрик, которые объединяют в себя одновременно несколько QoS-параметров [2].

В работе [1] решается задача поиска оптимальных маршрутов для мультисервисных телекоммуникационных сетей. Особенностью данных сетей является то, что при выборе оптимального маршрута кроме полосы пропускания должны приниматься во внимание такие параметры качества обслуживания, как вероятность потерь пакетов, величина задержки пакетов, вариация времени задержки. Таким образом, авторам статьи [1] удалось сформулировать задачу поиска оптимального пути как многокритериальную задачу выбора маршрута на подмножестве осуществимых путей, удовлетворяющих ограничениям на параметры качества обслуживания и требованиям минимальной стоимости. Как результат такого подхода предложена модификация алгоритма Дейкстры, которая позволила реализовать многокритериальный поиск оптимального маршрута с учетом ограничений на каждый вышеназванный критерий в отдельности, а также для частного случая, когда стоимость маршрута может быть представлена в виде неадитивной функции.

Анализ разработок отдельных специалистов в области маршрутизации показывает, что существующие на сегодняшний день протоколы построены главным образом на поиске оптимального пути по одной, пусть даже композитной метрике. При этом значения других метрик или не учитываются, или же учитываются не полной мере. Речь идет о том, что если по композитной метрике мы получаем некий оптимальный маршрут, то при этом другие метрики, составляющие композицию, могут быть далеки от своих оптимальных значений [1, 3, 4].

Еще одной важной проблемой, связанной с реализацией действующих протоколов маршрутизации, является не всегда эффективное использование сетевых ресурсов [3, 5]. В основу большинства существующих протоколов маршрутизации положены графовые модели, результатом работы которых является, как правило, один и тот же кратчайший путь, соответствующий выбранной метрике. Практика применения алгоритмов маршрутизации свидетельствует, что выбор кратчайшего пути между отправителем и получателем приводит к тому, что такой путь является единственным. При этом другие свободные пути никак не задействуются, а выбранный оптимальный путь может оказаться перегруженным при наличии свободных маршрутов [4]. Одним из возможных решений в данной ситуации является мультипутевая маршрутизация с балансировкой нагрузки между путями равной и близкой стоимости [5].

При использовании QoS-маршрутизации заслуживают внимания следующие подходы:

– необходимо следовать концепции централизованного вычисления путей в рамках маршрутизации от источника – концепция сервера маршрутов (Route Server, RS);

– необходимо обеспечить предвычисление путей до начала передачи трафика.

Маршрутизация является одним из наиболее действенных и эффективных механизмов для обеспечения заданного качества обслуживания, однако на практике в рамках существующих методов маршрутизации и протоколов на их основе сами функции обеспечения заданного качества обслуживания не всегда остаются реализованными в полной мере. Особенно эти вопросы будут актуальными при переходе к сетям нового поколения (NGN). В целом на основании выявленных недоработок существующих протоколов



и с учетом разработанных перспективных методов можно сформулировать требования к протоколам маршрутизации современных сетей телекоммуникаций [1].

I Протокол должен соответствовать требованиям QoS-маршрутизации, т. е. работать с доступными сетевыми ресурсами, информация о которых должна быть получена и постоянно актуализирована путем их постоянного мониторинга. Оптимальный маршрут должен быть выбран с учетом требований различных приложений к качеству их обслуживания при минимальной стоимости.

II Протокол маршрутизации при выборе оптимального маршрута должен обеспечивать сбалансированное использование сетевых ресурсов, что будет означать переход от монопутевых к мультипутевым методам.

III Задача поиска оптимального маршрута должна быть неотделима от задач управления доступом и резервирования ресурсов, т. е. эффективное сочетание дифференциального и интегрального подходов.

Анализ показывает, что перспективным подходом развития протоколов маршрутизации является концепция сервера маршрутов в сочетании с концепцией предвычисления путей, что позволит обеспечить поиск новых более эффективных методов управления трафиком в мультисервисных телекоммуникационных сетях [1]. Таким образом, в задачах поиска оптимальных маршрутов просматриваются три основных подхода [1]:

1. Переход от нескольких одиночных метрик, каждая из которых соответствует тому или иному QoS показателю, к композитной метрике, которую можно представить в виде аддитивной или мультипликативной функции отдельных метрик.

2. Последовательное использование заданных метрик, т. е. поиск маршрутов, удовлетворяющих требованиям первой метрики, затем поиск маршрутов среди найденных по первой метрике, но уже с использованием второй метрики и т. д.

3. Определение из множества метрик одной композиционной метрики, которая удовлетворяет требованиям каждой из отдельных метрик и определяет их значения. Так, если руководствоваться первым подходом, то вместо  $r$  аддитивных метрик в качестве комбинированной стоимостной функции пути  $p$  предлагается использовать следующие выражения:

$$L(p) = \sum_{i=1}^r d_i w_i(p); \quad (1)$$

$$L(p) = \sum_{i=1}^r \max(w_i(p), L_i), \quad (2)$$

где  $d_i$  – весовые коэффициенты различных метрик;  $L_i$  – допустимое значение метрики  $w_i$ .

Необходимо отметить, что учет нескольких QoS-метрик и различных требований приложений к значениям этих метрик является неоднозначной задачей и в целом существенно усложняет построение алгоритмов маршрутизации [1].

### Единый комплексный весовой коэффициент

Одним из шагов эффективного использования многокритериальной маршрутизации является введение единого комплексного весового коэффициента. В работах [2, 3] представлен алгоритм поиска пути, для которого установлены минимальная стоимость и заданная задержка передачи информации: другими словами, рассматривается задача двухкритериальной маршрутизации, где в качестве функции оптимизации выбраны два параметра: величина задержки в передаче информации и стоимость такой передачи. Видимо, не требуется дополнительных обоснований и пояснений, что тот и другой параметр должны стремиться к своим минимальным значениям из всех возможных.

Таким образом, для каждого канала связи, соединяющего отправителя и получателя, задаются два аддитивных веса  $w_1$  и  $w_2$ , один из которых является весовым коэффициентом по задержке, а второй по стоимости. Единый комплексный весовой коэффициент можно рассчитать по следующей формуле:

$$w = w_1(e) + \alpha w_2(e). \quad (3)$$

Таким образом, задача состоит в расчете весового коэффициента  $w$ . Сам по себе расчет является достаточно простым, но только в том случае, если корректно выбран коэффициент  $\alpha$ . Запишем выражение для  $\alpha$ , взятое из [2, 3]:

$$\alpha = \frac{C_d - d(p)}{c(p) - c(q)}. \quad (4)$$

Алгоритмы, решающие подобные задачи, позволяют достаточно быстро находить множество осуществимых путей. Однако полученные осуществимые пути не всегда являются единственными и оптимальными по параметрам краткости и стоимости. Этот алгоритм можно улучшить за счет более строго вычисления параметра  $\alpha$ . Улучшенный алгоритм представлен на рисунке. Одно из улучшений – это более строгий и более обоснованный выбор параметра  $\alpha$ , который может быть рассчитан по следующей формуле:

$$\alpha = \frac{c_d - c(p_d)}{d(p_d) - c(q)}. \quad (5)$$

Суть и назначение параметров  $c_d(p)$ ,  $c(p_d)$ ,  $c(q)$ ,  $d(p_d)$  можно легко определить из рисунка. Пример работы алгоритма представлен в статье [2]. Рассмотрим работу данного алгоритма более подробно. Вначале задается предельное значение одного из параметров качества обслуживания, например, задержки. Далее по топологии сети выбирается тот путь от источника  $s$  к получателю  $t$ , у которого суммарная величина задержки меньше заданной. Если таких путей несколько, то выбирается тот из них, где эта задержка минимальна. Если же несколько путей имеют одну и ту же минимальную величину задержки, то выбирается тот из них, у которого меньше стоимость.

Далее по формуле (5) рассчитывается коэффициент  $\alpha$ . В формуле:  $c_d$  – величина заданной задержки;  $c(p_d)$  – величина минимальной задержки от  $s$  к  $t$ ;  $d(p_d)$  – стоимость передачи от  $s$  к  $t$  по выбранному пути, имеющему минимальную задержку;  $c(q)$  – минимальная стоимость передачи от  $s$  к  $t$  (определяется по графу топологии на основании анализа всех осуществимых путей). После расчета коэффициента  $\alpha$  значения каждого ребра исходного графа умножаются на  $w$  в соответствии с формулой (5). Таким образом, получается граф с новыми весовыми коэффициентами по каждой дуге. Далее в соответствии с проведенными пересчетами выбирается тот путь от  $s$  к  $t$ , который имеет меньшую сумму весовых коэффициентов по дугам. Для этого пути рассчитывается новый коэффициент  $\alpha$ . Далее производится перерасчет исходного графа с учетом нового коэффициента, и после перерасчета определяется новый путь, у которого сумма весовых коэффициентов минимальна. Если в результате перерасчетов по двум итерациям получен один и тот же кратчайший путь, этот путь и является оптимальным, и работа алгоритма прекращается.

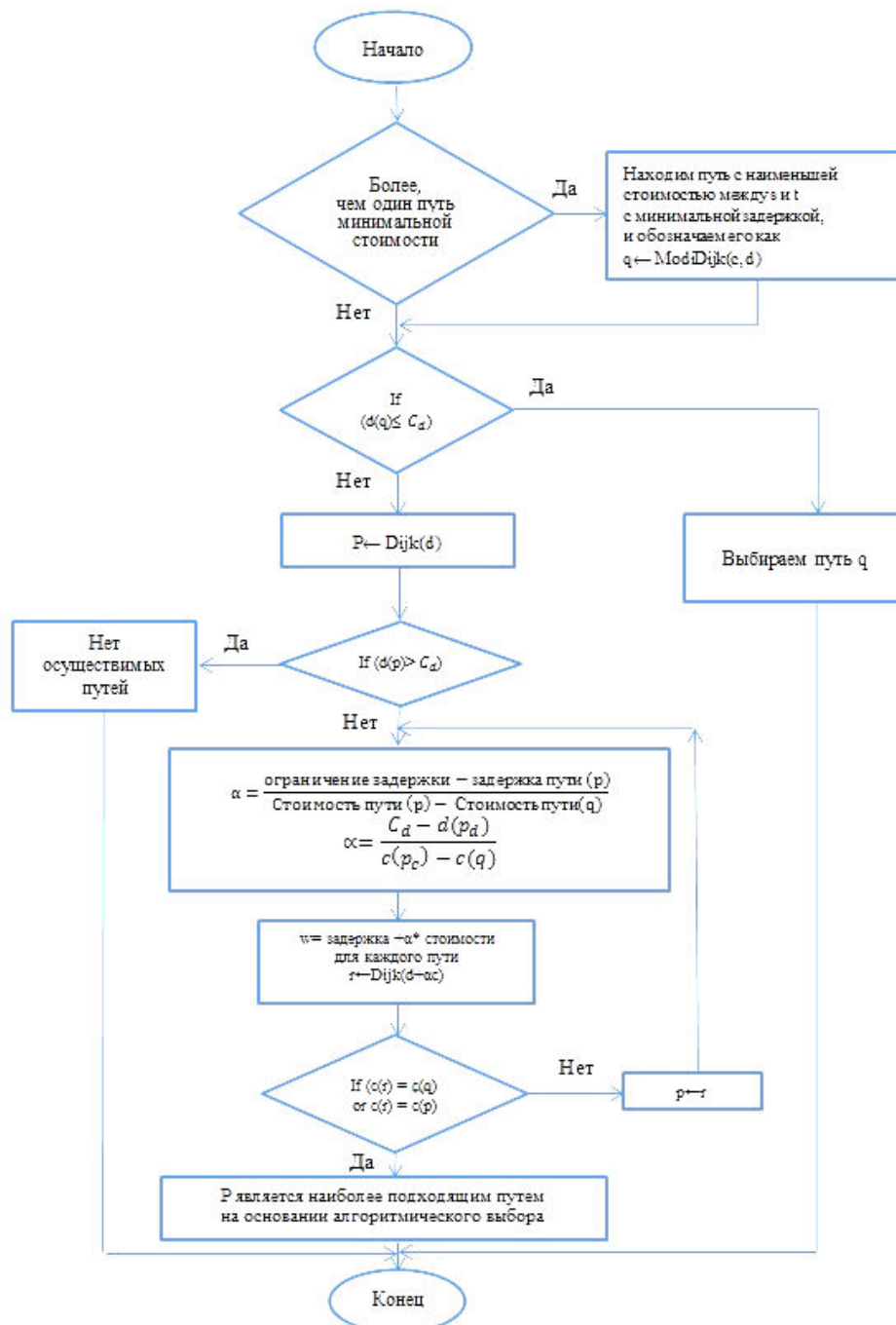
Проведенный анализ позволяет сделать однозначный вывод, что предложенный алгоритм поиска может быть применен и для других сочетаний параметров обеспечения заданного качества обслуживания: джиттер – стоимость; вероятность потерь пакетов – стоимость; скорость передачи – стоимость. При этом необходимо из рассмотрения изначально исключить все возможные пути, пропускная способность которых меньше директивно заданной. Таким образом, алгоритм выбора кратчайшего пути при многокритериальных требованиях может быть сформулирован следующим образом.

1. В результате анализа из графа топологии телекоммуникационной сети исключаются те ребра (каналы связи), пропускная способность которых меньше директивно заданной.

2. После реализации процедуры выбора множества осуществимых путей с помощью предложенного алгоритма осуществляется поиск кратчайшего маршрута отдельно по каждому из сочетаний критериев: вероятность потерь – стоимость; скорость передачи – стоимость; задержка – стоимость; джиттер – стоимость.

3. Из полученных на всех итерациях работы алгоритма промежуточных маршрутов выбирается тот из них, который является наиболее общим (наиболее близким) для всех критериев. Для одних из сочетаний критериев этот путь может быть найден уже на начальной итерации, для других – на завершающей и т. д.

4. Ситуация, когда алгоритм не смог выявить общих путей, означает, что многокритериальная задача при заданных ограничениях не имеет решений.



Алгоритм поиска оптимального пути

На основании анализа существующих различных подходов и алгоритмов QoS-маршрутизации информационных потоков можно выделить следующие главные направления их дальнейшего развития и совершенствования [1, 2]. Разработка новых подходов и методов моделирования сетей телекоммуникаций на основе потоковых моделей динамического характера, что позволит учесть преимущества динамического управления трафиком путем мониторинга текущего состояния телекоммуникационной сети. Такой подход неизбежно приведет к пересмотру метрик и параметров, описывающих саму сеть телекоммуникаций, а также требования к выбору того или иного маршрута. Балансировка трафика сетей телекоммуникаций представляется перспективным и эффективным средством обеспечения заданного качества обслуживания и мультитепевой маршрутизации. Задачи управления трафиком необходимо решать комплексно в рамках единых математических моделей, включающих в себя как выбор оптимального маршрута, так и управление доступом к каналу связи и очередями на обслуживание поступающих заявок, а также резервирование ресурсов.

## Заклучение

Выбор кратчайшего пути в сетях телекоммуникаций обеспечивается соответствующими протоколами маршрутизации и в настоящее время базируется, как правило, на многокритериальных концепциях, учитывающих различные требования по поиску самого маршрута, включая требования заданного качества обслуживания. Многокритериальная маршрутизация на основе комплексного весового коэффициента позволяет учесть различные требования при передаче потоков информации. Вместе с тем проблема выбора отдельных частных весовых коэффициентов, составляющих композицию, до конца строго не решена и требует дополнительного изучения. На сегодняшний день разработаны лишь эвристические алгоритмы, которые позволяют осуществлять поиск оптимального пути передачи информации в сетях телекоммуникаций при многокритериальных требованиях, что является недостаточным при решении целого ряда задач маршрутизации.

## Список литературы

1. Листопад Н.И., Воротницкий Ю.И., Хайдер А.А. Оптимальная маршрутизация в мультисервисных сетях телекоммуникаций на основе модифицированного алгоритма Дейкстры // Вестн. БГУ, серия 1. 2015. № 1. С. 70–76.
2. Многокритериальная маршрутизация информационных потоков / Н.И. Листопад [и др.] // Проблемы физики, математики и техники. 2017. № 2 (31). С. 84–90.
3. Waleed A. Mahmoud, Dheyaa J. Kadhim // A Proposal Algorithm to Solve Delay Constraint Least Cost Optimization Problem // J. of Engineering, University of Baghdad. 2013. Vol. 19, № 1. P. 155–160.
4. Листопад Н.И., Михневич С.Ю., Хайдер А.А. QoS маршрутизация информационных потоков в сетях телекоммуникаций // Проблемы физики, математики и техники. 2016. № 2. С. 90–96.
5. Листопад Н.И., Бука Л.О. Маршрутизация информационных потоков в мультисервисных сетях с учетом требований качества обслуживания // Информатизация образования. 2016. № 2. С. 33–40.

## References

1. Listopad N.I., Vorotnickij Ju.I., Hajder A.A. Optimal'naja marshrutizacija v mul'tiservisnyh setjah telekommunikacij na osnove modifitsirovannogo algoritma Dejkshty // Vestn. BGU, serija 1. 2015. № 1. S. 70–76. (in Russ.)
2. Mnogokriterial'naja marshrutizacija informacionnyh potokov / N.I. Listopad [i dr.] // Problemy fiziki, matematiki i tehniki. 2017. № 2 (31). S. 84–90. (in Russ.)
3. Waleed A. Mahmoud, Dheyaa J. Kadhim // A Proposal Algorithm to Solve Delay Constraint Least Cost Optimization Problem // J. of Engineering, University of Baghdad. 2013. Vol. 19, № 1. P. 155–160.
4. Listopad N.I., Mihnevich S.Ju., Hajder A.A. QoS marshrutizacija informacionnyh potokov v setjah telekommunikacij // Problemy fiziki, matematiki i tehniki. 2016. № 2. S. 90–96. (in Russ.)
5. Listopad N.I., Buka L.O. Marshrutizacija informacionnyh potokov v mul'tiservisnyh setjah s uchetom trebovanij kachestva obsluzhivaniya // Informatizacija obrazovanija. 2016. № 2. S. 33–40. (in Russ.)

### Сведения об авторе

Листопад Н.И., д.т.н, профессор, заведующий кафедрой информационных радиотехнологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

### Information about the author

Listopad N.I., D.Sci., professor, head of information radioengineering department of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

### Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,  
г. Минск, ул. П. Бровки, 6,  
Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники  
тел. +375-17-293-23-04;  
e-mail: listopad@bsuir.by  
Листопад Николай Измаилович

### Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,  
Minsk, P. Brovka st., 6,  
Belarusian state university  
of informatics and radioelectronics  
tel. +375-17-293-23-04;  
e-mail: listopad@bsuir.by  
Listopad Nikolai Izmailovich

УДК 517.2+519.2

## НОВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ В АНАЛИЗЕ МНОГОМЕРНЫХ ДАННЫХ: МНОГОМЕРНО-МАТРИЧНЫЙ ПОЛИНОМИАЛЬНЫЙ РЕГРЕССИОННЫЙ АНАЛИЗ

В.С. МУХА

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь*

*Поступила в редакцию 12 февраля 2019*

**Аннотация.** Обсуждаются новые результаты, полученные в БГУИР в области анализа многомерных данных, применительно к многомерно-матричному полиномиальному регрессионному анализу. Приводится постановка задачи многомерно-матричного полиномиального регрессионного анализа, когда входные и выходные переменные функции регрессии являются многомерными матрицами, и функция регрессии представляется полиномом входной переменной. Приводится также система линейных многомерно-матричных уравнений, решение которой дает оценки параметров полиномиальной функции регрессии. Для многомерно-матричной аффинной функции регрессии получены распределения оценок параметров, позволяющие делать статистические выводы о параметрах функции регрессии и регрессионной модели в целом. Выполнено компьютерное моделирование, иллюстрирующее применение предложенной теории и подтвердившее ее правильность.

*Ключевые слова:* анализ многомерных данных, многомерные матрицы, регрессионный анализ, дисперсионный анализ, полиномиальная функция регрессии.

**Abstract.** The new results in the analysis of the multidimensional data received in the BSUIR in the area of the polynomial regression analysis are discussed. The statement of the problem of the regression analysis under conditions of the multidimensional-matrix input and output variables and the polynomial regression function is formulated. The solution to the problem in the form of the system of the linear equations relatively the unknown parameters is given. The properties and distributions of the estimations of the parameters of the affine regression function are investigated, that allow testing hypotheses about the parameters. The computer simulation confirming the theory is performed.

*Keywords:* analysis of the multidimensional data, multidimensional matrices, regression analysis, dispersion analysis, polynomial regression function.

**Doklady BGUIR. 2019, Vol. 121, No. 3, pp. 57-64**

**A new results in the analysis of the multidimensional data:  
multidimensional-matrix polynomial regression analysis**

**V.S. Mukha**

### Введение

Анализ многомерных данных представляет собой область знаний, в которой исследуются явления, системы и процессы, описываемые наборами переменных. Начало исследований в этой области знаний в БГУИР положено публикацией статьи [1]. Развитие направления можно проследить по работам [2–4]. Особенностью исследований в БГУИР является использование многомерно-матричного математического подхода [2], когда переменные математических моделей данных рассматриваются как многомерные матрицы. Многомерно-матричный подход преодолевает недостатки, присущие классическим скалярному и векторно-матричному подходам, важнейшими из которых являются громоздкость, плохая формализованность при построении нелинейных математических моделей данных

и, как следствие плохой формализованности, отсутствие алгоритмической общности [2]. В статье приводятся новые результаты, полученные в БГУИР в области многомерно-матричного полиномиального регрессионного анализа.

В настоящее время достаточно хорошо развита теория множественной (векторно-скалярной) регрессии [5]. Однако эта теория сталкивается с проблемой плохой формализованности при необходимости рассмотрения нелинейных по входным переменным функций регрессии. Скалярное представление функции регрессии многих переменных отрезком ряда Тейлора произвольной степени весьма громоздко, векторно-матричное представление отсутствует, а представление функции регрессии в виде скалярного произведения вектора параметров и вектора базисных функций, представляющего собой интерпретацию отрезка ряда Тейлора в скалярной форме, является плохо формализованным, так как отсутствует формула, определяющая вектор базисных функций. В любом из этих случаев не обеспечивается алгоритмическая общность, то есть работоспособность алгоритмов, реализующих теорию в виде компьютерных программ, для любого числа переменных и любых степеней аппроксимирующих полиномов. Исследования в области многомерного, в частности, векторно-векторного регрессионного анализа относятся, в основном, к линейной по параметрам и входным переменным функции регрессии и выглядят гораздо беднее [6]. Оценки параметров для этого случая в литературе известны, однако процедуры проверки гипотез отсутствуют.

Многомерно-матричный подход позволяет разрабатывать теорию регрессионного анализа, свободную от указанных недостатков, и в более общей форме, когда входные и выходные переменные функции регрессии являются многомерно-матричными. Такая форма представления функции регрессии включает классические множественную и многомерную регрессии. В работе [7] впервые дана постановка задачи многомерно-матричного полиномиального регрессионного анализа, получены система уравнений для оценок параметров функции регрессии и выражения для оценок параметров постоянной, аффинной и квадратичной регрессий. В работе [8] найдены распределения оценок параметров аффинной функции регрессии. Данная статья содержит полученные ранее результаты без их доказательств, не опубликованные ранее процедуру дисперсионного анализа для аффинной регрессии и результаты компьютерного моделирования. Это позволяет получить более полное представление о проблеме и степени ее разработки.

### **Постановка и решение задачи многомерно-матричного полиномиального регрессионного анализа**

Пусть  $x = (x_j)$ ,  $j = (j_1, j_2, \dots, j_q)$ ,  $j_1 = \overline{1, m_1}$ , ...,  $j_q = \overline{1, m_q}$ , –  $q$ -мерно-матричная входная переменная некоторого объекта,  $\eta = (\eta_i)$ ,  $i = (i_1, i_2, \dots, i_p)$ ,  $i_1 = \overline{1, n_1}$ , ...,  $i_p = \overline{1, n_p}$ , –  $p$ -мерно-матричная выходная переменная этого же объекта, и выходная переменная  $\eta$  имеет стохастическую зависимость от входной переменной  $x$  так, что существует неизвестная условная плотность вероятности  $f(\eta|x)$ . Функцию регрессии  $\eta$  на  $x$  обозначим  $y = \varphi(x)$  и предположим, что плотность вероятности  $f(\eta|x)$  можно представить в виде  $\eta = \varphi(x) + \xi$ , где  $\xi = (\xi_i)$ ,  $i = (i_1, i_2, \dots, i_p)$  –  $p$ -мерная случайная матрица с нулевым математическим ожиданием. Пусть для некоторых значений  $x_1 = (x_{j,1})$ ,  $x_2 = (x_{j,2})$ , ...,  $x_n = (x_{j,n})$  входной переменной  $x$  получены значения  $y_{o,1} = (y_{o,i,1})$ ,  $y_{o,2} = (y_{o,i,2})$ , ...,  $y_{o,n} = (y_{o,i,n})$  выходной переменной  $\eta$  в виде

$$y_{o,\mu} = \varphi(x_\mu) + z_\mu, \quad \mu = \overline{1, n}, \quad (1)$$

где  $z_\mu = (z_{i,\mu})$  – значения случайной матрицы  $\xi = (\xi_i)$  (ошибки измерений), и по измерениям  $(x_1, y_{o,1}), (x_2, y_{o,2}), \dots, (x_n, y_{o,n})$  нужно получить математическую модель объекта в виде эмпирической функции регрессии  $\hat{y} = \hat{\varphi}(x)$ .

Пусть гипотетическая функция регрессии  $y = \varphi(x)$  является полиномом степени  $m$  переменной  $\tilde{x}^k = x^k - s_{x^k}$ , то есть

$$y = \varphi(x) = \sum_{k=0}^m {}^{0,kq} (C_{(p,kq)} \tilde{x}^k) = \sum_{k=0}^m {}^{0,kq} (\tilde{x}^k C_{(kq,p)}), \quad m = 0, 1, 2, \dots, \quad (2)$$

где  $C_{(p,kq)}$  –  $(p+kq)$ -мерные матрицы коэффициентов,  $C_{(p,kq)} = (c_{i,j_1, \dots, j_k}) = (c_{i, \bar{j}_k})$ ,  $i = (i_1, i_2, \dots, i_p)$ ,  $\bar{j}_k = (j_1, j_2, \dots, j_k)$ , симметричные относительно  $q$ -мультииндексов  $j_1, j_2, \dots, j_k$ , и  $\tilde{x}^k = x^k - s_{x^k}$ ,  $s_{x^k} = \frac{1}{n} \sum_{\mu=1}^n x_{\mu}^k$ . Матрицы  $C_{(p,kq)}$  и  $C_{(kq,p)}$  должны удовлетворять условиям  $C_{(p,kq)} = (C_{(kq,p)})^{H_{p+kq,kq}}$ ,  $C_{(kq,p)} = (C_{(p,kq)})^{B_{p+kq,kq}}$ , где  $H_{p+kq,kq}$  и  $B_{p+kq,kq}$  – подстановки транспонирования типа «назад» и «вперед» соответственно [4].

Подставляя (2) в (1), получим математическую модель измерений в виде

$$y_{o,\mu} = \sum_{k=0}^m {}^{0,kq} (C_{(p,kq)} \tilde{x}_{\mu}^k) + z_{\mu} = \sum_{k=0}^m {}^{0,kq} (\tilde{x}_{\mu}^k C_{(kq,p)}) + z_{\mu}, \quad \mu = \overline{0, n}, \quad m = 0, 1, 2, \dots \quad (3)$$

В предположениях модели измерений (3) требуется по измерениям  $(x_1, y_{o,1})$ ,  $(x_2, y_{o,2})$ , ...,  $(x_n, y_{o,n})$  получить оценки  $\hat{C}_{(p,0)}$ ,  $\hat{C}_{(p,q)}$ , ...,  $\hat{C}_{(p,mq)}$  неизвестных параметров  $C_{(p,0)}$ ,  $C_{(p,q)}$ , ...,  $C_{(p,mq)}$  методом наименьших квадратов:  $f = \sum_{\mu=1}^n {}^{0,p} (z_{\mu} z_{\mu}) \rightarrow \min_{C_{(p,0)}, C_{(p,q)}, \dots, C_{(p,mq)}}$ , где

$$z_{\mu} = (z_{i,\mu}) = y_{o,\mu} - \sum_{k=0}^m {}^{0,kq} (C_{(p,kq)} x_{\mu}^k) = y_{o,\mu} - \sum_{k=0}^m {}^{0,kq} (x_{\mu}^k C_{(kq,p)}); \quad \mu = \overline{1, n}, \quad i = (i_1, i_2, \dots, i_p).$$

Решение сформулированной задачи следующее [8]: оценка  $\hat{C}_{(p,0q)}$  параметра  $C_{(p,0q)}$  модели измерений (3) имеет вид

$$\hat{C}_{(p,0q)} = s_y = \frac{1}{n} \sum_{\mu=1}^n y_{o,\mu}, \quad (4)$$

а оценки  $\hat{C}_{(p,kq)}$  параметров  $C_{(p,kq)}$  при  $k > 0$  определяются из системы уравнений

$$\sum_{k=1}^m {}^{0,kq} (C_{(p,kq)} s_{\tilde{x}^{k+\lambda}}) = s_{y \tilde{x}^{\lambda}}, \quad \lambda = \overline{1, m}, \quad (5)$$

$$\text{где } s_{y \tilde{x}^{\lambda}} = \frac{1}{n} \sum_{\mu=1}^n y_{o,\mu} x_{\mu}^{\lambda}, \quad \lambda = \overline{0, m}; \quad s_{x^{k+\lambda}} = \frac{1}{n} \sum_{\mu=1}^n x_{\mu}^k x_{\mu}^{\lambda} = \frac{1}{n} \sum_{\mu=1}^n x_{\mu}^{k+\lambda}, \quad s_{x^{\lambda}} = \frac{1}{n} \sum_{\mu=1}^n x_{\mu}^{\lambda}, \quad \lambda = \overline{0, m}.$$

В статье [7] на основании системы уравнений (5) получены выражения для оценок параметров постоянной, аффинной и квадратичной функций регрессии.

### Аффинная функция регрессии, распределения оценок параметров

В статье [8] выполнен более детальный анализ аффинной многомерно-матричной функции регрессии

$$y = C_{(p,0q)} + {}^{0,q} (C_{(p,q)} \tilde{x}_{\mu}) = C_{(0q,p)} + {}^{0,q} (\tilde{x}_{\mu} C_{(q,p)}). \quad (6)$$

Модель измерений в этом случае выглядит следующим образом:

$$y_{o,\mu} = C_{(p,0q)} + {}^{0,q} (C_{(p,q)} \tilde{x}_{\mu}) + z_{\mu} = C_{(0q,p)} + {}^{0,q} (\tilde{x}_{\mu} C_{(q,p)}) + z_{\mu}, \quad \mu = \overline{1, n}, \quad (7)$$

Оценка  $\hat{C}_{(p,q)}$  параметра  $C_{(p,q)}$  функции регрессии (6) определяется выражением

$$\hat{C}_{(p,q)} = {}^{0,q} (s_{y \tilde{x}} (s_{\tilde{x}^2})^{-1}), \quad (8)$$

где  $s_{y\bar{x}} = \frac{1}{n} \sum_{\mu=1}^n y_{o,\mu} \bar{x}_\mu$ ,  $s_{\bar{x}^2} = s_{\bar{x}^{1+1}} = \frac{1}{n} \sum_{\mu=1}^n \bar{x}_\mu^2$ ,  $(s_{\bar{x}^2})^{-1}$  – матрица,  $(0, q)$ -обратная к матрице  $s_{\bar{x}^2}$ ,

а оценка  $\hat{C}_{(p,0q)}$  параметра  $C_{(p,0q)}$  имеет вид (4).

Относительно оценок параметров аффинной функции регрессии (6) справедлива следующая теорема.

*Теорема 1.* Если матрицы ошибок измерений  $z_\mu$  в модели измерений (7) имеют математическое ожидание  $E(z_\mu) = 0$ , дисперсионную матрицу  $D(z_\mu) = D(\xi) = \sigma^2 E(0, p)$ , где  $E(0, p)$  –  $(0, p)$ -единичная  $(n_1 \times \dots \times n_p \times n_1 \times \dots \times n_p)$ -матрица, и независимы по  $\mu$ , то математические ожидания оценок  $\hat{C}_{(p,q)}$  и  $\hat{C}_{(p,0q)}$  определяются выражениями:

$$E(\hat{C}_{(p,q)}) = C_{(p,q)}; \quad (9)$$

$$E(\hat{C}_{(p,0q)}) = C_{(p,0q)}, \quad (10)$$

а их ковариационные и дисперсионные матрицы – выражениями:

$$\text{cov}(\hat{C}_{(q,p)}, \hat{C}_{(p,q)}) = \frac{\sigma^2}{n} D^{(2)}, \quad D^{(2)} = (d_{j,i,i',j'}^{(2)}) = \begin{pmatrix} (s_{\bar{x}^2})_{j,j'}^{-1}, & i = i'; \\ 0 & \text{иначе} \end{pmatrix},$$

$$D(\hat{C}_{(p,q)}) = \frac{\sigma^2}{n} D^{(1)}, \quad D^{(1)} = (d_{i,j,i',j'}^{(1)}) = (D^{(2)})^{(H_{p+q,q} E_{p+q})}, \quad (11)$$

$$D(\hat{C}_{(p,0q)}) = \text{cov}(\hat{C}_{(p,0q)}, \hat{C}_{(p,0q)}) = D^{(0)} = (d_{i,i'}^{(0)}) = \frac{\sigma^2}{n} E(0, p), \quad (12)$$

$\text{cov}(\hat{C}_{(0q,p)}, \hat{C}_{(p,q)}) = 0$ ,  $(s_{\bar{x}^2})_{j,j'}^{-1}$  – элемент матрицы  $(s_{\bar{x}^2})^{-1}$ ,  $i = (i_1, i_2, \dots, i_p)$ ,  $i' = (i'_1, i'_2, \dots, i'_p)$ ,  $j = (j_1, j_2, \dots, j_q)$ ,  $j' = (j'_1, j'_2, \dots, j'_q)$ . Если ошибки измерений  $z_\mu$  распределены по нормальному закону, то оценки  $\hat{C}_{(p,q)}$ ,  $\hat{C}_{(p,0q)}$  также распределены по нормальному закону с математическими ожиданиями (9), (10) и дисперсионными матрицами (11), (12) соответственно.

В регрессионном анализе дисперсия ошибок измерений  $\sigma^2$  обычно неизвестна, и требуется по измерениям получить ее оценку  $\hat{\sigma}^2$ . Оценкой параметра  $\sigma^2$  может служить статистика

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{1}{n \cdot \text{tr}E(0, p)} \text{tr} \left( \sum_{\mu=1}^n (y_{o,\mu} - \hat{y}_\mu)^2 \right), \quad (13)$$

где  $\text{tr}E(0, p) = \prod_{i=1}^p n_i$  – след матрицы  $E(0, p)$ .

*Теорема 2.* В условиях теоремы 1 (кроме условия нормальности ошибок измерений) математическое ожидание оценки  $\hat{\sigma}^2$  (13) определяется выражением  $E(\hat{\sigma}^2) = \sigma^2 - \frac{\sigma^2(1 + \text{tr}E(0, q))}{n}$ , то есть оценка  $\hat{\sigma}^2$  (13) асимптотически несмещенная.

$$\text{Исправленная оценка } \hat{\sigma}_1^2 = \frac{n\hat{\sigma}^2}{n-1 - \text{tr}(E(0, q))} = \frac{1}{\text{tr}E(0, p)(n-1 - \text{tr}E(0, q))} \text{tr} \left( \sum_{\mu=1}^n {}^{0,0} (y_{o,\mu} - \hat{y}_\mu)^2 \right)$$

параметра  $\sigma^2$  является несмещенной ( $E(\hat{\sigma}_1^2) = \sigma^2$ ). Если ошибки измерений  $z_\mu$  имеют нормальное распределение, то статистика

$$v = \frac{n \text{tr}E(0, p) \hat{\sigma}^2}{\sigma^2} = \frac{n \text{tr}E(0, p)(n-1 - \text{tr}E(0, q)) \hat{\sigma}_1^2}{\sigma^2} \quad (14)$$



распределена по закону хи-квадрат с  $trE(0, p)(n-1-trE(0, q))$  степенями свободы, где  $trE(0, p) = \prod_{i=1}^p n_i$ ,  $trE(0, q) = \prod_{j=1}^q m_j$ . Оценки  $\hat{\sigma}^2$  (13),  $\hat{C}_{(p,0q)}$  (4) и  $\hat{C}_{(p,q)}$  (8) попарно независимы.

В [8] рассмотрены также некоторые статистики, связанные с полученными оценками параметров. Для возможности рассмотрения отдельных элементов матриц оценок вводятся более простые обозначения:  $C^{(0)} = (c_i^{(0)}) = C_{(p,0q)}$ ,  $\bar{C}^{(0)} = (\bar{c}_i^{(0)}) = \bar{C}_{(p,0q)}$ ,  $C^{(1)} = (c_{i,j}^{(1)}) = C_{(p,q)}$ ,  $\bar{C}^{(1)} = (\bar{c}_{i,j}^{(1)}) = \bar{C}_{(p,q)}$ ,  $i = (i_1, i_2, \dots, i_p)$ ,  $j = (j_1, j_2, \dots, j_q)$ . Статистики

$$u_i^{(0)} = \frac{\bar{c}_i^{(0)} - c_i^{(0)}}{\sigma} \sqrt{n}, \quad u_{i,j}^{(1)} = \frac{\bar{c}_{i,j}^{(1)} - c_{i,j}^{(1)}}{\sigma \sqrt{d_{i,j,i,j}^{(1)}}} \sqrt{n}, \quad i = (i_1, i_2, \dots, i_p), \quad j = (j_1, j_2, \dots, j_q), \quad (15)$$

распределены по нормальному закону  $N(0,1)$ , а статистики

$$t_i^{(0)} = \frac{\bar{c}_i^{(0)} - c_i^{(0)}}{\hat{\sigma}_1} \sqrt{n}, \quad t_{i,j}^{(1)} = \frac{\bar{c}_{i,j}^{(1)} - c_{i,j}^{(1)}}{\hat{\sigma}_1 \sqrt{d_{i,j,i,j}^{(1)}}} \sqrt{n}, \quad i = (i_1, i_2, \dots, i_p), \quad j = (j_1, j_2, \dots, j_q), \quad (16)$$

имеют распределение Стьюдента с  $trE(0, p)(n-1-trE(0, q))$  степенями свободы.

Оценка отклика  $\hat{y} = (\hat{y}_i) = \bar{C}_{(p,0q)} + {}^{0,q}(\bar{C}_{(p,q)} \bar{x})$ ,  $i = (i_1, i_2, \dots, i_p)$  имеет математическое ожидание вида  $E(\hat{y}) = a^{(y)} = (a_i^{(y)}) = C_{(p,0q)} + {}^{0,q}(C_{(p,q)} \bar{x})$ ,  $i = (i_1, i_2, \dots, i_p)$ , то есть является несмещенной. Оценка  $\hat{y}$  распределена по нормальному закону со средним значением

$$a^{(y)} = (a_i^{(y)}) \quad \text{и} \quad \text{дисперсионной} \quad \text{матрицей} \quad D(\hat{y}) = \frac{\sigma^2}{n} D^{(y)} = \frac{\sigma^2}{n} (d_{i,i'}^{(y)}), \quad \text{где}$$

$$D^{(y)} = (d_{i,i'}^{(y)}) = E(0, p) + {}^{0,q}(\bar{x} \quad {}^{0,q}(D^{(2)} \bar{x})).$$

Нормированные статистики

$$u_i^{(y)} = \frac{\hat{y}_i - a_i^{(y)}}{\sigma \sqrt{d_{i,i}^{(y)}}} \sqrt{n}, \quad i = (i_1, i_2, \dots, i_p), \quad (17)$$

распределены по нормальному закону  $N(0,1)$ . Статистики

$$t_i^{(y)} = \frac{\hat{y}_i - a_i^{(y)}}{\hat{\sigma}_1 \sqrt{d_{i,i}^{(y)}}} \sqrt{n}, \quad i = (i_1, i_2, \dots, i_p), \quad (18)$$

имеют распределение Стьюдента с  $trE(0, p)(n-1-trE(0, q))$  степенями свободы.

Выполнив дополнительно  $k$  измерений  $y_{\delta,1}, y_{\delta,2}, \dots, y_{\delta,k}$  в некоторой точке  $x$ , можно получить

$$\text{независимую оценку } \hat{\sigma}_{\delta,0}^2 \text{ параметра } \sigma^2 \text{ по формуле } \hat{\sigma}_{\delta,0}^2 = \frac{1}{trE(0, p)(k-1)} tr \left( \sum_{\mu=1}^k {}^{0,0}(y_{\delta,\mu} - \hat{y}_\delta)^2 \right),$$

где  $\hat{y}_\delta = \frac{1}{k} \sum_{\mu=1}^k y_{\delta,\mu}$ . Оценка  $\hat{\sigma}_{\delta,0}^2$  является несмещенной, а статистика

$$w = \frac{(k-1)trE(0, p)\hat{\sigma}_{\delta,0}^2}{\sigma^2} \quad (19)$$

распределена по закону хи-квадрат с  $(k-1)trE(0, p)$  степенями свободы. В силу независимости статистик  $v$  и  $w$  статистика

$$F = \frac{\hat{\sigma}_1^2}{\hat{\sigma}_{\delta,0}^2} \quad (20)$$

имеет распределение Фишера с  $trE(0, p)(n-1-trE(0, q))$ ,  $trE(0, p)(k-1)$  степенями свободы.

Статистики (14), (15), (16)–(19) и их распределения используются для построения доверительных интервалов и проверки гипотез для параметров многомерно-матричной аффинной эмпирической регрессии, а статистика (20) – для проверки гипотезы об адекватности математической модели, подобно тому, как это выполняется в классическом регрессионном анализе [5, 9].

### Дисперсионный анализ для аффинной функции регрессии

Приведем также не опубликованную ранее процедуру дисперсионного анализа для проверки гипотезы о том, что параметр  $C_{(p,q)}$  аффинной функции регрессии (6) равен нулю, то есть гипотезу вида  $\{H_0, H_1\}$ , где

$$H_0 : C_{(p,q)} = 0, \quad (21)$$

а альтернатива  $H_1 : C_{(p,q)} \neq 0$  состоит в том, что хотя бы один из элементов матрицы  $C_{(p,q)}$  не равен нулю. Для проверки этой гипотезы применяется метод дисперсионного анализа, основанный на анализе так называемых сумм квадратов  $R_0^2$ ,  $R_1^2$ ,  $R^2$ :

$$R_0^2 = tr\left(\sum_{\mu=1}^n (y_{o,\mu} - \hat{y}_\mu)^2\right) = tr\bar{R}_0^2, \quad \bar{R}_0^2 = \sum_{\mu=1}^n (y_{o,\mu} - \hat{y}_\mu)^2, \quad \text{где } y_{o,\mu} = C_{(p,0q)} + {}^{0,q}(C_{(p,q)}\tilde{x}_\mu) + z_\mu,$$

$$\hat{y}_\mu = \hat{C}_{(p,0q)} + {}^{0,q}(\hat{C}_{(p,q)}\tilde{x}_\mu); \quad R_1^2 = tr\left(\sum_{\mu=1}^n (y_{o,\mu} - s_y)^2\right) = tr\left(\sum_{\mu=1}^n \tilde{y}_{o,\mu}^2\right) = tr\bar{R}_1^2, \quad \bar{R}_1^2 = \sum_{\mu=1}^n (y_{o,\mu} - s_y)^2;$$

$$R^2 = tr\left(\sum_{\eta=1}^n (\hat{y}_\mu - s_y)^2\right) = tr\bar{R}^2, \quad \bar{R}^2 = \sum_{\eta=1}^n (\hat{y}_\mu - s_y)^2.$$

Справедлива следующая теорема.

*Теорема 3.* Для сумм квадратов  $R_1^2$ ,  $R_0^2$  и  $R^2$  выполняется равенство  $R_1^2 = R_0^2 + R^2$ . В условиях теоремы 1 (с условием нормальности ошибок измерений) случайная величина  $R_0^2 / \sigma^2$  имеет распределение хи-квадрат с  $trE(0, p)(n-1-trE(0, q))$  степенями свободы. При выполнении гипотезы  $H_0 : C_{(p,q)} = 0$  случайные величины  $R_0^2 / \sigma^2$ ,  $R_1^2 / \sigma^2$  и  $R^2 / \sigma^2 = (R_1^2 - R_0^2) / \sigma^2$  имеют распределения хи-квадрат с  $trE(0, p)(n-1-trE(0, q))$ ,  $trE(0, p)(n-1)$  и  $trE(0, p)trE(0, q)$  степенями свободы соответственно и независимы. Отношение  $F = \frac{R_1^2 - R_0^2}{trE(0, p)trE(0, q)} / \frac{R_0^2}{trE(0, p)(n-1-trE(0, q))}$  имеет  $f$ -распределение (Фишера) с  $trE(0, p)trE(0, q)$ ,  $trE(0, p)(n-1-trE(0, q))$  степенями свободы.

Для проверки гипотезы (21) используется стандартная процедура проверки гипотезы на основе правостороннего критерия значимости.

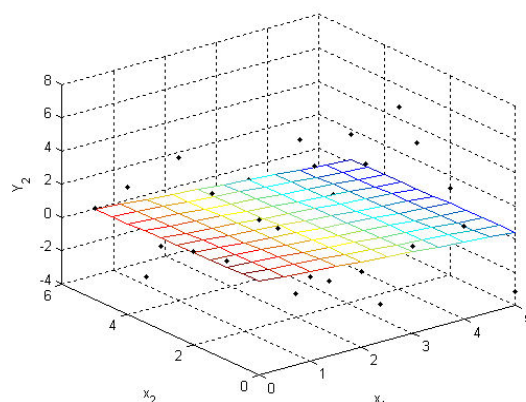
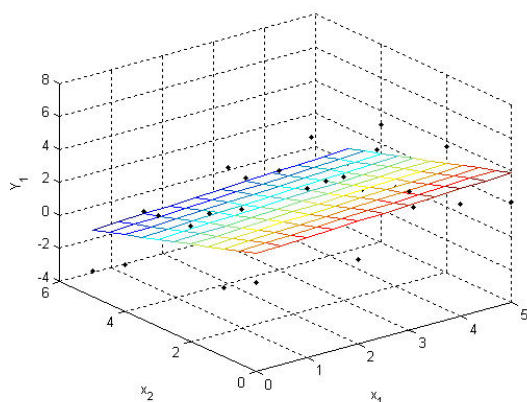
### Компьютерное моделирование

Для проверки предложенных алгоритмов моделировалась аффинная функция регрессии (6) с  $p = q = 1$ , то есть с векторными (в векторно-матричной терминологии) входной и выходной переменными  $x = (x_1, x_2)$ ,  $y = (y_1, y_2)$ . Математическая модель измерений (7) в этом случае имеет вид

$$y_{o,\mu} = \alpha + {}^{0,1}(\beta x) + z_\mu, \quad \mu = \overline{1, n}, \quad (22)$$

где  $z_\mu = (z_{1,\mu}, z_{2,\mu})$ . Измерения моделировались на сетке значений входных переменных  $0 \leq x_1 \leq 5$ ,  $0 \leq x_2 \leq 5$  с шагом 1 по каждой переменной, что дает выборку размером  $n = 36$ . Графики эмпирических функций регрессии  $y_1 = y_1(x_1, x_2)$ ,  $y_2 = y_2(x_1, x_2)$  при  $\alpha = (1, 2)$ ,

$\beta = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$ ,  $\sigma^2 = 5$  представлены на рисунке, на котором также в виде точек изображены измерения, по которым получены данные функции регрессии.



Эмпирические функции регрессии для аффинной многомерной регрессии (22)

Как видно из рисунка, эмпирические функции регрессии не являются горизонтальными плоскостями, то есть визуально мы можем сделать вывод, что существует линейная связь между векторами  $y = (y_1, y_2)$  и  $x = (x_1, x_2)$ . Однако применение изложенных выше процедур проверки гипотез, включая дисперсионный анализ, показывает, что такой связи нет, она признается незначимой. Это соответствует исходным данным, так как матричный параметр  $\beta$ , определяющий линейную связь в истинной функции регрессии, является нулевым. Таким образом, результаты моделирования подтверждают правильность изложенной теории.

### Заключение

В статье обобщены результаты, полученные в БГУИР в регрессионном анализе. Рассмотрены неудовлетворенности, существующие в настоящее время в регрессионном анализе применительно к многомерным данным: громоздкость, плохая формализованность, отсутствие алгоритмической общности. По мнению автора, имеющиеся неудовлетворенности были устранены с помощью многомерно-матричного математического подхода. Полученные теоретические результаты и их компьютерные программные реализации не имеют ограничений на мерность и размеры данных, так что единственным ограничением для их использования могут быть лишь вычислительные мощности, которые, однако, растут в настоящее время с огромной скоростью.

### Список литературы

1. Муха В.С. Многомерно-матричные производные и разложение функции нескольких переменных в ряд Тейлора // Автоматика и вычислительная техника. 1987. Вып. 16. С. 65–71.
2. Муха В.С. Анализ многомерных данных. Минск: УП «Технопринт», 2004. 368 с.
3. Муха В.С. Анализ многомерных данных: проблемы, состояние, перспективы // Докл. БГУИР. 2004. № 1 (5). С. 38–49.
4. Муха В.С. Математические модели многомерных данных // Докл. БГУИР. 2014. № 2 (80). С. 143–158.
5. Вучков И.Н., Бояджиева Л., Солаков Е. Прикладной линейный регрессионный анализ. М.: Финансы и статистика, 1987. 238 с.
6. Зельнер А. Байесовские методы в эконометрии. М.: Статистика, 1980. 438 с.
7. Муха В.С. Многомерно-матричный полиномиальный регрессионный анализ. Оценки параметров // Весці НАН Беларусі. 2007. № 1. С. 45–51.
8. Муха В.С. Многомерно-матричный линейный регрессионный анализ: распределения и свойства оценок параметров // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-мат. навук. 2014. № 2. С. 71–81.
9. Муха В.С. Статистические методы обработки данных: учеб. пособие. Минск: Изд. центр БГУ, 2009. 183 с.

## References

1. Muha V.S. Mnogomerno-matrichnye proizvodnye i razlozhenie funktsii neskol'kih peremennykh v rjad Tejlora // Avtomatika i vychislitel'naja tehnika. 1987. Vyp. 16. S. 65–71. (in Russ.)
2. Muha V.S. Analiz mnogomernykh dannykh. Minsk: UP «Tehnoprint», 2004. 368 s. (in Russ.)
3. Muha V.S. Analiz mnogomernykh dannykh: problemy, sostojanie, perspektivy // Dokl. BGUIR. 2004. № 1 (5). S. 38–49. (in Russ.)
4. Muha V.S. Matematicheskie modeli mnogomernykh dannykh // Dokl. BGUIR. 2014. № 2 (80). S. 143–158. (in Russ.)
5. Vuchkov I.N., Bojadzhieva L., Solakov E. Prikladnoj linejnyj regressionnyj analiz. M.: Finansy i statistika, 1987. 238 s. (in Russ.)
6. Zel'ner A. Bajesovskie metody v jekonometrii. M.: Statistika, 1980. 438 s. (in Russ.)
7. Muha V.S. Mnogomerno-matrichnyj polinomial'nyj regressionnyj analiz. Ocenki parametrov // Vesci NAN Belarusi. 2007. № 1. S. 45–51. (in Russ.)
8. Muha V.S. Mnogomerno-matrichnyj linejnyj regressionnyj analiz: raspredelenija i svoystva ocenok parametrov // Vesci NAN Belarusi. Ser. fiz.-mat. navuk. 2014. № 2. S. 71–81. (in Russ.)
9. Muha V.S. Statisticheskie metody obrabotki dannykh: ucheb. posobie. Minsk: Izd. centr BGU, 2009. 183 s. (in Russ.)

### Сведения об авторе

Муха В.С., д.т.н., профессор, профессор кафедры информационных технологий автоматизированных систем Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

### Information about the author

Mukha V.S., D.Sci, professor, professor of department of automated data processing systems of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

### Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,  
г. Минск, ул. П. Бровки, 6  
Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники  
тел. +375-17-293-88-23;  
e-mail: mukha@bsuir.by  
Муха Владимир Степанович

### Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,  
Minsk, P. Brovka st., 6  
Belarusian state university  
of informatics and radioelectronics  
tel. +375-17-293-88-23;  
e-mail: mukha@bsuir.by  
Mukha Vladimir Stepanovich

УДК 004.415.533

## МНОГОКРАТНОЕ УПРАВЛЯЕМОЕ ВЕРОЯТНОСТНОЕ ТЕСТИРОВАНИЕ

В.А. ЛЕВАНЦЕВИЧ, В.Н. ЯРМОЛИК

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь*

*Поступила в редакцию 4 марта 2019*

**Аннотация.** Рассматриваются различные способы формирования управляемых вероятностных тестов и их недостатки. Предлагаются и анализируются различные численные метрики для построения многократных управляемых вероятностных тестов. Обосновывается и подтверждается экспериментальными исследованиями эффективность применения расстояния Евклида для формирования многократных управляемых вероятностных тестов.

*Ключевые слова:* тестовый набор, мера отличия, многократный управляемый вероятностный тест, расстояние Евклида.

**Abstract.** Various methods for generating controlled random tests and their disadvantages are considered. Various numerical metrics are proposed and analyzed to construct multiple controlled random tests. The effectiveness of applying the Euclidean distance for the formation of multiple controlled random tests is substantiated and confirmed by experimental studies.

*Keywords:* test set, measure of difference, multiple controlled probabilistic test, Euclidean distance.

**Doklady BGUIR. 2019, Vol. 121, No. 3, pp. 65-69**

**Multiple controlled random testing**

**V.A. Levantsevich, V.N. Yarmolik**

### Введение

Вероятностное тестирование (random testing) является распространенной технологией тестирования вычислительных систем и основано на методе черного ящика, который не учитывает особенности реализации объекта тестирования [1–5].

Для повышения эффективности вероятностных тестов используют их модификации, которые получили общее название управляемые вероятностные тесты (Controlled Random Tests). К подобным тестам можно отнести такие виды формирования тестов, как эффективное вероятностное тестирование, антивероятностное тестирование, эволюционное вероятностное тестирование, адаптивное вероятностное тестирование, упорядоченное вероятностное тестирование и другие методы [1, 3, 6].

Основным недостатком управляемых вероятностных тестов является сложность определения очередного тестового набора по отношению к предыдущим наборам теста [6, 7].

Для уменьшения сложности формирования управляемых вероятностных тестов, в качестве альтернативы используются тесты, в которых применяется многократная процедура повторения некоего исходного, базового теста. При этом на каждой итерации базового теста задаются отличные от предыдущих, изменяемые параметры теста.

Так, например, в псевдоисчерпывающих тестах, использующих покрывающие массивы, в качестве изменяемого параметра применяются начальные состояния тестируемого объекта [1, 7]. В итеративных вероятностных тестах случайный вектор используется на каждой итерации более одного раза [1, 6, 7].

Вероятностные тесты с малым числом наборов в качестве изменяемого параметра используют начальный тестовый набор, сформированный случайным образом [4].

Анализируя многократные тесты, можно выделить некоторые общие принципы их построения:

- в основе многократного теста лежит начальный, базовый тест, в котором тестовые наборы максимально отличаются друг от друга;
- при формировании следующих модификаций базового теста, входящих в состав многократного теста, используется случайный фактор;
- основная задача формирования многократного теста состоит в генерировании базового теста.

Достоинством данных разновидностей вероятностных тестов является снижение сложности формирования теста за счет определения характеристик не для каждого тестового набора, а для теста в целом.

### Основные определения и классификации

Для тестового диагностирования цифровых устройств и программных приложений с  $m$  входами и пространством входных наборов, состоящим из  $2^m$  двоичных наборов (векторов), приведем определение [1, 3]. Управляемым вероятностным тестом является тест  $CRT = \{T_0, T_1, T_2, \dots, T_{q-1}\}$ , состоящий из  $q \leq 2^m m$ -разрядных, случайным образом сформированных тестовых наборов  $T_i, i \in \{0, 1, 2, \dots, q-1\}$ , где  $T_i = t_{i,m-1}, t_{i,m-2}, \dots, t_{i,2}, t_{i,1}, t_{i,0}$ ,  $t_{i,l} \in \{0, 1\}$ , таких, что  $T_i$  удовлетворяет некоторому критерию либо критериям, полученным на основании предыдущих наборов  $\{T_0, T_1, T_2, \dots, T_{i-1}\}$ .

Чтобы повысить обнаруживающую способность управляемого вероятностного теста, необходимо обеспечить максимальное отличие формируемых тестовых наборов. Для вычисления метрик отличия двух  $m$ -разрядных тестовых наборов  $T_i$  и  $T_j$  используется расстояние Хэмминга (Hamming Distance), а также расстояние Евклида (Декарта) (Euclidean Distance) [1, 3]. Расстояние Хэмминга определяется по формуле

$$HD(T_i, T_j) = \omega(T_i \oplus T_j) = \sum_{l=0}^{m-1} (t_{i,l} \oplus t_{j,l}). \quad (1)$$

Расстояние Евклида  $ED(T_i, T_j)$  и его связь с расстоянием Хэмминга вычисляется соотношением

$$ED(T_i, T_j) = \sqrt{\sum_{l=0}^{m-1} (t_{i,l} - t_{j,l})^2} = \sqrt{\sum_{l=0}^{m-1} (t_{i,l} \oplus t_{j,l})} = \sqrt{HD(T_i, T_j)}. \quad (2)$$

Если количество тестовых наборов более двух, то для формирования следующего тестового набора  $T_i$  используются суммарные расстояния Евклида (Total Euclidean Distance TED) и Хэмминга (Total Hamming Distance – THD) [1, 2]:

$$TED(T_i) = \sum_{j=0}^{i-1} ED(T_i, T_j); THD(T_i) = \sum_{j=0}^{i-1} HD(T_i, T_j). \quad (3)$$

Исходя из определения однократного управляемого вероятностного теста, многократным управляемым вероятностным тестом  $MCRT_h$  является множество тестов, состоящее из  $h$  управляемых вероятностных тестов  $CRT_0, CRT_1, CRT_2, \dots, CRT_{h-1}$ , где исходный тест  $CRT_0$  соответствует приведенному ранее определению управляемого вероятностного теста, а последующие тесты  $CRT_j, j \in \{1, 2, 3, \dots, h-1\}$  генерируются так, чтобы удовлетворяли некоторому критерию либо критериям, полученным на основе предыдущих тестов  $CRT_0, CRT_1, CRT_2, \dots, CRT_{j-1}$  [2].

В качестве общей метрики отличия двух однократных управляемых вероятностных тестов  $CRT_k = \{T_{k,0}, T_{k,1}, T_{k,2}, \dots, T_{k,h-1}\}$  и  $CRT_l = \{T_{l,0}, T_{l,1}, T_{l,2}, \dots, T_{l,h-1}\}$  служит расстояние Миновского:

$$MD(CRT_k, CRT_l) = \sqrt[\lambda]{\sum_{i=0}^{q-1} |T_{k,i} - T_{l,i}|^\lambda}. \quad (4)$$

Если  $\lambda = 1$ , то (4) является арифметическим расстоянием  $AD(CRT_k, CRT_l)$  для двух тестов, а при  $\lambda = 2$  – расстоянием Евклида  $ED(CRT_k, CRT_l)$  [8, 9]. Отметим, что  $CRT_k$  и  $CRT_l$  являются  $p$ -ичными векторами, где  $p = 2^m$ , а их тестовые наборы  $T_{k,i}$  и  $T_{l,i}$ ,  $i \in \{1, 2, 3, \dots, q-1\}$ , представляют собой  $p$ -ичные коды. В этом случае расстояние Хэмминга  $HD(CRT_k, CRT_l)$  будет равно числу несовпадающих компонент  $T_{k,i}$  и  $T_{l,i}$ , векторов  $CRT_k$  и  $CRT_l$ . При количестве тестов, входящих в состав многократного теста, превышающем два, суммарное расстояние между тестом  $CRT_j$  и тестами  $CRT_0, CRT_1, CRT_2, \dots, CRT_{j-1}$  многократного управляемого вероятностного теста равно:

$$THD(CRT_j) = \sum_{i=0}^{j-1} HD(CRT_i, CRT_j); \quad TED(CRT_j) = \sum_{i=0}^{j-1} ED(CRT_i, CRT_j), \quad (5)$$

где  $THD(CRT_j)$  и  $TED(CRT_j)$  – суммарные расстояния Хэмминга  $AD(CRT_k, CRT_l)$  и Евклида  $ED(CRT_k, CRT_l)$ .

### Анализ применимости характеристик различия для многократного тестирования

Для анализа характеристик различия рассмотрим многократный управляемый вероятностный тест, состоящий из двух управляемых вероятностных тестов  $CRT_k$  и  $CRT_l$ . Пусть (базовый) тест  $CRT_k$  состоит из  $m$ -разрядных тестовых наборов  $T_{k,i} = t_{k,m-1}, t_{k,m-2}, \dots, t_{k,2}, t_{k,1}, t_{k,0}$ , где  $t_{k,j} \in \{0, 1\}$ , для  $j \in \{0, 1, 2, \dots, m-1\}$ . Значения тестовых наборов  $T_{l,i}$  второго теста  $CRT_l$  определим, применив ненулевую двоичную маску  $\lambda_{m-1}, \lambda_{m-2}, \dots, \lambda_1, \lambda_0$  к тестовым наборам базового теста  $T_{k,i}$ , по формуле [10]

$$T_{l,i} = t_{k,m-1}^{\lambda_{m-1}}, t_{k,m-2}^{\lambda_{m-2}}, \dots, t_{k,1}^{\lambda_1}, t_{k,0}^{\lambda_0} = (\lambda_{m-1} \oplus t_{k,m-1}), (\lambda_{m-2} \oplus t_{k,m-2}), \dots, (\lambda_1 \oplus t_{k,1}), (\lambda_0 \oplus t_{k,0}). \quad (6)$$

При этом в тех разрядах маски, где  $\lambda_j = 0$ , соответствующее значение разряда тестового набора  $t_{k,j}$  меняться не будет, и наоборот, в тех разрядах, где  $\lambda_j = 1$ , значение  $t_{k,j}$  будет меняться на противоположное. Для определения рассмотренных ранее метрик расстояния (4) определим зависимость тестовых наборов  $T_{k,i}$  и  $T_{l,i}$  тестов  $CRT_k$  и  $CRT_l$ . Как следует из теоремы [11], разность значений  $T_{k,i}$  и  $T_{l,i}$ , где  $T_{k,i} = t_{k,m-1}, t_{k,m-2}, \dots, t_{k,2}, t_{k,1}, t_{k,0}$ , при  $t_{k,j} \in \{0, 1\}$ , где  $j \in \{0, 1, 2, \dots, m-1\}$  и  $T_{l,i} = t_{k,m-1}^{\lambda_{m-1}}, t_{k,m-2}^{\lambda_{m-2}}, \dots, t_{k,1}^{\lambda_1}, t_{k,0}^{\lambda_0} = (\lambda_{m-1} \oplus t_{k,m-1}), (\lambda_{m-2} \oplus t_{k,m-2}), \dots, (\lambda_1 \oplus t_{k,1}), (\lambda_0 \oplus t_{k,0})$ , где  $g$  значений  $\lambda_\alpha, \lambda_\beta, \lambda_\gamma, \dots, \lambda_\delta$ , ( $\alpha > \beta > \gamma > \dots > \delta$ ) равно единице, а остальные  $m-g$  значений  $\lambda_k$  для  $k \neq \alpha \neq \beta \neq \gamma \neq \dots \neq \delta$ ,  $k, \alpha, \beta, \gamma, \dots, \delta \in \{0, 1, 2, \dots, m-1\}$  равно нулю, вычисляется как

$$T_{k,i} - T_{l,i} = \sum_{c \in \{\alpha, \beta, \gamma, \dots, \delta\}} (t_{k,c} - |t_{k,c} - 1|) 2^c. \quad (7)$$

Используя выражения (4) и (7) для двух тестов  $CRT_k$  и  $CRT_l$  многократного управляемого вероятностного теста, где исходный тест  $CRT_k$  сформирован из  $2^m$  случайных и неповторяющихся тестовых наборов  $T_{k,l} = t_{k,m-1}, t_{k,m-2}, \dots, t_{k,2}, t_{k,1}, t_{k,0}$ , при  $t_{k,j} \in \{0, 1\}$ , где  $j \in \{0, 1, 2, \dots, m-1\}$ , а тест  $CRT_l$  сформирован из наборов  $T_{l,i} = t_{k,m-1}^{\lambda_{m-1}}, t_{k,m-2}^{\lambda_{m-2}}, \dots, t_{k,1}^{\lambda_1}, t_{k,0}^{\lambda_0} = (\lambda_{m-1} \oplus t_{k,m-1}), (\lambda_{m-2} \oplus t_{k,m-2}), \dots, (\lambda_1 \oplus t_{k,1}), (\lambda_0 \oplus t_{k,0})$ , где  $g$  значений  $\lambda_\alpha, \lambda_\beta, \lambda_\gamma, \dots, \lambda_\delta$ , ( $\alpha > \beta > \gamma > \dots > \delta$ ) равно единице, арифметическое расстояние  $AD(CRT_k, CRT_l)$  равно

$$AD(CRT_k, CRT_l) = 2^{m+\alpha}, \quad (8)$$

а расстояние Евклида  $ED(CRT_k, CRT_l)$  определяется по формуле

$$ED(CRT_k, CRT_l) = \sqrt[2^{m-g}]{\sum_{t_{k,\alpha} \dots t_{k,\gamma} t_{k,\delta} = 00 \dots 00}^{1 \dots 11} [(t_{k,\alpha} - \overline{t_{k,\alpha}}) 2^\alpha + \dots + (t_{k,\gamma} - \overline{t_{k,\gamma}}) 2^\gamma + (t_{k,\delta} - \overline{t_{k,\delta}}) 2^\delta]^2}. \quad (9)$$

Расстояние Евклида, согласно (9), зависит от всех ненулевых компонент вектора отрицаний  $\lambda_{m-1}, \lambda_{m-2}, \dots, \lambda_1, \lambda_0$ . Нетрудно показать, что с ростом количества ненулевых компонент вектора отрицаний, а также индекса старшей ненулевой компоненты  $\alpha$ , значение метрики расстояния  $ED(CRT_k, CRT_l)$  возрастает. Действительно, предположив, что количество

отрицаний ненулевых компонент вектора  $\lambda_{m-1}, \lambda_{m-2}, \dots, \lambda_1, \lambda_0$  увеличивается на одно отрицание  $\lambda_{\mu} = 1$ , получим новые значения слагаемых, которыми являются тестовые наборы  $T_{k,i}$  и  $T_{l,i}$ , в выражении (4). Соответствующие утверждения подтверждаются в табл. 1 численными значениями указанных метрик расстояния для всевозможных векторов отрицания  $\lambda_2, \lambda_1, \lambda_0 \neq 0, 0, 0$  при получении согласно (6) теста  $CRT_l$  и произвольного исходного теста  $CRT_k = \beta_2\beta_1\beta_0$ .

Таблица 1. Значения метрик отличия для трехразрядных тестовых наборов

$CRT_k = \beta_2\beta_1\beta_0$	$CRT_l$						
	$\beta_2\beta_1\bar{\beta}_0$	$\beta_2\bar{\beta}_1\beta_0$	$\beta_2\bar{\beta}_1\bar{\beta}_0$	$\bar{\beta}_2\beta_1\beta_0$	$\bar{\beta}_2\beta_1\bar{\beta}_0$	$\bar{\beta}_2\bar{\beta}_1\beta_0$	$\bar{\beta}_2\bar{\beta}_1\bar{\beta}_0$
$AD(CRT_k, CRT_l)$	8	16	16	32	32	32	32
$ED(CRT_k, CRT_l)$	$\sqrt{8}$	$\sqrt{32}$	$\sqrt{40}$	$\sqrt{128}$	$\sqrt{136}$	$\sqrt{160}$	$\sqrt{168}$

С учетом приведенных рассуждений целесообразным представляется применение арифметического расстояния  $AD(CRT_k, CRT_l)$  и расстояния Евклида  $ED(CRT_k, CRT_l)$  для целей построения многократных управляемых вероятностных тестов.

### Экспериментальный анализ многократных управляемых тестов

В качестве экспериментальных исследований проведена оценка обнаруживающей способности двукратного теста MATS+ кодочувствительных неисправностей PPSF5 для различных модификаций второй адресной последовательности  $CRT_1$ , сформированной на основе исходной адресной последовательности  $CRT_0$ . В качестве объекта исследований использовалось запоминающее устройство емкостью  $2^6$  бит, а модификации  $CRT_0$  выполнялись в соответствии с выражением (6) в зависимости от двоичного вектора  $\lambda_5\lambda_4\lambda_3\lambda_2\lambda_1\lambda_0$ . Результаты исследований приведены в табл. 2.

Таблица 2. Полнота покрытия двукратного теста запоминающего устройства

$\lambda_5\lambda_4\lambda_3\lambda_2\lambda_1\lambda_0$	011111	011100	011011	011010	010100	010011	010000
Полнота покрытия неисправностей PPSF5, %	12,07	11,90	11,85	11,77	11,16	11,02	10,67
$AD(CRT_0, CRT_1)$	$2^{6+4}$	$2^{6+4}$	$2^{6+4}$	$2^{6+4}$	$2^{6+4}$	$2^{6+4}$	$2^{6+4}$
$ED(CRT_0, CRT_1)$	147,73	146,64	144,22	144,00	131,93	129,24	128,00
$\lambda_5\lambda_4\lambda_3\lambda_2\lambda_1\lambda_0$	000111	000110	000101	000100	000011	000010	000001
Полнота покрытия неисправностей PPSF5, %	8,63	8,33	8,00	7,69	7,35	6,99	6,58
$AD(CRT_0, CRT_1)$	$2^{6+2}$	$2^{6+2}$	$2^{6+2}$	$2^{6+2}$	$2^{6+1}$	$2^{6+1}$	$2^{6+0}$
$ED(CRT_0, CRT_1)$	36,66	35,78	32,98	32,00	17,88	16,00	8,00

Приведенные результаты подтверждают работоспособность метрик  $AD(CRT_0, CRT_1)$  и  $ED(CRT_0, CRT_1)$ . Полнота покрытия кодочувствительных неисправностей PPSF5 возрастает с ростом метрик отличия  $AD(CRT_0, CRT_1)$  и  $ED(CRT_0, CRT_1)$ . Критерием выбора необходимого количества адресных последовательностей и их вида является максимальное расстояние  $ED(CRT_0, CRT_1)$ , которое должны иметь эти последовательности.

Таким образом, основная идея многократного управляемого вероятностного тестирования состоит в генерировании начального, базового управляемого вероятностного теста, а следующие модификации базового теста, входящие в состав многократного теста, строятся на основе простейших операций над тестовыми наборами, не требующих значительных вычислительных затрат.

### Заключение

Рассмотрена концепция многократного управляемого вероятностного тестирования. Проведен анализ существующих решений и рассмотрен формальный метод генерирования многократных управляемых тестов. Показана эффективность применения Евклидова расстояния для целей построения многократных тестов, которая подтверждается экспериментальными результатами.



## Список литературы

1. An Orchestrated Surveyan Automated Software Test Case Generation / S. Anand [et al.] // J. of Systems and Software. 2014. Vol. C–39, № 4. P. 572–576.
2. Ярмолик В.Н., Леванцевич В.А., Мрозек И. Многократные управляемые вероятностные тесты // Информатика. 2015. № 2 (9). С. 46–60.
3. Malaiya Y.K., Yang D. The coverage problem for random testing // Proceedings of ITC. 1984. P. 237–242.
4. Ярмолик С.В., Ярмолик В.Н. Управляемые вероятностные тесты // Автоматика и телемеханика. 2012. № 10. С. 142–155.
5. Mrozek I., Yarmolik V. Multiple Controlled Random Testing // Fundamenta Informaticae. 2016. Vol. 144, No. 1. P. 23–43.
6. Antirandom Testing: A Distance-Based Approach / S.H. Wu [et al.] // VLSI Design. 2008. № 2. P. 1–9.
7. Ярмолик С.В., Ярмолик В.Н. Управляемое случайное тестирование // Информатика. 2011. № 1 (29). С. 79–88.
8. Mrozek I., Yarmolik V. Method for Generation Multiple Controlled Random Tests // Proc. of the Computer Information Systems and Industrial Management (CISIM 2016). Vilnius, 2016. P. 429–440.
9. Ярмолик С.В., Ярмолик В.Н. Обнаружение кодочувствительных неисправностей запоминающих устройств с многократным использованием маршевых тестов // Информатика. 2006. № 1 (9). С. 104–129.
10. Ярмолик С.В., Занкович А.П., Иванюк А.А. Маршевые тесты для самотестирования ОЗУ. Минск: Издательский центр БГУ, 2009. 270 с.
11. Ярмолик С.В., Ярмолик В.Н. Многократные неразрушающие маршевые тесты с изменяемыми адресными последовательностями // Автоматика и телемеханика. 2007. № 4. С. 126–137.

## References

1. An Orchestrated Surveyan Automated Software Test Case Generation / S. Anand [et al.] // J. of Systems and Software. 2014. Vol. C–39, № 4. P. 572–576.
2. Jarmolik V.N., Levancevich V.A., Mrozek I. Mnogokratnye upravljaemye verojatnostnye testy // Informatika. 2015. № 2 (9). S. 46–60. (in Russ.)
3. Malaiya Y.K., Yang D. The coverage problem for random testing // Proceedings of ITC. 1984. P. 237–242.
4. Jarmolik S.V., Jarmolik V.N. Upravljaemye verojatnostnye testy // Avtomatika i telemehanika. 2012. № 10. S. 142–155. (in Russ.)
5. Mrozek I., Yarmolik V. Multiple Controlled Random Testing // Fundamenta Informaticae. 2016. Vol. 144, No. 1. P. 23–43.
6. Antirandom Testing: A Distance-Based Approach / S.H. Wu [et al.] // VLSI Design. 2008. № 2. P. 1–9.
7. Jarmolik S.V., Jarmolik V.N. Upravljaemoe sluchajnoe testirovanie // Informatika. 2011. № 1 (29). S. 79–88. (in Russ.)
8. Mrozek I., Yarmolik V. Method for Generation Multiple Controlled Random Tests // Proc. of the Computer Information Systems and Industrial Management (CISIM 2016). Vilnius, 2016. P. 429–440.
9. Jarmolik S.V., Jarmolik V.N. Obnaruzhenie kodochnuvstvitel'nyh neispravnostej zapominajushhih ustrojstv s mnogokratnym ispol'zovaniem marshevyyh testov // Informatika. 2006. № 1 (9). S. 104–129. (in Russ.)
10. Jarmolik S.V., Zankovich A.P., Ivanjuk A.A. Marshevye testy dlja samotestirovanija OZU. Minsk: Izdatel'skij centr BGU, 2009. 270 s. (in Russ.)
11. Jarmolik S.V., Jarmolik V.N. Mnogokratnye nerazrushajushhie marshevye testy s izmenjaemymi adresnymi posledovatel'nostjami // Avtomatika i telemehanika. 2007. № 4. S. 126–137. (in Russ.)

## Сведения об авторах

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

Леванцевич В.А., старший преподаватель Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

## Information about the authors

Yarmolik V.N., D.Sci, professor of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Levantsevich V.A., senior lecturer of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

## Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,  
г. Минск, ул. П. Бровки, 6,  
Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники  
тел. +375-17-293-84-63;  
e-mail: lvn@bsuir.by  
Леванцевич Владимир Александрович

## Address for correspondence

20013, Republic of Belarus,  
Minsk, P. Brovki, 6,  
Belarusian state university  
of informatics and radioelectronics  
Tel. +375-17-293-84-63;  
e-mail: lvn@bsuir.by  
Levantsevich Vladzimir Aleksandrovich

УДК 519.213:006.91

## ИЗДЕЛИЯ СИЛОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ, ДАТЧИКИ, БИОМЕДИЦИНСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

В.В. БАРАНОВ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь*

*Поступила в редакцию 25 февраля 2019*

**Аннотация.** Приведены обзорные результаты исследований характеристик диодов Шоттки с улучшенными параметрами, разработанных датчиков контроля жидких сред и принципиальные аспекты, связанные с биорезонансными эффектами.

*Ключевые слова:* диод Шоттки, датчик жидких сред, биорезонансный эффект.

**Abstract.** Diodes Schottky characteristics, sensors of liquid media and principal aspects connected with bioresonans effects are described.

*Keywords:* diode Schottky, sensor of liquid media, bioresonans effect.

**Doklady BGUIR. 2019, Vol. 121, No. 3, pp. 70-75**  
**Schottky diodes, sensors, biomedical technologies**  
**V.V. Baranov**

### Введение

Общая концепция технологии интегрированных в твердотельные структуры пленочных токопроводящих систем (ИПС) для интегральных микросхем и дискретных изделий полупроводниковой силовой электроники предполагает использование многослойных структур, в которых имеются контактные слои (КС), выполненные, например, из многокомпонентных материалов, барьерные слои (БС), токопроводящие слои (ТС) и др. [1].

Основу материала КС диодов Шоттки составляет силицидобразующий металл, выбираемый из группы переходных металлов (Pt, Re, Pd, Ni, Ti, Co и др.), а вводимые в нее ингредиенты должны иметь близкие физико-химические свойства и обладать способностью целенаправленного модифицирования состава, структуры и свойств КС [1]. Кроме этого, использование многокомпонентных материалов позволяет формировать на границе КС – Si переходный слой, обладающий определенными физико-химическими и электрофизическими характеристиками: фазовым составом, структурой, протяженностью, электрофизическими ( $\rho_k$ ,  $\varphi_b$ ). Величины  $\rho_k$  – удельное переходное контактное сопротивление ( $\text{Ом}\cdot\text{см}^2$ ) и  $\varphi_b$  – высота энергетического барьера контакта металл/Si (эВ) определяют основные электрические характеристики твердотельных структур диодов Шоттки, а также мощных ДМОП транзисторов (MOSFET).

Актуальным вопросом также является разработка датчиков контроля жидких сред, среди которых наиболее эффективными являются датчики емкостного типа для различных жидких сред, например, моторных масел.

Также автором за последнее пятилетие проводились работы в направлении развития биомедицинских технологий, основанные на исследовании биорезонансных эффектов и определении индивидуальной характеристической частоты человека (ИХЧ), лежащей в области частот 40–75 ГГц.

## Экспериментальные исследования и обсуждение результатов

На рис. 1 в качестве примера приведена ячейка мощного вертикального ДМОП транзистора, которых на одном кристалле может насчитываться свыше 800 единиц, а на рис. 2 – оптимальная структура диодов Шоттки с учетом полученных результатов исследования структуры и электрических параметров приборов.

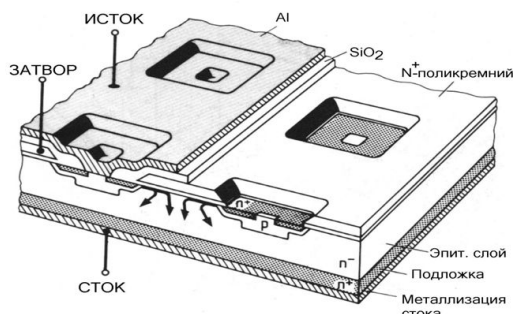


Рис. 1. Ячейка кристалла вертикального ДМОП транзистора

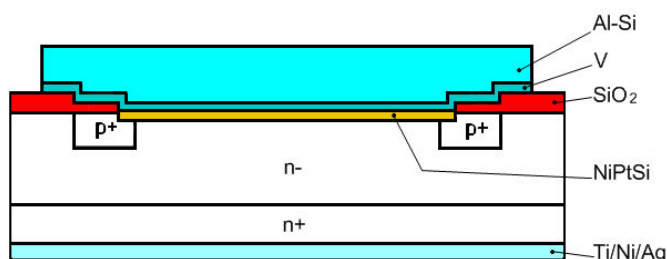


Рис. 2. Диод Шоттки с углублением в эпитаксиальном слое

Для диодов Шоттки принципиальным аспектом структуры является формирование однородной границы раздела металл (силицид) / кремний. В этой связи автором предложен способ формирования таких твердотельных структур, в котором использована двухстадийная термообработка [2]. При этом большое значение имеет качество обработки поверхности пластин кремния [3], а также оптимизация режимов технологических процессов [4]. На рис. 3 приведена микрофотография скола кристалла диода Шоттки на примере КС Si/PtSi [5].

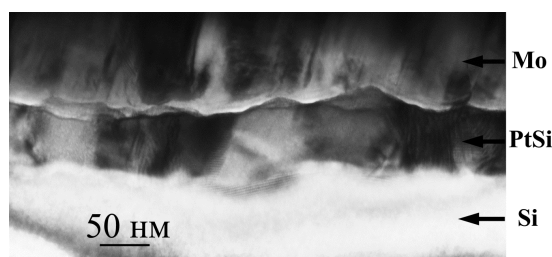


Рис. 3. Микрофотография скола твердотельной структуры диода Шоттки типа PtSi/Si

В качестве контролируемого параметра моторных масел в настоящее время используется величина тангенса угла диэлектрических потерь ( $\text{tg}\delta$ ).

Ранее исследованы зависимости  $\text{tg}\delta$  масла марки M14B2 с использованием конструкции конденсатора с плоскопараллельными никелевыми пластинами [4, 5].

В настоящей работе использованы дополнительно иные разновидности емкостных датчиков (на рис. 4 показаны в центре и справа):

- плоскопараллельный конденсатор, в качестве обкладок которого использовалась сетка с ячейкой  $1 \times 1$  мм. Сетка представляет собой стальной каркас, гальванически покрытый цинком;
- конденсатор с коаксиальными спиралевидными медными обкладками.

Недостаток ранее использованного датчика – анизотропия скорости смены диэлектрической среды (масла) между сплошными обкладками в процессе измерения относительно осей координат обкладок. По осям X, Y смена масла проблем не вызывает,

а по оси Z, перпендикулярной плоскости X-Y, замена масла затруднена. Вследствие повышенного сопротивления протекания масла, повышаются требования к жесткости конструкции датчика, а также возникает временная задержка при считывании показаний. Для снятия затруднений проточности масел по трем пространственным осям X-Y-Z существенные преимущества имеет сетчатый и в большей степени спиралевидный датчики.

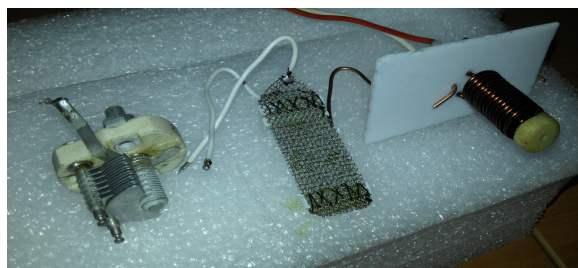


Рис. 4. Общий вид разработанных емкостных датчиков

Измерения  $\text{tg}\delta$  проводили с использованием прибора E7-25 производства Республики Беларусь (МНИПИ). Прибор позволяет регистрировать значения  $\text{tg}\delta$  при величине измерительного синусоидального сигнала 700 и 40 мВ, а также величины эквивалентных сопротивлений и емкостей для последовательных и параллельных вариантов их соединения.

В диапазоне частот 25 Гц – 1 кГц значения  $\text{tg}\delta$  находятся в пределах 0,25–0,025 и убывают с ростом частоты обратно пропорционально.

Характерно, что численные значения  $\text{tg}\delta$  для всех использованных конструкций датчиков отличаются друг от друга не более чем на 5 %. Полученные результаты, по мнению автора, связаны со следующим. В общем случае величина заряда, накопленного в конденсаторе, может быть отображена следующим образом:

$$Q = CU = \varepsilon_0 \varepsilon \int E dS. \quad (1)$$

Формальное определение величины тока в цепи отображается таким образом:

$$I = U/R = \sigma \int E dS. \quad (2)$$

Разделив (1) на (2), получим:

$$RC = \varepsilon_0 \varepsilon / \sigma. \quad (3)$$

Произведение RC входит в формулу для определения величины  $\text{tg}\delta$  и, как видно из (3), никак не связано с геометрическими размерами датчиков, а определяется лишь диэлектрической проницаемостью ( $\varepsilon$ ) и электропроводимостью ( $\sigma$ ) масла. Незначительные отличия показаний датчиков связаны с краевыми эффектами, которые в вышеприведенных формулах не учитываются. В качестве рабочей гипотезы принимаем, что моторное масло со сроком эксплуатации 907,2 часа имеет также предельно допустимые параметры [3]. На рис. 5 представлена зависимость  $\text{tg}\delta$  масла марки M14B2 от частоты генератора схемы измерения.

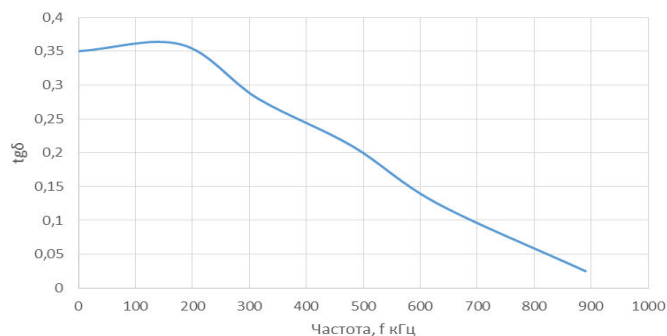


Рис. 5. Зависимость величины диэлектрических потерь в маслах от частоты зондирующего сигнала

Как видно из рис. 5, в диапазоне частот от 25 Гц до 1 кГц значения  $\text{tg}\delta$  для всех проб уменьшаются обратно пропорционально частоте генератора в схеме измерения. Из этих

графиков не следует, но расчеты показывают, что изменение  $\text{tg}\delta$ , в зависимости от срока эксплуатации проб масел, хорошо различимо и имеет разброс более 50 % от максимальных до минимальных значений  $\text{tg}\delta$  в диапазоне частот от 25 Гц до 1 кГц.

Графики для проб свежего масла и со сроком эксплуатации 200 моточасов практически сливаются на частотах свыше 1 кГц. Изменения заметны начиная лишь с третьей пробы масла (320 моточасов – около трети регламентного срока эксплуатации).

На рис. 6 представлена зависимость  $\text{tg}\delta$  от температуры проб моторного масла при частоте измерения с помощью емкостных датчиков 1 кГц.

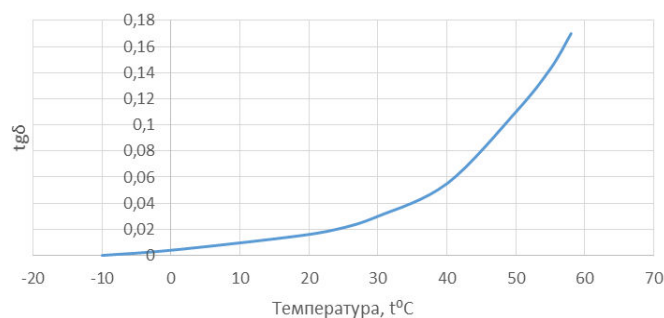


Рис. 6. Зависимость величины  $\text{tg}\delta$  пробы моторного масла от температуры

Из рис. 6 следует: при повышении температуры пробы масла величина  $\text{tg}\delta$  повышается, по оценкам, по экспоненциальному закону, что соответствует общим физическим представлениям о характеристиках жидких диэлектриков [6–8].

Также установлено, что при увеличении времени наработки масла величина  $\text{tg}\delta$  уменьшается по нелинейному закону. В диапазоне времени наработки до 200 часов наблюдается незначительный, в пределах 10 %, рост значения параметра  $\text{tg}\delta$ , вероятно обусловленный испарением адсорбированной влаги. После чего значение  $\text{tg}\delta$  уменьшается по мере наработки моточасов. При наработке в 600 часов значение  $\text{tg}\delta$  уменьшается более чем вдвое по сравнению с исходной величиной, что можно рассматривать, как достаточно информативный параметр [8].

Используя методику вегетативной резонансной терапии (ВРТ), которая основана на использовании явлений резонанса, интерференции, принципа суперпозиции, отвечая на вопросы: «Что?», «Где?», «Причина?» и подбирая терапию, возможно проводить диагностику хронических заболеваний на микроволновом уровне (рис. 7).

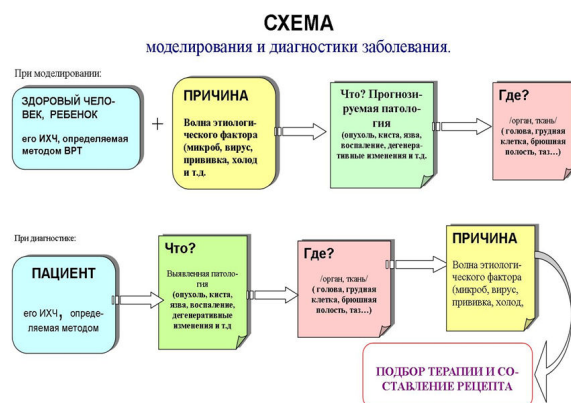


Рис. 7. Схема моделирования и диагностики заболеваний

Терапевтические мероприятия возможны при воздействии на пациента одной из используемых диагностических сред. На практике же лучше использовать парафин, который приобретает требуемые качества после воздействия на него в жидком виде микроволнового излучения соответствующей ИХЧ пациента частоты облучения от генератора СВЧ с рупорной антенной. При этом облучение пробы ведется до полного затвердевания среды [9–14].

Также автором проводились исследования по технологии синтеза пленок эвтектического состава системы GaSb–MnSb и их электрических и магнитных свойств [15].

Показано, что технология синтеза таких пленок имеет высокую воспроизводимость, несмотря на сложный состав материала и необходимость его строгого поддержания для достижения требуемых электрических и магнитных свойств с целью применения в изделиях электронной техники.

### Заключение

Приведены результаты исследований твердотельных структур типа планарных диодов Шоттки, моторных масел и характеристик таких диагностических сред для определения индивидуальной характеристической частоты человека, как дистиллированная вода и парафин, которые являются чувствительными к облучению СВЧ излучением низкой интенсивности (менее  $10^{-3}$  Вт/см<sup>2</sup>), а также схема диагностики хронических заболеваний человека, основанная на использовании указанных диагностических сред, предварительно находящихся в контакте с пациентом либо подвергнутых воздействию микроволнового излучения на определенной частоте.

### Список литературы

1. Баранов В.В. Приборы твердотельной электроники, тестирование, измерения. Биомедицинские диагностические технологии // Докл. БГУИР. 2014. № 2 (80). С. 23–31.
2. Способ изготовления диода Шоттки: пат. № 027357 EU / А.С. Турцевич, Я.А. Соловьев, О.Э. Сарычев, В.В. Баранов; опубл. 31.07.2017.
3. Оборудование и технологии удаления загрязнений с поверхности кремниевых пластин / В.В. Баранов [и др.] // Материалы 10-й Междунар. науч.-техн. конф. «Приборостроение-2017». Минск, 2017. С. 293–295.
4. Статистический анализ и оптимизация параметров технологии изготовления биполярного транзистора с изолированным затвором / В.В. Баранов [и др.] // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2015. № 1. С. 38–43.
5. Интегрированные пленочные системы в твердотельных структурах диодов Шоттки / В.В. Баранов [и др.] // Материалы Междунар. науч.-техн. конф., приуроченной к 50-летию МРТИ–БГУИР. Минск, 18–19 марта 2014. Ч. 2. С. 56–57.
6. Баранов В.В., Петрович В.А., Редько С.В. Частотные характеристики многослойных структур металл / диэлектрик // Материалы Междунар. науч.-техн. конф., приуроченной к 50-летию МРТИ–БГУИР. Минск, 18–19 марта 2014. Ч. 2. С. 30–31.
7. Датчики контроля электрофизических свойств жидких диэлектриков / А.И. Кузьмич [и др.] // Труды XVIII Междунар. науч.-практ. конф. «Современные информационные и электронные технологии». Одесса, 2017. С. 52–53.
8. Диэлектрические характеристики моторных масел для силовых агрегатов, измеряемые емкостными датчиками / И.В. Батурля [и др.] // Докл. БГУИР. 2016. № 3 (97). С. 103–106.
9. Medical diagnostic and therapy methods on the basis of bio-resonance effects / V. Baranov [et al.] // Материалы Междунар. науч.-техн. конф., приуроченной к 50-летию МРТИ–БГУИР. Минск, 18–19 марта 2014. Ч. 2. С. 141–142.
10. Аппаратно-программный комплекс для исследования и определения собственной характеристической частоты органических, неорганических и биологических объектов / В.В. Баранов [и др.] // Сб. материалов IX Междунар. науч.-техн. конф. «Медэлектроника». Минск, 10–11 декабря 2014. С. 156–158.
11. Формирование базы данных хронических заболеваний и исследование характеристик диагностических сред, подвергнутых КВЧ облучению / В.В. Баранов [и др.] // Сб. материалов IX Междунар. науч.-техн. конф. «Медэлектроника». Минск, 10–11 декабря 2014. С. 159–161.
12. Определение характеристик диагностических сред, подвергнутых КВЧ облучению, и способы обработки оптических образов биологических объектов / В.В. Баранов [и др.] // Сб. материалов IX Междунар. науч.-техн. конф. «Медэлектроника». Минск, 10–11 декабря 2014. С. 223–226.
13. Диагностика хронических заболеваний человека на основе биорезонансных эффектов / В.В. Баранов [и др.] // Сб. материалов IX Междунар. науч.-техн. конф. «Медэлектроника». Минск, 10–11 декабря 2014. С. 226–228.
14. Характеристики диагностических сред, используемых для определения индивидуальной характеристической частоты человека / В.В. Баранов [и др.] // Сб. материалов X Междунар. науч.-техн. конф. «Медэлектроника». Минск, 8–9 декабря 2016. С. 70–73.
15. Синтез, электрические и магнитные свойства пленок эвтектического состава системы GaSb–MnSb / С.Ф. Маренкин [и др.] // Докл. БГУИР. 2016. № 5 (99). С. 5–10.

## References

1. Baranov V.V. Pribory tverdotel'noj jelektroniki, testirovanie, izmerenija. Biomedicinskie diagnosticheskie tehnologii // Dokl. BGUIR. 2014. № 2 (80). S. 23–31. (in Russ.)
2. Sposob izgotovlenija dioda Shottki: pat. № 027357 EU / A.S. Turcevich, Ja.A. Solov'ev, O.Je. Sarychev, V.V. Baranov; opubl. 31.07.2017. (in Russ.)
3. Oborudovanie i tehnologii udalenija zagraznenij s poverhnosti kremnievyh plastin / V.V. Baranov [i dr.] // Materialy 10-j Mezhdunar. nauch.-tehn. konf. «Priborostroenie-2017». Minsk, 2017. S. 293–295. (in Russ.)
4. Statisticheskij analiz i optimizacija parametrov tehnologii izgotovlenija bipoljnarnogo tranzistora s izolirovannym zatvorom / V.V. Baranov [i dr.] // Tehnologija i konstruirovanie v jelektronnoj apparature. 2015. № 1. S. 38–43. (in Russ.)
5. Integrirovannye plenochnye sistemy v tverdotel'nyh strukturah diodov Shottki / V.V. Baranov [i dr.] // Materialy Mezhdunar. nauch.-tehn. konf., priurochennoj k 50-letiju MRTI–BGUIR. Minsk, 18–19 marta 2014. Ch. 2. S. 56–57. (in Russ.)
6. Baranov V.V., Petrovich V.A., Red'ko S.V. Chastotnye karakteristiki mnogoslojnyh struktur metall / dijelektrik // Materialy Mezhdunar. nauch.-tehn. konf., priurochennoj k 50-letiju MRTI–BGUIR. Minsk, 18–19 marta 2014. Ch. 2. S. 30–31. (in Russ.)
7. Datchiki kontrolja jelektrofizicheskikh svojstv zhidkikh dijelektrikov / A.I. Kuz'mich [i dr.] // Trudy XVIII Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. «Sovremennye informacionnye i jelektronnye tehnologii». Odessa, 2017. S. 52–53. (in Russ.)
8. Dijelektricheskie karakteristiki motornyh masel dlja silovyh agregatov, izmerjaemye emkostnymi datchikami / I.V. Baturlja [i dr.] // Dokl. BGUIR. 2016. № 3 (97). S. 103–106. (in Russ.)
9. Medical diagnostic and therapy methods on the basis of bio-resonance effects / V. Baranov [et al.] // Materialy Mezhdunar. nauch.-tehn. konf., priurochennoj k 50-letiju MRTI–BGUIR. Minsk, 18–19 marta 2014. Ch. 2. S. 141–142.
10. Apparato-programmnyj kompleks dlja issledovanija i opredelenija sobstvennoj karakteristicheskoy chastoty organicheskikh, neorganicheskikh i biologicheskikh ob'ektov / V.V. Baranov [i dr.] // Sb. materialov IX Mezhdunar. nauch.-tehn. konf. «Medjelektronika». Minsk, 10–11 dekabnja 2014. S. 156–158. (in Russ.)
11. Formirovanie bazy dannyh hronicheskikh zabojevanij i issledovanie karakteristik diagnosticheskikh sred, podvergnutyh KVCh oblucheniju / V.V. Baranov [i dr.] // Sb. materialov IX Mezhdunar. nauch.-tehn. konf. «Medjelektronika». Minsk, 10–11 dekabnja 2014. S. 159–161. (in Russ.)
12. Opredelenie karakteristik diagnosticheskikh sred, podvergnutyh KVCh oblucheniju, i sposoby obrabotki opticheskikh obrazov biologicheskikh ob'ektov / V.V. Baranov [i dr.] // Sb. materialov IX Mezhdunar. nauch.-tehn. konf. «Medjelektronika». Minsk, 10–11 dekabnja 2014. S. 223–226. (in Russ.)
13. Diagnostika hronicheskikh zabojevanij cheloveka na osnove biorezonansnyh jeffektov / V.V. Baranov [i dr.] // Sb. materialov IX Mezhdunar. nauch.-tehn. konf. «Medjelektronika». Minsk, 10–11 dekabnja 2014. S. 226–228. (in Russ.)
14. Karakteristiki diagnosticheskikh sred, ispol'zuemyh dlja opredelenija individual'noj karakteristicheskoy chastoty cheloveka / V.V. Baranov [i dr.] // Sb. materialov H Mezhdunar. nauch.-tehn. konf. «Medjelektronika». Minsk, 8–9 dekabnja 2016. S. 70–73. (in Russ.)
15. Sintez, jelektricheskie i magnitnye svojstva plenok jevtekticheskogo sostava sistemy GaSb–MnSb / S.F. Marenkin [i dr.] // Dokl. BGUIR. 2016. № 5 (99). S. 5–10. (in Russ.)

### Сведения об авторе

Баранов В.В., д.т.н., профессор кафедры проектирования информационно-компьютерных систем Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

### Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,  
г. Минск, ул. П. Бровки, 6  
Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники  
тел. +375-17-293-89-40;  
e-mail: vvb@bsuir.by  
Баранов Валентин Владимирович

### Information about the author

Baranov V.V., D.Sci, professor of information-computer systems design department of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

### Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,  
Minsk, P. Brovka st., 6,  
Belarusian state university  
of informatics and radioelectronics  
tel. +375-17-293-89-40;  
e-mail: vvb@bsuir.by  
Baranov Valentin Vladimirovich

УДК 621.396.218:614.89.086.5

## АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ ЛОКАЛЬНЫХ ГРУППИРОВОК РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

В.И. МОРДАЧЕВ, Е.В. СИНЬКЕВИЧ, Д.А. ЦИОНЕНКО, Е.Е. ОРЛОВ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь*

*Поступила в редакцию 25 января 2019*

**Аннотация.** Развита итерационная технология компьютерного анализа и диагностики электромагнитной совместимости (ЭМС) радиооборудования сложных бортовых и локальных наземных радиоэлектронных комплексов. На первом этапе анализа и диагностики ЭМС выявляется совокупность потенциально опасных путей распространения помех с использованием широкополосной аналитической модели наихудшего случая, разработанной в рамках программы IEMCAP для расчета паразитных связей между антеннами радиосредств. На втором этапе разрабатываются уточненные модели наихудшего случая для выявленных потенциально опасных путей распространения помех и производится повторная диагностика ЭМС с их использованием. Завершающим этапом является дискретный нелинейный анализ ЭМС, выполняемый с использованием моделей нелинейности высоких порядков и избирательности радиоприемников, полученных по результатам их испытаний методом двухчастотного зондирования. Применение разработанной технологии обеспечивает высокую эффективность анализа ЭМС, что подтверждено при решении практических задач диагностики ЭМС бортовых систем и сложных наземных радиотехнических объектов, включающих радиооборудование диапазонов ВЧ, ОВЧ, УВЧ и СВЧ.

**Ключевые слова:** электромагнитная совместимость, электромагнитные помехи, модели наихудшего случая, электромагнитная связь, интермодуляция.

**Abstract.** The technique for step-by-step computer-based analysis and diagnostics of electromagnetic compatibility (EMC) of radioequipment of complex on-board and local ground systems is improved. At the first stage of the analysis and diagnostics of EMC, all potentially dangerous paths of interference propagation are identified with the use of the broadband analytical worst-case model developed within IEMCAP program; the model allows to calculate spurious couplings between antennas of radioequipment. At the second stage, improved worst-case models for the potentially-dangerous interference propagation paths identified before development, and EMC analysis is performed iteratively on the basis of the refined models. The final stage is the discrete nonlinear EMC analysis, which is made using the high order nonlinearity models and radioreceivers' selectivity models obtained on the basis of the results of double-frequency testing of radioreceivers. The use of the developed technique makes it possible to achieve high efficiency of EMC analysis; this is proved by performing diagnostics of EMC for real-world on-board and local ground systems containing a set of HF, VHF, UHF and SHF radio equipment.

**Keywords:** electromagnetic compatibility, electromagnetic interference, worst-case models, electromagnetic coupling, intermodulation.

**Doklady BGUIR. 2019, Vol. 121, No. 3, pp. 76-88**

**Analysis of electromagnetic compatibility in local complexes of radioequipment**

**V.I. Mordachev, E.V. Sinkevich, D.A. Tsyantenka, Y.Y. Arlou**

### Введение

Работоспособность и эффективность функционирования множества радиоэлектронных средств (РЭС) различного назначения, образующих сложные бортовые и наземные радиоэлектронные и радиотехнические системы, комплексы, объекты и т. п. (локальные группировки РЭС), в значительной мере определяется их электромагнитной совместимостью (ЭМС).



Компьютерный анализ внутрисистемной и межсистемной ЭМС является важнейшей и неотъемлемой частью проектирования и обеспечения нормальной эксплуатации группировок РЭС, позволяющей своевременно обнаруживать и устранять потенциально опасные паразитные электромагнитные (ЭМ) связи между их элементами и нежелательное воздействие внешних источников ЭМ полей (ЭМП) на эти элементы. Внедрение методов компьютерного моделирования для анализа и диагностики ЭМС локальных группировок РЭС позволяет автоматизировать не только выявление потенциально опасных ЭМ связей между элементами систем, но и подбор адекватных защитных решений с проверкой их эффективности, что существенно уменьшает либо полностью исключает потери, связанные с ограничением функциональности и снижением эффективности функционирования группировок РЭС в сложной электромагнитной обстановке (ЭМО), обусловленной воздействием внутрисистемных и межсистемных помех различного происхождения.

Выполнение компьютерной диагностики ЭМС локальной группировки (ЛГ) РЭС, как правило, связано с необходимостью многовариантного анализа опасности ЭМ связей между входящим в нее оборудованием, т. е. с выполнением анализа множества различных вариантов размещения и режимов работы радиоэлектронного оборудования ЛГ, реализации защитных мер, характеристик внешней ЭМО и т. п. Например, анализ различных вариантов размещения антенн на корпусе мобильного объекта призван обеспечить выбор варианта с наименьшими паразитными ЭМ связями между антеннами для всех возможных видов подстилающей поверхности, в том числе поверхности с высокой проводимостью. На практике требуется проанализировать десятки или даже сотни вариантов реализации и применения ЛГ, поэтому особую актуальность приобретает снижение продолжительности анализа ЭМС каждого варианта.

При обнаружении и идентификации паразитных ЭМ связей между элементами ЛГ, а также линейных и нелинейных помех работе радиоприемников (РП) ЛГ целесообразна ориентация на пессимистические оценки ЭМС, допускающие ошибки 1 рода («ложная тревога»), но исключающие ошибки 2 рода («ошибочное необнаружение»). Цена ошибок 2 рода многократно выше, поскольку их приходится устранять на последующих этапах жизненного цикла ЛГ либо мириться с ограничением работоспособности и ухудшением характеристик элементов ЛГ из-за присутствия помех в реальных условиях эксплуатации.

Наиболее сложными проблемами компьютерной диагностики ЭМС ЛГ РЭС являются:

– отсутствие полной и достоверной информации о характеристиках оборудования ЛГ, например, информации о спектрах излучений радиопередатчиков (РПД), характеристиках восприимчивости РП, конструкциях антенн и фидерных трактов, характеристиках экранирования кабелей и корпусов оборудования и т. п., как на стадии проектирования, так и при изменении условий функционирования ЛГ РЭС;

– большое количество требующих анализа паразитных ЭМ связей ( $10^2$ – $10^4$  и более), внешних ЭМ воздействий ( $10^2$ – $10^4$  и более), а также вариантов реализации и применения ЛГ РЭС ( $10^1$ – $10^3$ ) и связанные с этим высокие трудоемкость, стоимость и вычислительные затраты.

Эффективным методом преодоления указанных проблем является использование аналитических моделей наихудшего случая для описания паразитных ЭМ связей между элементами ЛГ, которые предложены в рамках научно-технической программы ИЕМСАР [1–3], а также применение системных энергетических критериев ЭМС и процедур дискретного анализа передаточных характеристик этих связей на ограниченном множестве отсчетов в частотной области. Этот метод позволяет выполнить первичный пессимистический анализ помех с учетом всех возможных паразитных связей между элементами ЛГ и опасности воздействия внешних ЭМП при приемлемых вычислительных затратах. В результате такого анализа удастся выявить потенциально опасные паразитные связи (количество которых существенно меньше общего числа ЭМ связей), подлежащие детальному анализу с использованием более точных моделей либо экспериментальным путем. Эффективность подобного метода диагностики ЭМС многократно подтверждена на практике [4–6]. Вместе с тем существенное усложнение радиоэлектронных систем и комплексов, расширение их функциональности и используемого диапазона частот, увеличение быстродействия и усложнение внешней ЭМО приводят к необходимости развития и уточнения существующих

методов анализа внутрисистемной и межсистемной ЭМС и развития новых методов, связанных с анализом нелинейных помех радиоприему – интермодуляции, блокирования и т. п.

Эффективность метода [1–6] анализа ЭМС может быть существенно повышена за счет использования при его реализации следующих оригинальных методик и подходов:

– технологии дискретного нелинейного анализа (ДНА) ЭМС, предназначенной для моделирования поведения РП в сложной ЭМО с учетом нелинейных эффектов (интермодуляции, блокирования, перекрестных искажений и т. п.) [7–9];

– технологии двухчастотного зондирования (ДЧЗ), предназначенной для испытаний РП с целью получения необходимого объема информации об их восприимчивости и входной нелинейности, а также для испытаний радиотехнических компонентов (усилителей радиочастоты, смесителей и т. п.) с целью получения информации об их нелинейности и избирательности [9–14];

– технологии синтеза адекватных математических моделей РП и радиотехнических компонентов на основе результатов их испытаний методом ДЧЗ [9–14];

– методики построения и уточнения моделей наихудшего случая, предназначенных для описания передаточных характеристик паразитных ЭМ связей различных типов на основе использования аналитических и (или) численных методов в условиях отсутствия полных и достоверных исходных данных [15–27].

Использование этих технологий в сочетании с применением САД моделей анализируемых объектов (мобильных и локальных наземных) и модификацией процедур частотной дискретизации используемых моделей спектров и частотных характеристик путей распространения помех позволило существенно увеличить вычислительную эффективность и объективность компьютерного анализа ЭМС, что подтверждается результатами его апробации на практике [28–31], а также разработать эффективное программное обеспечение для экспертной оценки и технической диагностики ЭМС наземных и бортовых ЛГ РЭС [32–35].

Цель данной работы – представить разработанную и апробированную на практике технологию итерационной компьютерной диагностики ЭМС ЛГ РЭС, основанную на идеологии IEMCAP и использующую предложенные авторами специализированные методики и подходы.

### **Технология дискретного компьютерного анализа ЭМС ЛГ РЭС с использованием моделей наихудшего случая для описания паразитных ЭМ связей**

1. *Базовый алгоритм анализа ЭМС.* Используемая технология многовариантного дискретного линейного и нелинейного анализа ЭМС радиоэлектронного оборудования анализируемой ЛГ РЭС в сложной ЭМО с применением моделей наихудшего случая включает следующие основные стадии:

1. Разработка пространственной геометрической модели ЛГ РЭС с вариантами размещения источников и рецепторов ЭМ помех (антенн РПД и РП ЛГ) и определение всех характеристик объекта, влияющих на ЭМ связи между ними (материал корпуса, проводимость грунта, расположение антенн в ЛГ, их тип, размеры, условия согласования).

2. Разработка моделей наихудшего случая для ЭМ паразитных связей при различных вариантах реализации ЛГ РЭС, включая:

– модели диаграмм направленности (ДН) антенн (для анализа влияния внешней ЭМО);  
– модели наихудшего случая [1–3] паразитных ЭМ связей между антеннами ЛГ;  
– модели спектров основных и побочных излучений каждого РПД в широкой полосе частот (с правой границей, до 10 раз превышающей его максимальную рабочую частоту);

– модели характеристик частотной избирательности каждого РП по основному, соседним и побочным каналам приема в полосе частот, правая граница которой до 10 раз превышает предельную частоту настройки РП;

– модели частотной избирательности входных/выходных фильтров (преселекторов, комбайнеров и т. п.).

3. Выполнение дискретного линейного анализа (ДЛА) внутрисистемной ЭМС с использованием пессимистических моделей [1–3] связей «антенна – антенна» для каждого из множества вариантов размещения антенн ЛГ, по результатам которого:

- производится пессимистическая оценка опасности поражения РП основным и побочными излучениями РПД ЛГ и ЭМ полями внешней ЭМО (по основным, соседним и побочным каналам приема);

- для каждого варианта размещения антенн и средств защиты производится оценка суммарных уровней помех на антенном входе каждого РП ЛГ;

- определяются потенциально опасные паразитные ЭМ связи, способные стать причиной мощных входных воздействий и возникновения радиопомех в каждом из РП ЛГ.

4. После определения потенциально опасных паразитных ЭМ связей в ЛГ, способных стать причиной помех радиоприему, выполняется анализ этих связей с использованием численных методов (FDTD, MoM, FEM, МАБ). При этом для антенн, связи между которыми определены как потенциально опасные, осуществляются вариации параметров, определяющих эти связи. Моделирование осуществляется в диапазоне частот, для которого определены потенциально-опасные связи, в следующем порядке:

- производится уточнение моделей амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) элементов матрицы рассеивания, которые характеризуют паразитные связи между антеннами в установленных ранее диапазонах частот при различных значениях параметров антенн;

- строится огибающая наихудшего случая АЧХ связей «антенна – антенна»;

- производится уточнение моделей ДН антенн с учетом их конструктивных особенностей, положения по отношению к элементам конструкции ЛГ и подстилающей поверхности с учетом их проводимости численными методами электродинамики для более объективного анализа воздействия внешней ЭМО;

- производится уточнение дискретных моделей спектров излучений РПД;

- уточняются модели характеристик восприимчивости РП;

- для каждого варианта размещения антенн в ЛГ выполняется дискретный линейный анализ ЭМС с использованием уточненных моделей потенциально опасных паразитных ЭМ связей и уточненных характеристик восприимчивости РП; в результате уточняется опасность отдельных паразитных ЭМ связей и уровней создаваемых помех на различных частотах настройки РП ЛГ с количественной оценкой значений интегрального запаса помехозащищенности для каждого РП – рецептора помех.

5. Выбирается один или несколько наиболее перспективных (характеризующихся отсутствием помех по основным каналам приема и наименьшими уровнями внеполосных входных воздействий) вариантов ЛГ для дальнейшего детального анализа. Далее анализ выполняется для этих вариантов ЛГ:

- если необходимо, разрабатывается комплекс мер по устранению линейных помех между РЭС ЛГ и выполняется дискретный линейный анализ ЭМС РЭС ЛГ с учетом реализации этих мер;

- оценивается потенциальная опасность поражения каждого из РП нелинейными радиопомехами (превышение суммарным уровнем помех на входах каждого из РП ЛГ уровней их восприимчивости к интермодуляции как наименьшего из значений восприимчивости к нелинейным радиопомехам отдельных видов).

Отметим, что в результате реализации мер по защите от линейных помех, как правило, существенно сокращается и число ситуаций с недопустимо высокими уровнями внеполосных входных воздействий, представляющими опасность с точки зрения нелинейных радиопомех.

6. Для ситуаций, сохранивших статус потенциально опасных с точки зрения нелинейных помех, выполняется ДНА ЭМС по методике [7–9], включая:

- определение характеристик нелинейности и избирательности РП по антенному входу с учетом особенностей структуры, элементной базы и преобразований частот в РП (наилучший результат может быть получен путем испытаний РП методом ДЧЗ [9–14], позволяющим обнаружить, идентифицировать и измерить параметры всех реально существующих линейных и нелинейных каналов поражения РП помехами по антенному входу, а также весьма точно измерить параметры его входной нелинейности);

- синтез структурно-функциональной модели каждого из РП, включая определение параметров полиномиальных моделей наихудшего случая входной нелинейности РП, пригодных для анализа их поведения в данной ЭМО; мгновенные значения напряжения

суммарного сигнала на входе каждого РП не должны превышать верхней границы области определения полиномиальной модели его входной нелинейности;

– для всех потенциально опасных ситуаций рассматриваемого варианта реализации ЛГ выполнение дискретного нелинейного анализа поведения РП в ЭМО, формируемой как сумма сигналов РПД ЛГ и сигналов внешней ЭМО, и определение ситуаций, при которых по результатам ДНА подтверждена опасность поражения РП нелинейными радиопомехами.

Подобный анализ выполняется для каждого варианта размещения антенн в ЛГ, признанного перспективным по результатам уточнений моделей потенциально опасных паразитных ЭМ связей и характеристик восприимчивости РП, с выявлением ситуаций, при которых по результатам анализа подтверждается опасность поражения РП нелинейными радиопомехами.

7. Определение, при необходимости, для каждого анализируемого варианта размещения антенн технических и организационных мер (не связанных с изменением относительного положения антенн) по устранению нелинейных радиопомех в ЛГ.

8. В бортовых ЛГ РЭС важно учесть, наряду с паразитными связями «антенна РПД – антенна РП», и паразитные ЭМ связи других видов («антенна – кабель», «кабель – кабель», «антенна – корпус оборудования», «внешнее ЭМ поле – кабель» и т. п.); для этого процедуры п. 1–6 выполняются в рамках анализа ЭМС с учетом этих связей.

2. *Построение трехмерной геометрической модели ЛГ.* Проектирование ЛГ РЭС осуществляется с использованием современных систем автоматизации проектирования (CAD), таких как ProEngineer, CATIA, SolidWorks и т.п. Создаваемые с их использованием компьютерные геометрические 3D модели ЛГ с размещенными в них радиоэлектронным оборудованием, системами электропитания и управления, а также соединительными линиями (радиочастотными, передачи данных, электропитания и др.) используются в [32–35] для анализа внутрисистемной и межсистемной ЭМС ЛГ. Примеры таких 3D моделей ЛГ приведены на рис. 1–3.

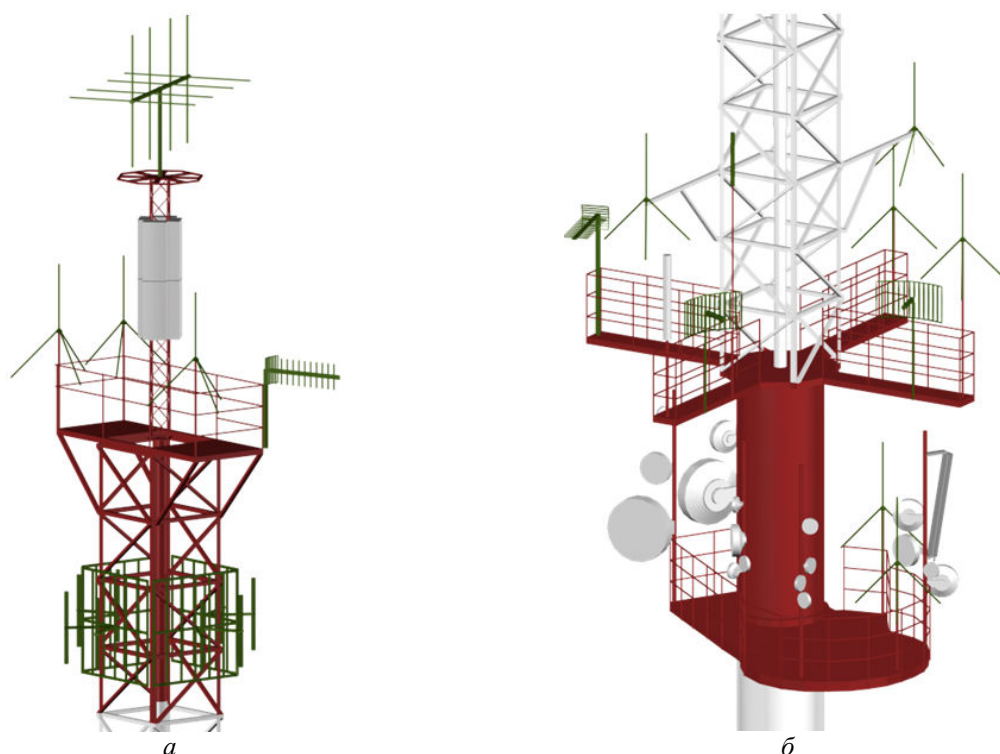


Рис. 1. 3D модели верхнего (а) и среднего (б) ярусов ЛГ РЭС на высотной радиомачте с антеннами фиксированной и подвижной служб, анализ ЭМС которой выполнен в [28]

Необходимость анализа ЭМС ЛГ РЭС, размещенных на высотной антенной мачте (рис. 1), была обусловлена изменением частотных каналов FM и TV вещания, а также планируемой установкой дополнительного радиооборудования. В данном случае анализ ЭМС

ЛГ предполагал оценку внутрисистемной ЭМС при различных сценариях совместного функционирования многочисленных радиосистем, размещенных в ЛГ.

Необходимость анализа ЭМС бортовых ЛГ РЭС транспортных средств (рис. 2, 3) была обусловлена тем, что на заключительных этапах их проектирования и при испытаниях опытных образцов были выявлены проблемы взаимного влияния РЭС этих ЛГ. Исходя из предполагаемых условий применения анализируемых мобильных ЛГ РЭС, анализ их ЭМС выполнялся для следующих условий:

– эксплуатация единичной ЛГ на открытой местности вдали от других источников радиопомех (ЭМО на входе каждого радиоприемника формируется преимущественно радиоизлучениями РПД ЛГ);

– работа РЭС ЛГ осуществляется в условиях промышленной зоны с высокой территориальной плотностью и активностью радиосистем различных служб диапазонов ВЧ, ОВЧ, УВЧ и СВЧ (ЭМО на входе каждого РП создается как радиоизлучениями РПД бортового комплекса, так и множеством внешних РПД).

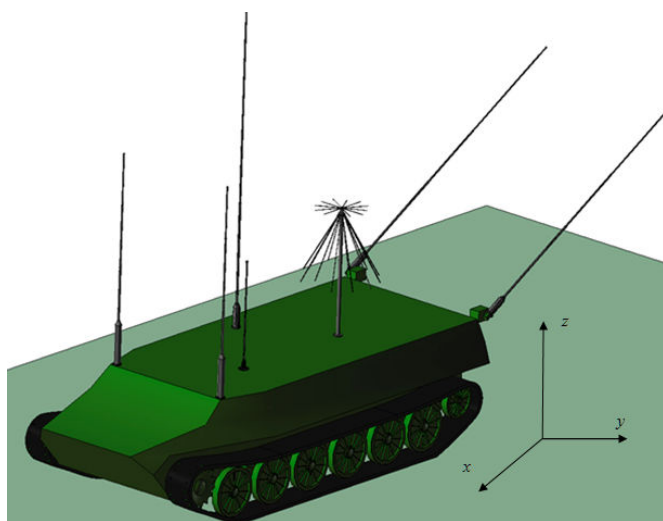


Рис. 2. 3D модель анализируемой бортовой ЛГ (системы управления и связи геологоразведочного комплекса) с одним из вариантов размещения антенн на корпусе, анализ ЭМС которой выполнен в [30]

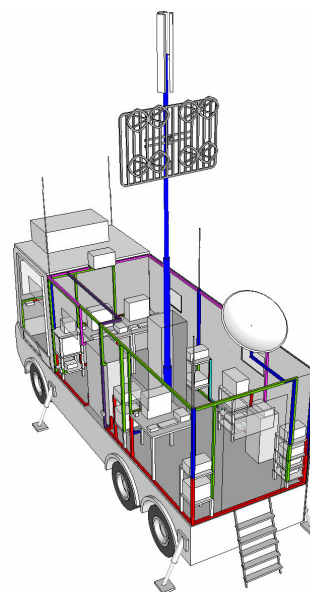


Рис. 3. 3D модель анализируемой бортовой ЛГ РЭС с одним из вариантов размещения антенн, РП, РПД, оборудования подсистем управления и питания, кабельных и фидерных линий, анализ ЭМС которой выполнен с использованием экспертной системы «EMC-Analyzer» [32–35]

*3. Детальный анализ потенциально опасных ЭМ связей между элементами ЛГ.* Методику детального анализа потенциально опасных ЭМ связей между элементами ЛГ поясним на примере анализа ЭМС ЛГ, образуемых РЭС высотной радиомачты [28].

Разработанная в статье [28] методика уточнения моделей наихудшего случая паразитных электромагнитных связей между антеннами, которая применима также и для уточнения моделей паразитных связей других видов, например, таких как связи «кабель–кабель», основана на усреднении ансамбля реализаций АЧХ паразитной связи, полученных численными методами при вариации параметров решаемой задачи.

Эмпирически установлено, что многократное использование численных расчетов позволяет устранить изрезанность АЧХ на высоких частотах, обусловленную резонансами, только в случае большого количества вариаций параметров, поэтому численные расчеты повторяются 20...60 раз. Чтобы обеспечить репрезентативность выборки реализаций АЧХ, необходимо варьировать все неизвестные параметры задачи независимо друг от друга. Поэтому при диагностике ЭМС сложных ЛГ РЭС такой подход требует неприемлемо больших вычислительных затрат, поскольку обычно необходимо выполнить численное моделирование десятков паразитных связей и каждая из антенн имеет несколько неизвестных параметров.

Так, при анализе связи двух антенн, для каждой из которых не определены  $n$  параметров, и при вариации каждый из параметров может принимать  $m$  значений, количество  $N$  независимых вариаций будет равно  $N = m^{2n}$ .

Для уменьшения количества независимых вариаций следует уменьшить число возможных значений, которые может принимать каждый из параметров. Полагается, что каждый из параметров может принимать 3 возможных значения: опорное значение ( $X_{ref}$ ), минимально возможное значение ( $X_{min} = X_{ref}(1 - \delta_X)$ ) и максимально возможное значение ( $X_{max} = X_{ref}(1 + \delta_X)$ ), где  $\delta_X$  – относительная погрешность задания параметра.

Чтобы обеспечить пессимистический характер модели АЧХ паразитной связи антенн при уменьшении числа вариаций, разработан специальный алгоритм нахождения огибающей на основе небольшой выборки реализаций АЧХ. Поэтому синтез численной модели наихудшего случая осуществляется по следующему алгоритму.

1. При различных значениях параметров антенн с помощью методов вычислительной электродинамики рассчитывается набор (выборка объемом  $N$ ) реализаций АЧХ паразитной связи  $\{H_1(f), H_2(f) \dots H_N(f)\}$ .

2. На основе рассчитанной выборки реализаций строится максимальная АЧХ коэффициента связи:

$$H_M(f) = \max\{H_1(f), H_2(f) \dots H_N(f)\}. \quad (1)$$

Оценка (1) не является пессимистической, поскольку не устраняет изрезанность АЧХ. Для получения пессимистической оценки следует построить огибающую, проходящую через максимумы функции  $H_M(f)$ . Для этого выполняются следующие действия.

3. На частотной сетке, имеющей шаг  $\Delta f$ , вычисляются разности:

$$\Delta H_{Mj} = H_M(f_j + \Delta f) - H_M(f_j), \quad (2)$$

где  $j = 0 \dots (f_{max} - f_{min})/\Delta f$  – номер частотного промежутка в рассматриваемом диапазоне  $[f_{min}, f_{max}]$ . Затем выбираются частоты  $f_q = f_{max}$ , для которых разности (2) изменяют знак с положительного на отрицательный и  $q = 0 \dots Q$ , где  $Q$  – количество найденных максимумов.

4. Строится вспомогательная кусочно-гладкая функция, которая соединяет значения функции  $H_M(f_q)$  в точках максимума прямолинейными отрезками:

$$H_L(f) = \text{linterp}\{f_q, H_M(f_q), f\}, \quad (3)$$

где обозначение «*linterp*» использовано для краткой записи этого действия.

5. Выбирается максимальное значение для двух функций  $H_M(f)$  и  $H_L(f)$  во всем рассматриваемом частотном диапазоне:

$$H_W(f) = \max\{H_M(f), H_L(f)\}. \quad (4)$$

Функция  $H_W(f)$  является пессимистической оценкой АЧХ коэффициента связи антенн.

Данный алгоритм нахождения огибающей передаточной характеристики паразитной ЭМ связи по небольшой выборке реализаций АЧХ обеспечивает уменьшение количества вычисляемых реализаций АЧХ и времени синтеза модели в 10...100 раз.

Рассмотрим пошаговую реализацию этого алгоритма на примере уточнения модели связи между антеннами, установленными на радиомачте (см. рис. 1).

1. Определяется номенклатура варьируемых параметров антенн. Параметры антенны-эмиттера известны с высокой точностью, поэтому варьируются только те параметры антенн-рецепторов, значения которых не заданы точно. К ним относятся:

- геометрические параметры излучающей системы;
- сопротивление нагрузки;
- координаты точки подключения нагрузки к антенне.

2. Для каждой антенны – рецептора помех определяются опорные значения варьируемых параметров:

- опорное значение длины стержней вибраторных антенн (с учетом коэффициента укорочения, зависящего от диаметра стержня) рассчитано из условия резонанса антенны на средней частоте рабочего диапазона. Длина зазора для подключения нагрузки выбрана

равной минимальному расстоянию между точками, которое обеспечивает корректное построение сетки для реализации численного моделирования;

– в качестве опорного значения сопротивления нагрузки (которая при моделировании подключается непосредственно к излучающей системе антенны, так как информация о согласующих устройствах антенн, как правило, отсутствует) используются теоретические значения входного сопротивления излучающей системы для антенны соответствующего типа;

– опорные значения координат точки подключения нагрузки для каждой антенны определяются на основе фотографий радиомачты с учетом типа антенны, ее назначения и диапазона рабочих частот.

3. Критериями правильности выбора опорных параметров являются: (а) достижение минимального КСВ антенны, (б) равенство рассчитанного значения коэффициента усиления антенны номинальному значению (приведенному в справочниках для антенн соответствующего типа) в рабочей полосе частот и (в) совпадение ДН, получаемой численным моделированием, с известной теоретической ДН для антенн соответствующего типа.

4. Для ЛГ РЭС, изображенной на рис. 1, методом FDTD выполнен численный расчет различных реализаций АЧХ каждой из паразитных связей между антенной-эмиттером и антеннами-рецепторами при вариации трех параметров, указанных в п. 1. При анализе все антенны рассматривались как единая электродинамическая система и соответствующие параметры антенн-рецепторов менялись одновременно, что позволило сократить количество рассматриваемых независимых вариаций до  $N = 3^3 = 27$ .

Результатом этого действия является набор АЧХ антенной развязки для каждой из анализируемых антенн-рецепторов:  $\{H_1(f), H_2(f), \dots, H_N(f)\}_k$ , где  $f$  – частота,  $H_1(f)$  – АЧХ, определенная численно при опорных значениях параметров антенны-рецептора;  $H_i(f)$  – АЧХ, полученные путем вариации параметров,  $k$  – номер антенны-рецептора.

5. Для каждой из пар (антенна-эмиттер – антенна-рецептор) построена огибающая набора  $\{H_1(f), H_2(f), \dots, H_N(f)\}$  АЧХ паразитной связи по алгоритму, приведенному выше. Эта огибающая и представляет собой численную модель наихудшего случая.

На рис. 4 приведены некоторые результаты синтеза аналитических и численных моделей наихудшего случая для паразитных связей между антенной-эмиттером и антеннами-рецепторами. Верхняя сплошная линия соответствует аналитической модели наихудшего случая [1–3], нижняя сплошная линия – уточненной численной модели (4) наихудшего случая. Прерывистыми линиями показаны примеры реализаций АЧХ, вычисленных методом FDTD: АЧХ, построенная на основе опорных значений всех параметров (точечная линия); АЧХ, соответствующая выбору максимально возможных (пунктирная линия) и минимально возможных (штрихпунктирная линия) значений всех параметров. В случае, когда две антенны-рецептора подключены к одному РП, при анализе антенной развязки рассчитывалось отношение суммы мощностей на выходе каждой из антенн-рецепторов к мощности, изучаемой РПД.

Проведенное уточнение моделей [1–3] паразитных ЭМ связей между антеннами рассматриваемой ЛГ обеспечило снижение уровня пессимизма этих моделей на 5–30 дБ в пределах всей анализируемой полосы частот, что существенно повысило точность анализа внутрисистемной ЭМС ЛГ при сохранении низкой вероятности дорогостоящих ошибок 2-го рода.

Практический анализ ЭМС ЛГ РЭС (рис. 1) с использованием уточненных численных моделей наихудшего случая позволил установить, что развязки между ее антеннами обеспечат отсутствие помех радиооборудованию, размещенному на мачте, при планируемом изменении рабочих частот радиопередатчиков ОВЧ-ЧМ вещания. Экспериментальная проверка ЭМС (пробный запуск всех установленных на мачте радиосредств в планируемых режимах работы) подтвердила справедливость данного вывода.

4. *Анализ нелинейных помех и идентификация их источников.* Методику ДНА ЭМС ЛГ РЭС поясним на примере [30] анализа ЭМС бортовой ЛГ РЭС, размещенных на транспортном средстве, представленном на рис. 2. Анализ осуществлен в следующей последовательности:

1. Определены модели наихудшего случая спектров излучения передатчиков и восприимчивости приемников. Их примеры для бортовой ВЧ радиостанции приведены на рис. 5.



2. Определены уточненные модели наихудшего случая для описания паразитных ЭМ связей между антеннами бортовой ЛГ РЭС. Пример такой модели для паразитной ЭМ связи между вибраторной антенной (1,35 м) и антенной зенитного излучения представлен на рис. 6.

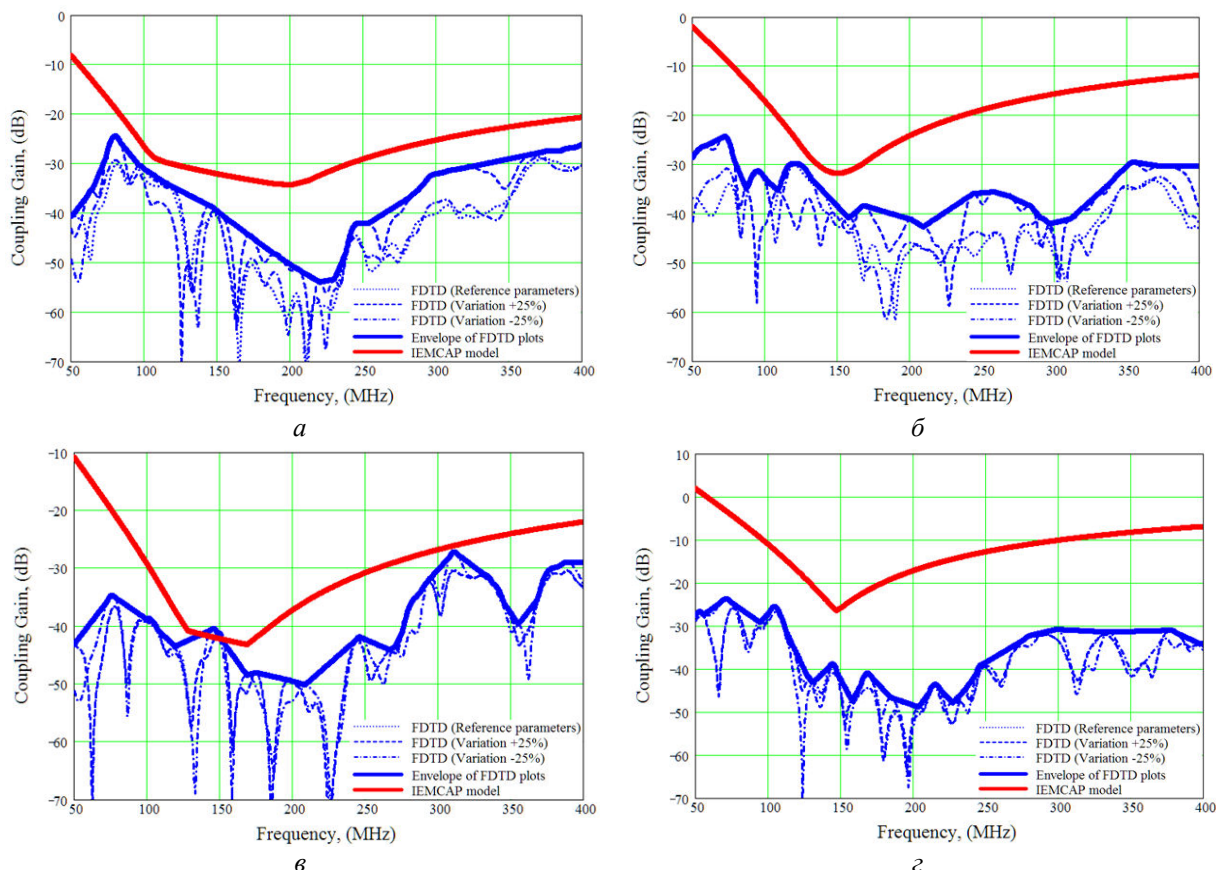


Рис. 4. АЧХ паразитной связи между антенной ОВЧ-ЧМ вещания (антенной-источником) и антенной-рецептором №1 ретранслятора мобильной связи диапазона ОВЧ (а), антенной-рецептором № 2 ретранслятора мобильной связи диапазона ОВЧ (б) и антенной-рецептором № 4 системы служебной связи диапазона ОВЧ (дискоконусная антенна) (в), антенной-рецептором № 5 ретранслятора мобильной связи диапазона ОВЧ (симметричный вибратор) (г)

3. Компьютерная диагностика ЭМС вариантов реализации бортовой системы выполнялась при трех уровнях мощности РПД – минимальном, среднем и максимальном, а также при использовании трех рабочих частот каждой радиостанции: не менее одной частоты вблизи нижней границы, в середине и вблизи верхней границы интервала рабочих частот; для каждой рабочей частоты исследованы все возможные (при работе в движении) варианты выбора антенн.

4. Выполнен ДЛА внутрисистемной ЭМС с использованием исходных и уточненных моделей наихудшего случая для описания ЭМ связей «антенна – антенна» для каждого из множества вариантов размещения антенн ЛГ.

5. Выполнен анализ ЭМО на входе каждого из РП и проведены их испытания методом ДЧЗ с выявлением потенциально опасных ситуаций поражения РП нелинейными помехами и построением полиномиальных моделей наихудшего случая входной нелинейности РП в соответствующем динамическом диапазоне входных воздействий.

6. Для потенциально опасных ситуаций выполнен ДНА ЭМС – дискретный нелинейный анализ поведения РП в ЭМО, формируемой как сумма сигналов РПД бортовой системы и сигналов внешней ЭМО, и определены ситуации, при которых по результатам анализа подтверждена опасность поражения РП нелинейными радиопомехами.



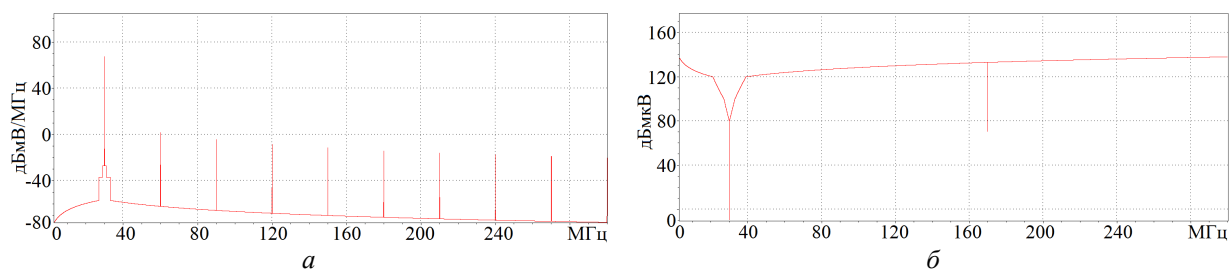


Рис. 5. Модели наихудшего случая спектра излучения РПД (а) и характеристики восприимчивости РП (б) ВЧ радиостанции, входящей в состав бортовой ЛГ, для частоты настройки 30 МГц

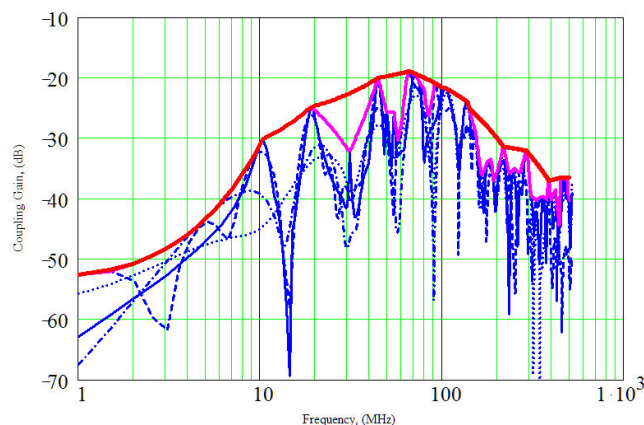


Рис. 6. Численная модель наихудшего случая ЭМ связи между антеннами (верхняя линия). Тонкая сплошная и пунктирная линии соответствуют АЧХ ЭМ связи при исходном положении антенн для максимального ( $\sigma = \infty$ ) и минимального ( $\sigma = 0$ ) значений проводимости грунта. Штрихпунктирная линия и линия, представленная точками, соответствуют АЧХ ЭМ связи при новом положении антенн для данных значений проводимости грунта. Линия между тонкой и толстой сплошными линиями – математическая огибающая (1)

В качестве примера ДНА ЭМС на рис. 7 приведены спектры суммарного сигнала в различных контрольных точках структурной модели РП ВЧ радиостанции при его настройке на частоту 15 МГц, полученные с использованием технологии и алгоритмов [7–9] и полиномиальной модели входной нелинейности РП 15-го порядка, полученной по результатам его испытаний методом ДЧЗ.

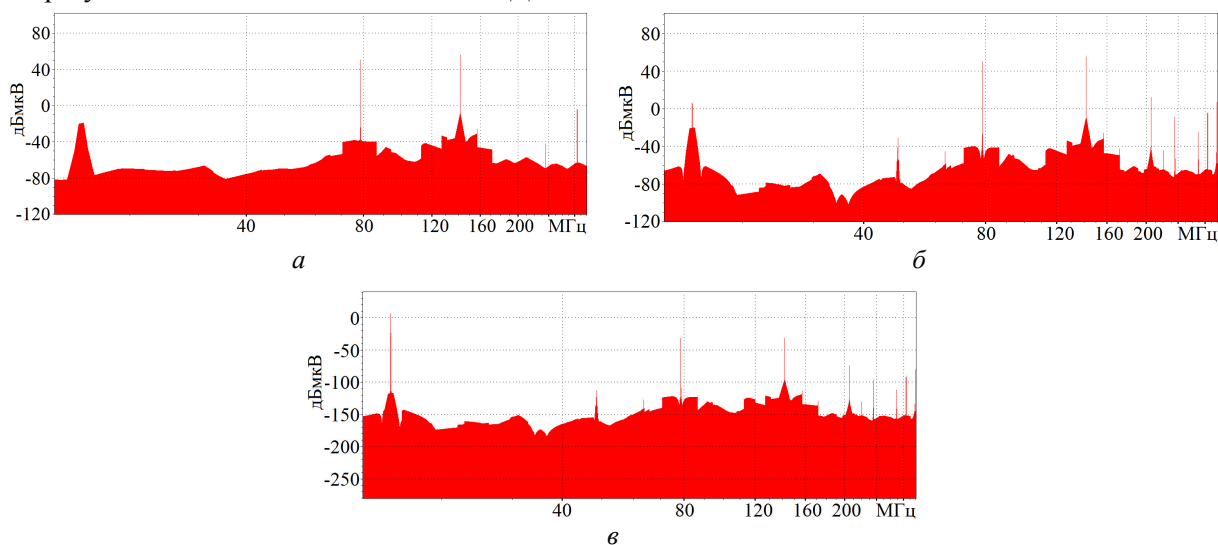


Рис. 7. Спектры суммарного сигнала в различных точках структурной модели РП ВЧ радиостанции: спектр на выходе преселектора (а), спектр на выходе нелинейного безынерционного элемента модели РП (б) и спектр на выходе нелинейной модели РП ВЧ радиостанции (е)

По результатам выполненных ДЛИА и ДНА ЭМС РЭС ЛГ обнаружены неприемлемые варианты совместного функционирования отдельных радиостанций и определены условия функционирования каждой из радиостанций без помех по основному, соседним и побочным каналам приема; обнаружены и идентифицированы ситуации, в которых зафиксировано поражение бортовых РП интермодуляционными помехами 3–5 порядка, что позволило определить меры по исключению этих ситуаций в процессе эксплуатации бортовой ЛГ РЭС.

Анализ ЭМС различных наземных и бортовых ЛГ РЭС с использованием специализированной экспертной системы [32–35], обеспечивающей возможность использования методик и моделей [7–27], подтверждает высокую эффективность представленной технологии дискретного анализа ЭМС ЛГ РЭС. Ниже в табл. 1 приведены результаты оценки затрат времени на выполнение операций линейного анализа ЭМС бортовой ЛГ РЭС, представленной на рис. 3, при различном числе частотных дискретов в моделях спектров и характеристиках восприимчивости (расчеты проводились на ПЭВМ с процессором AMD Phenom II 3.0 ГГц и ОЗУ 12 Гбайт). В табл. 2 приведены оценки затрат времени на выполнение дискретного нелинейного моделирования воздействия ЭМО на РП, представленный моделью в виде типового радиотехнического звена (последовательности входного фильтра, нелинейного элемента и выходного фильтра основной избирательности) при различном числе спектральных компонент входной ЭМО и различной степени полиномиальной аппроксимации передаточной характеристики РП.

Таблица 1. Затраты времени на выполнение процедур дискретного линейного анализа ЭМС

Процедура	Число частотных отсчетов		
	10000	100000	1000000
1. Расчет отдельной паразитной связи «антенна – антенна», с	< 1	< 1	7
2. ДЛИА ЭМС бортовой системы (26) spurious couplings «антенна – антенна», с	2	12	101

Таблица 2. Затраты времени на выполнение процедур дискретного нелинейного анализа ЭМС

Число частотных отсчетов	100000		1000000	
	15	25	15	25
Степень полинома	>1	2	5	11
ДНА ЭМС РП, с	2	2	9	14

### Заключение

Достоинствами представленной технологии анализа ЭМС ЛГ РЭС, определяющими ее ценность для практики, являются высокая точность представления спектров излучений, АЧХ паразитных связей, характеристик восприимчивости и нелинейности радиоприемников, высокая вычислительная эффективность процедур дискретного линейного и нелинейного анализа ЭМС, пессимистический характер оценок ЭМС и их устойчивость к погрешностям в исходных данных, возможность итерационного уточнения моделей потенциально опасных нежелательных взаимодействий. Эти достоинства подтверждены результатами решения практических задач анализа и диагностики ЭМС ряда бортовых и наземных ЛГ РЭС [28–31], что позволяет рекомендовать использование данной технологии при разработке и модернизации, а также при решении проблем ЭМС функционирующих стационарных и подвижных ЛГ РЭС.

### Список литературы / References

1. Baldwin T.E.Jr., Capraro G.T. Intrasystem Electromagnetic Compatibility Analysis Program (IEMCAP) // IEEE Trans. on EMC. 1980. Vol. 22. P. 224–228.
2. Bogdanor J.L., Pearlman R.A., Siegel M.D. Intrasystem Electromagnetic Compatibility Analysis Program. Volume I: User's Manual Engineering Section. Mc.Donnell Douglas Aircraft Corp., F30602-72-C-0277, Rome Air Development Center, Griffiss AFB NY, Dec. 1974.
3. Capraro G.T. An Intrasystem EMC Analysis Program // Electromagnetic Compatibility, AGARD Lecture Series. 1981. No.116. P. 4–1 – 4–22.

4. Pearlman R.A. Intrasystem Electromagnetic Compatibility Analysis Program (IEMCAP) F-15 Validation. Part I. Validation and Sensitivity Study. Mc.Donnell Douglas Aircraft Corp., F30602-76-C-0193, Rome Air Development Center, Griffiss AFB NY, Sep. 1977.
5. Freeman E. IEMCAP Implementation Study, Volume I. Sachs/Freeman Associates Inc., F30602-76-C-0356, Rome Air Development Center, Griffiss AFB NY, Dec. 1977.
6. Gardner F.K., Davidson S.A. Validation of IEMCAP using the B-52 // Proc. of the 1978 IEEE Symp. on EMC. P. 307–309.
7. Mordachev V.I. Discrete Nonlinear Analysis of Radio Systems Electromagnetic Compatibility // Doklady BGUIR. 2004. No. 2. P. 154–163.
8. Mordachev V.I., Sinkevich E.V. Discrete technology of electromagnetic compatibility analysis at the system level: features and applications overview // Proc. of the Int. conf. on metrology and measurement «ICMM 2007». Vol. 1. Beijing, China, 2007. P. 57–63.
9. Sinkevich E., Mordachev V. Characterization of Radio Receiver's Front-End Nonlinearity by Measurement of Spurious-Free Dynamic Ranges // Proc. of the 11-th Int. Symp. on EMC «EMC Europe 2012». Rome, Italy, 2012. 6 p.
10. Mordachev V.I. Automated double frequency test system // Proc. of 5th Int. Conf. on Electromagnetic Interference and Compatibility (INCEMIC'97). Hyderabad, India, 1997. P. 99–104.
11. Mordachev V.I. Automated Double-Frequency Testing Technique for Mapping Receiver Interference Responses // IEEE Trans. on EMC. 2000. Vol. 42, No 2. P. 213–225.
12. Mordachev V.I., Sinkevich E.V. Experimental Analysis of Radio Receiver Susceptibility to Out-of-Band Interference by Means of Double-Frequency Test System // Proc. of the 10-th Int. Symp. on EMC «EMC Europe 2011». York, 2011. P. 405–411.
13. Mordachev V., Sinkevich E. Spurious and Intermodulation Response Analysis of Passive Double-Balanced Mixers using the Double-Frequency Scanning Technique // Proc. of the 2013 Int. Symp. on EMC «EMC Europe 2013». Brugge, 2013. P. 737–742.
14. Mordachev V., Sinkevich E. Representation and Analysis of Radio Receivers' Susceptibility and Nonlinearity by the Use of 3D Double-Frequency Characteristics // Proc. of the 2014 Int. Symp. on EMC «EMC'14/Tokyo». Tokyo, 2014. P. 689–692.
15. Sinkevich E. Worst-Case Models of RF Front-End Nonlinearity for Discrete Nonlinear Analysis of Electromagnetic Compatibility // Proc. of the 2014 Int. Symp. on EMC «EMC Europe 2014». Gothenburg, 2014. P. 1281–1286.
16. Tsionenko D.A., Maly S.V., Sinkevich E.V. Computationally-Effective Ultra-Wideband Worst-Case Model of Electromagnetic Wave Diffraction by Aperture in Conducting Screen // Proc. of the 2014 Int. Symp. on EMC «EMC Europe 2014». Gothenburg, 2014. P. 1287–1292.
17. Computationally-Effective Worst-Case Model of Wire Radiation in the Frequency Range 1 Hz – 40 GHz / Y.Y. Arlou [et al.] // Proc. of the 2014 Int. Symp. on EMC «EMC Europe 2014». Gothenburg, 2014. P. 1293–1298.
18. Computationally-Effective Worst-Case Estimation of Currents in Transmission Lines for EMC Diagnostics of Big Systems / D.A. Tsyantenka [et al.] // Proc. of the EMC 2015 Joint IEEE Int. Symp. on EMC and EMC Europe. Dresden, 2015. P. 1165–1170.
19. Computationally-Effective Wideband Worst-Case Model of Transmission Line Radiation / D.A. Tsyantenka [et al.] // Proc. of the EMC 2015 Joint IEEE Int. Symp. on EMC and EMC Europe. Dresden, 2015. P. 1171–1176.
20. Arlou Y., Tsyantenka D., Sinkevich E. Wideband computationally-effective worst-case model of twisted pair radiation // Proc. of the Int. Conf. «Days on Diffraction». S.-Petersburg, 2015. P. 14–19.
21. Tsyantenka D., Sinkevich E., Matsveyeu A. Computationally-Effective Worst-Case Model of Coupling between On-Board Antennas That Takes into Account Diffraction by Conducting Hull // Proc. of the 2016 Int. Symp. on EMC «EMC Europe 2016». Wroclaw, 2016. P. 602–607.
22. Sinkevich E., Tsyantenka D., Yurtsev O. System-Level Model for Analysis of Dipole Antenna Response to Electromagnetic Pulse // Proc. of the 2016 Int. Symp. on EMC «EMC Europe 2016». Wroclaw, 2016. P. 614–619.
23. Arlou Y., Sinkevich E., Tsyantenka D. Computationally Effective Wideband Combined Worst-Case Model of Monopole Antenna Coupling // Proc. of the 2016 Int. Symp. on EMC «EMC Europe 2016». Wroclaw, 2016. P. 620–625.
24. Tsyantenka D., Sinkevich E., Arlou Y. Wideband Worst-Case Model of Electromagnetic Field Shielding by Metallic Enclosure with Apertures // Proc. of the 2017 Int. Symp. on EMC «EMC Europe 2017». Angers, 2017. 6 p (paper ID 71).
25. Worst-case model of spurious resonances appearing in radio-frequency cables and degrading electromagnetic compatibility characteristics of wireless equipment at out-of-band frequencies / Y.Y. Arlou [et al.] // Proc. of the 2017 Int. Symp. on EMC «EMC Europe 2017». Angers, 2017. 6 p. (paper ID 122).

26. Tsyankenka D., Arlou Y., Sinkevich E. Worst-Case Model for Considering Gaskets in Calculation of Shielding Effectiveness of Metallic Enclosures // Proc. of the 2018 Int. Symp. on EMC «EMC Europe 2018». Amsterdam, 2018. P. 178–183.
27. Worst-case Model for Calculation of Lightning Electromagnetic Field / Y. Arlou [et al.] // Proc. of the 2018 Int. Symp. on EMC «EMC Europe 2018». Amsterdam, 2018. P. 196–201.
28. EMC Diagnostics of Complex Radio Systems by the Use of Analytical and Numerical Worst-Case Models for Spurious Couplings Between Antennas / Mordachev V. [et al.] // Proc. of the 2016 Int. Symp. on EMC «EMC Europe 2016». Wroclaw, 2016. P. 608–613.
29. Simulation of Nonlinear Interference in Aircraft Systems Operating in Complex Electromagnetic Environment Created by Land-Based and Air-Based Wireless Systems / V. Mordachev [et al.] // Proc. of the 2017 Int. Symp. on EMC «EMC Europe 2017». Angers, 2017. 6 p. (paper No. 81).
30. Multi-Variant Discrete Analysis of EMC of On-Board Radio Equipment with Use of Worst-Case Models/ Mordachev V. [et al.] // Proc. of the 2018 Int. Symp. on EMC «EMC Europe 2018». Amsterdam, 2018. P. 190–195.
31. Xie Ma, Sinkevich E., Mordachev V. Suppression of the electromagnetic interference from satellite communication on-the-move system // Proc. of 2018 IEEE Int. Symp. on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting. Boston, 2018. P. 165–166.
32. Mordachev V., Litvinko P. Expert System for EMC Analysis Taking Into Account Nonlinear Interference // Proc. of 16th Int. Wroclaw Symp. on EMC. Wroclaw, 2002. P. 265–270.
33. Mordachev V., Litvinko P. Advanced options of expert system «EMC-Analyzer» // Proc. of the 2006 Int. Symp. on EMC «EMC Europe 2006». Barcelona, 2006. P. 635–640.
34. Mordachev V.I., Sinkevich E.V. EMC-Analyzer expert system: improvement of IEMCAP models // Proc. of 19<sup>th</sup> Int. Wroclaw Symp. and Exhib. on EMC. Wroclaw, 2008. P. 423–428.
35. EMC-Analyzer. Mathematical models and algorithms of electromagnetic compatibility analysis and prediction software complex. Minsk, 2018.

#### **Сведения об авторах**

Мордачев В.И., к.т.н., доцент, ведущий научный сотрудник Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Синькевич Е.В., заведующий НИЛ «ЭМС локальных группировок РЭС» Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Ционенко Д.А., к.ф.-м.н., доцент, с.н.с. Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Орлов Е.Е., н.с. Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

#### **Адрес для корреспонденции**

220013, Республика Беларусь,  
г. Минск, ул. П. Бровки, 6,  
Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники  
тел. +375-17-293-89-94;  
e-mail: emc@bsuir.by;  
www.emc.bsuir.by  
Мордачев Владимир Иванович

#### **Information about the authors**

Mordachev V.I., PhD, associate professor, leader researcher of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Sinkevich E.V., head of EMC R&D Laboratory of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Tsyankenka D.A., PhD, associate professor, senior researcher of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Arlou Y.Y., researcher of Belarusian state university of informatics and radioelectronics

#### **Address for correspondence**

220013, Republic of Belarus,  
Minsk, P. Brovka st., 6  
Belarusian state university  
of informatics and radioelectronics  
phone. +375-17-293-89-94;  
e-mail: emc@bsuir.by;  
www.emc.bsuir.by  
Mordachev Vladimir Ivanivich